

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS  
CURSO DE BACHARELADO EM GESTÃO E ANÁLISE AMBIENTAL**

**SABRINA GABRIELE DA SILVA**

**FORMIGAS COMO BIOINDICADORAS DA TRAJETÓRIA SUCESSIONAL DE  
RESTAURAÇÃO DE UMA FLORESTA RIPÁRIA**

**SÃO CARLOS - SP**

**2025**

SABRINA GABRIELE DA SILVA

**FORMIGAS COMO BIOINDICADORAS DA TRAJETÓRIA SUCESSIONAL DE  
RESTAURAÇÃO DE UMA FLORESTA RIPÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Gestão e Análise Ambiental.

Orientador: Marcel Okamoto Tanaka

SÃO CARLOS - SP

2025

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Daniel Augusto da Silva e Maria Regina Predolim da Silva, por todos os ensinamentos e conselhos ao longo da minha vida, e por todo o esforço que fizeram para que eu pudesse chegar até aqui.

Às minhas irmãs, Mariana Cristina da Silva e Juliana Fernanda da Silva, por serem minhas maiores referências de força e dedicação, e por me inspirarem a nunca desistir dos meus sonhos.

Aos meus avós Mario Predolim (in memoriam) e Aparecida do Carmo Cremonesi Predolim, por me ensinarem sobre compaixão. O carinho e o amor de vocês moldaram quem eu sou hoje.

Ao Rafael Vinícius Silvério Rodrigues, por ser meu melhor amigo e companheiro desta e de outras vidas. Por estar comigo nos bons e maus momentos e por sempre acreditar em mim – muitas vezes mais do que eu mesma acredito.

A todos os professores que tive a sorte de conhecer durante minha jornada, sobretudo os do curso de Gestão e Análise Ambiental, que me permitiram olhar a vida com outros olhos e admirar ainda mais as ciências ambientais.

Ao Marcel Okamoto Tanaka e à Andréa Lucia Teixeira de Souza, por me receberem tão bem no Laboratório de Ecologia Aplicada e por nunca deixarem faltar café e pão de queijo.

À Bruna Busatto e à Heloisa Vieira Silva, por toda a ajuda durante a execução deste projeto, desde as coletas em campo até a identificação das formigas. Sem vocês, nada disso seria possível.

“And God,  
please let the deer  
on the highway  
get some kind of heaven.  
Something with tall soft grass  
and sweet reunion.  
Let the moths in porch lights  
go some place  
with a thousand suns,  
that taste like sugar  
and get swallowed whole.  
May the mice  
in oil and glue  
have forever dry, warm fur  
and full bellies.  
If I am killed  
for simply living,  
let death be kinder  
than man.”

— Althea Davis

## RESUMO

Ações antrópicas podem prejudicar ecossistemas como ambientes ripários, causando perda de biodiversidade, o que compromete o desempenho das funções e serviços ecossistêmicos desses ambientes. Assim, a restauração ecológica é essencial para recuperar a biodiversidade e funcionamento dos ecossistemas. O uso de bioindicadores é importante para monitorar o progresso da regeneração florestal, e a mirmecofauna, em especial, se destaca por sua sensibilidade às mudanças ambientais. Neste estudo, avaliamos se as comunidades de formigas de solo, após 10 anos da restauração de uma área ripária degradada (restauro), haviam se recuperado em comparação com áreas de remanescente florestal (mata) e pasto adjacentes. Para tanto, foram realizadas coletas utilizando armadilhas de queda (*pitfall*) em seis parcelas por tipo de vegetação e as formigas foram identificadas ao nível de morfoespécie. Os resultados obtidos indicam que o restauro e a mata apresentaram comunidades de formigas com valores similares de diversidade, sendo mais diversas em comparação ao pasto, que apresentou maior dominância de espécies. Além disso, a composição de espécies também foi similar para o restauro e a mata, enquanto o pasto apresentou uma composição diferenciada, possivelmente devido ao menor número de espécies e maior dominância. Portanto, a restauração de florestas ripárias permite uma recuperação da diversidade de formigas após dez anos, possivelmente contribuindo para uma recuperação dos processos ecossistêmicos por este importante grupo da fauna edáfica.

**Palavras-chave:** biodiversidade; bioindicadores; comunidade de formigas; restauração.

## ABSTRACT

Anthropogenic actions can impair ecosystems such as riparian environments, resulting in biodiversity decline, which compromises the performance of ecosystem functions and services in these environments. Consequently, ecological restoration is essential to recover biodiversity and ecosystem functioning. The use of bioindicators is important to monitor the progress of forest regeneration, and myrmecofauna, in particular, stand out due to their sensitivity to environmental changes. In this study, we evaluated whether ground-dwelling ant communities, ten years after the restoration of a degraded riparian area (restoration), had recovered in comparison with adjacent forest remnants (forest) and pasture areas. To this end, sampling was carried out using pitfall traps in six plots per vegetation type, and the ants were identified at the morphospecies level. The results indicate that the restoration and forest areas exhibited ant communities with similar diversity values, both being more diverse than the pasture, which showed greater species dominance. In addition, species composition was also similar between the restoration and forest areas, whereas the pasture presented a distinct composition, possibly due to the lower number of species and higher dominance. Therefore, riparian forest restoration allows for the recovery of ant diversity after ten years, possibly contributing to the recovery of ecosystem processes carried out by this important group of edaphic fauna.

**Keywords:** biodiversity; bioindicators; ant community; restoration.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>10</b>
2.1 ÁREA DE ESTUDO.....	10
2.2 COLETA DE DADOS.....	11
2.3 ANÁLISE DE DADOS .....	12
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>14</b>
3.1 COMUNIDADES DE FORMIGAS APÓS 10 ANOS DE RESTAURAÇÃO.....	14
3.2 COMUNIDADES DE FORMIGAS APÓS 5 E 10 ANOS DE RESTAURAÇÃO.....	22
<b>4 CONCLUSÕES.....</b>	<b>25</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>26</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As florestas ripárias, ou matas ciliares, são formações vegetais que se desenvolvem ao longo das margens de rios e corpos d'água, sejam eles naturais ou não. Esses ambientes desempenham um papel de grande valor ecológico, devido à alta heterogeneidade de habitats e à alta diversidade de espécies que abriga, além de contribuir com diversos serviços ecossistêmicos fundamentais (Riis *et al.*, 2020; Shimamoto *et al.*, 2018). Também desempenham um papel de extrema importância na preservação dos corpos hídricos, e fornecem refúgio e alimentos constantes ao longo de todo o ano para a fauna (Ribas *et al.*, 2018). Além disso, no Brasil, são reconhecidas como Áreas de Proteção Permanente (APP) pela Lei 12.651, que visa assegurar sua proteção devido a sua grande importância ecológica.

Segundo o Código Florestal Brasileiro, essas áreas possuem “a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas” (Brasil, 2012). No entanto, apesar da legislação, as florestas ripárias continuam a enfrentar grandes desafios com as atividades antrópicas, como o desmatamento para dar espaço a áreas de agricultura e pastagem (Nickele *et al.*, 2023), podendo comprometer as funções ecológicas desses ecossistemas, resultando na perda de biodiversidade e de seus serviços ecossistêmicos associados (Pestana, 2019; Ribas *et al.*, 2018). Diante disso, a restauração de áreas degradadas torna-se fundamental para recuperar a biodiversidade e o equilíbrio ecológico (Kominoski *et al.*, 2013; Shimamoto *et al.*, 2018).

Diferentes métodos e estratégias são empregados na restauração de áreas perturbadas, visando não apenas promover a recuperação da cobertura do solo nesses ecossistemas, mas também com a finalidade recuperar a diversidade de espécies e suas funções ecológicas (Ribas *et al.*, 2018). Dessa forma, para acompanhar o sucesso da restauração é necessário utilizar parâmetros de monitoramento para além daqueles que são empregados frequentemente, como o crescimento e mortalidade das árvores, biodiversidade e estrutura da vegetação (Teixeira *et al.*, 2020; Williams-Linera *et al.*, 2021). A variedade de organismos que vivem no solo são responsáveis por desempenhar importantes serviços ecossistêmicos, como a decomposição de matéria orgânica, manutenção da estrutura do solo e a ciclagem de nutrientes, garantindo a sustentação do ecossistema (Briones, 2014).

À vista disso, a biota edáfica é importante para garantir a qualidade de um ecossistema. Por esse motivo, o uso de bioindicadores, como os macroinvertebrados de solo, tem sido

bastante utilizado para monitorar a qualidade ecossistêmica, devido à sua sensibilidade a mudanças no ambiente e, portanto, eficiência para indicar perturbações (Rousseau, 2013). Dentro desse grupo, os artrópodes, em especial as formigas, se sobressaem por estarem intimamente ligadas ao ambiente em que habitam, respondendo rapidamente às alterações nas condições ambientais (da Silva *et al.*, 2022; Ribas *et al.*, 2018).

Formicidae é uma família amplamente distribuída geograficamente e possui elevada abundância e riqueza de espécies (de Azevedo *et al.*, 2024). Cerca de 14.274 espécies são conhecidas no mundo (Bolton, 2024), e aproximadamente 1.130 ocorrem em território brasileiro (Feitosa *et al.*, 2022). Essas características concedem a esses invertebrados a possibilidade de explorar diferentes níveis tróficos e estratégias de nidificação (Nickele *et al.*, 2023). Por essa razão, podem fornecer informações importantes sobre os processos ecológicos que ocorrem em áreas em recuperação vegetal para avaliar a qualidade ambiental (Segat *et al.*, 2017).

Nesse sentido, o objetivo desta pesquisa é analisar as mudanças na comunidade de formigas de solo que ocorreram dez anos após a restauração de uma área de floresta estacional semidecídua degradada, com o propósito de avaliar o desenvolvimento da floresta em restauração numa zona ripária. De forma mais específica, busca-se comparar a abundância e espécies desses macroinvertebrados com os remanescentes de florestas (controle) e pastos numa pequena APP localizada na região rural do município de São Carlos para verificar a proximidade entre as áreas em processo de reabilitação e as áreas com vegetação nativa em relação à biodiversidade.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

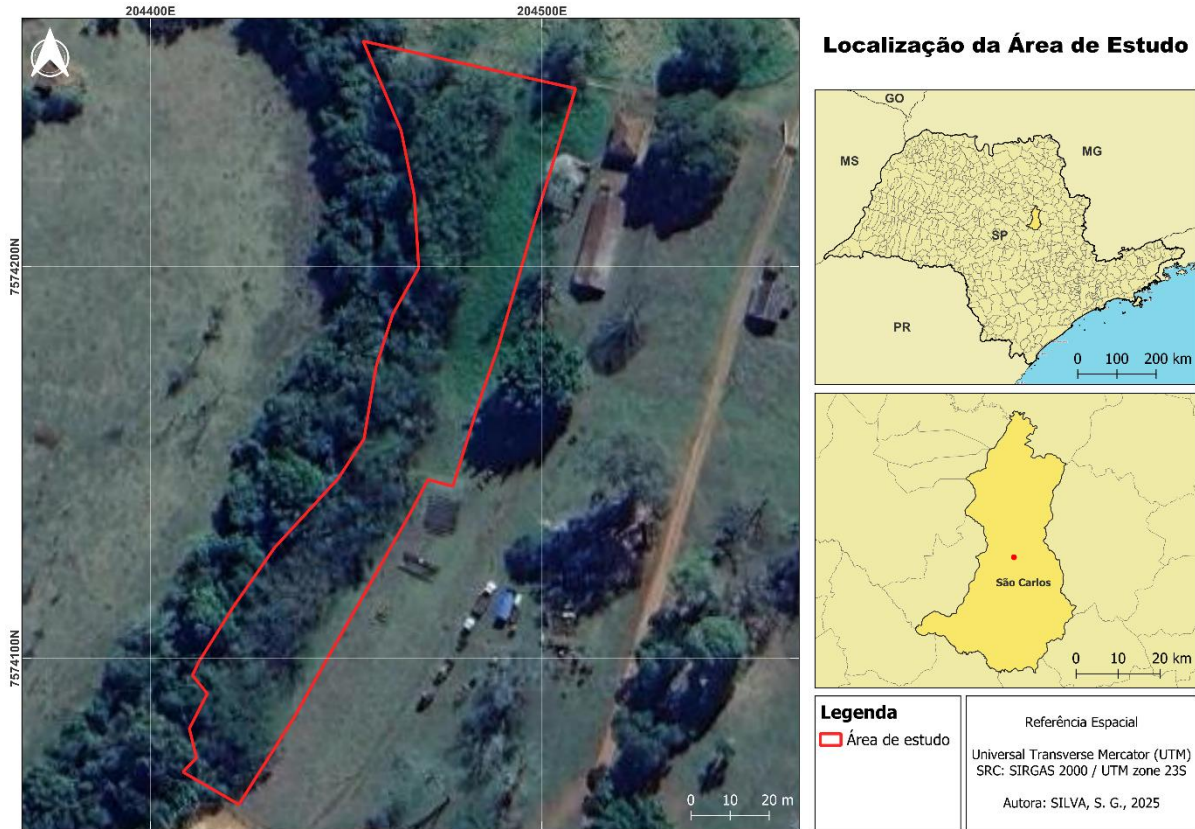
### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se em Água Vermelha, distrito do município de São Carlos, estado de São Paulo. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a área territorial são-carlense é de 1.136,907 km<sup>2</sup> (2024). No último censo, realizado em 2022, o município possuía 254.857 habitantes, com densidade demográfica de 224,17 hab/km<sup>2</sup>, e a estimativa para 2025 é de uma população de 266.427 habitantes.

O clima de São Carlos/SP é classificado como tropical de altitude – Cwa, baseado na classificação de Köppen –, caracterizado por clima quente e inverno seco, com verões chuvosos, nos meses de outubro a março e invernos secos, entre abril e setembro, sendo a precipitação e a temperatura média anual em torno de 1362 mm e 21,5 °C, respectivamente (EMBRAPA, 2025).

De acordo com o Banco de Dados e Informações Ambientais do IBGE (2023), que utiliza informações do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), a região apresenta quatro principais subordens de solo: Latossolo Vermelho (56,84%), Latossolo Vermelho-Amarelo (30,57%), Argissolo Vermelho-Amarelo (6,90%) e Neossolo Flúvico (1,22%). Os demais 4,46% correspondem à malha urbana (4,24%) e aos corpos d'água continental (0,22%). Mais especificamente, a área de estudo está localizada sobre Latossolo, que possuem características como grande profundidade, boa drenagem, textura entre média a fina (argilosa ou muito argilosa) e baixa fertilidade natural (IAC, s.d.).

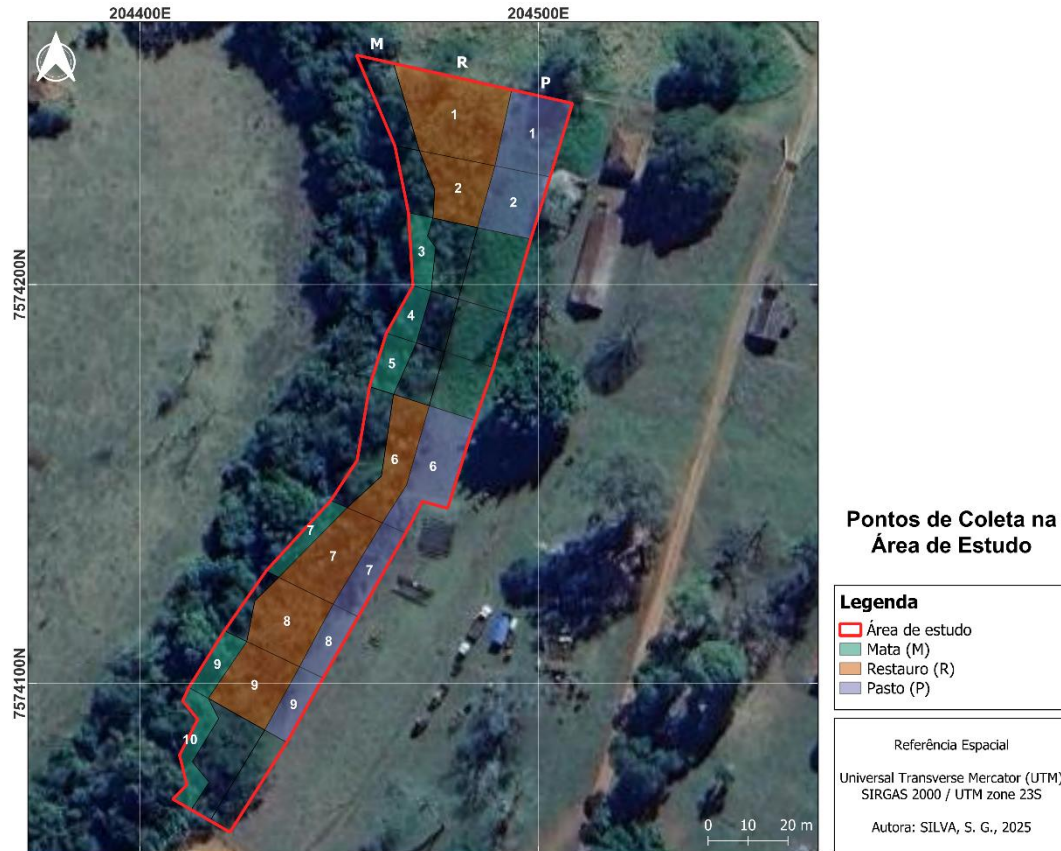
O estudo foi realizado em uma APP localizada dentro de uma pequena propriedade agrícola (Figura 1), onde um experimento de restauração foi conduzido em 2013. A área está situada ao lado do Córrego Engenho Velho e possui um total de 200 metros de comprimento e varia entre 10 a 20 metros de largura. O experimento envolveu o plantio de 577 mudas e 1.154 sementes, por meio de semeadura direta, de nove espécies arbóreas, sendo essas *Cedrela fissilis* Vell., *Pterogyne nitens* Tul., *Cariniana legalis* Kuntze, *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong, *Copaifera langsdorffii*, *Enterolobium timbouva* Mart., *Platypodium elegans* Vogel, *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake e *Hymenaea courbaril* L. (Macera; Pereira; Souza, 2017).



**Figura 1** – Mapa da localização da área de estudo.

## 2.2 COLETA DE DADOS

Para a coleta das formigas, foi utilizada a técnica de armadilhas de queda (*pitfalls*), de acordo com Brown e Matthews (2016). Ao todo, seis parcelas foram amostradas por tipo de manejo de solo (Figura 2), totalizando 53 *pitfalls*: 18 no restauro e pasto, e 17 na mata. Cada parcela recebeu três armadilhas, exceto a parcela M4 (da mata), onde uma das armadilhas foi perdida durante o período de amostragem. Para tal, foram usados potes plásticos transparentes com 10 cm de altura e 9 cm de diâmetro. Os potes foram enterrados ao nível do solo ainda tampados, e as tampas foram removidas após um período de sete dias para minimizar os efeitos de perturbação causados pela implantação. Em seguida, foi adicionada a cada pote uma solução de 100 ml de formol a 4% para conservar os macroinvertebrados. Também foram adicionadas algumas gotas de detergente para quebrar a tensão superficial da água. Por fim, telhados de proteção construídos com pratos de plásticos e espetos de madeira foram instalados acima das armadilhas para impedir que galhos e folhas caíssem dentro dos *pitfalls* e também para evitar o transbordamento do líquido em casos de chuva. As amostragens foram realizadas em dezembro de 2023, durante a estação chuvosa.



**Figura 2** – Mapa da localização das parcelas que foram amostradas (mata, restauro e pasto).

Após uma semana os potes foram recolhidos e levados ao laboratório, onde, com o auxílio de uma peneira de 2 mm, o material coletado foi lavado e separado de galhos, folhas e solo. Os organismos também foram triados, separando as formigas de outros indivíduos presentes no *pitfall*. Em seguida, as formigas foram armazenadas em álcool 70% para sua conservação. Posteriormente, elas foram identificadas até morfoespécie com o auxílio de um microscópio estereoscópico e com base na chave de identificação de gêneros de Feitosa e Dias (2024). O material testemunho foi mantido na coleção do Laboratório de Ecologia Aplicada do DCAm/UFSCar.

### 2.3 ANÁLISE DE DADOS

Para a análise dos dados, foi utilizada a frequência de ocorrência das formigas por parcela. Para tanto, os seguintes indicadores foram calculados para cada parcela: abundância (N), que se refere ao número total de indivíduos presentes; riqueza de espécies (S), que representa o número de espécies encontradas. Também utilizou-se o índice de diversidade de Shannon ( $H'$ ), para mostrar as diferenças de equitatividade e dominância dentro de cada amostra; o índice de dominância de Simpson (D), que mede o grau de dominância dentro dos

grupos; o índice de equitatividade de Pielou ( $J'$ ), para avaliar a equitatividade dentro das comunidades; e a riqueza de espécies estimada (Chao-1), que determina o número máximo de espécies que seria encontrado com o aumento da amostragem, com base na ocorrência de espécies raras (Magurran, 2003).

A fim de comparar os valores médios dos indicadores entre os três tipos de uso do solo foi utilizada Análise de Variância (ANOVA) simples, seguida pelo teste HSD de Tukey de comparações múltiplas para identificar quais grupos apresentavam diferenças entre si. Para analisar a composição em espécies, inicialmente a similaridade entre as amostras foi calculada usando-se o coeficiente de Bray-Curtis. Foi utilizada então uma Análise de Variância Multivariada Permutacional (PERMANOVA) de um fator (Anderson, 2001). As amostras foram posteriormente ordenadas usando-se Análise de Escalonamento Multidimensional (MDS) para verificar quais grupos apresentaram maiores semelhanças.

Com o objetivo de comparar as comunidades de formigas coletadas no presente projeto em 2023 (após 10 anos de restauro) com as comunidades coletadas em 2018 (5 anos após o restauro) tivemos que usar outra estratégia devido a diferenças de amostragem entre anos. Para cada ano, construímos as curvas de rarefação para cada uso do solo baseado no esforço de amostragem por *pitfall* (18 por uso do solo em 2023) ou por parcela (12 por uso do solo em 2018). Foi usada a solução analítica de Mao Tau para determinar o número esperado de espécies em cada esforço amostral e análise dos intervalos de confiança de 95% para avaliar as diferenças entre curvas de rarefação (Colwell *et al.*, 2004). A composição das comunidades entre os três diferentes tipos de uso do solo foi comparada através do índice de similaridade de Jaccard. Todas as análises foram realizadas com o software PAST 4.16 (Hammer *et al.*, 2001).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 COMUNIDADES DE FORMIGAS APÓS 10 ANOS DE RESTAURAÇÃO

Ao todo, foram registradas 1249 formigas, distribuídas em cinco subfamílias, 26 gêneros e 51 morfoespécies (Tabela 1). Os gêneros *Pheidole* Westwood (encontrada em 68% das amostras) e *Atta* Fabricius (encontrada em 79% das amostras) foram os que apresentaram o maior número de ocorrências, representando mais de dois terços da amostra total. Ambos gêneros pertencem à subfamília Myrmicinae, que foi a mais representativa, com 16 gêneros e 28 morfoespécies. Além disso, observou-se pela primeira vez na área de estudo o aparecimento de gêneros como *Apterostigma* Mayr, *Brachymyrmex* Mayr, *Cephalotes* Latreille, *Holcponera* Mayr, *Mycetophylax* Emery, *Neoponera* Emery, *Solenopsis* Westwood, *Strumigenys* Smith, *Tranopelta* Mayr, *Wasmannia* Forel e *Xenomyrmex* Forel.

**Tabela 1** - Abundância de morfoespécies para cada tipo de vegetação

Subfamília	Morfoespécie	Mata	Restauro	Pasto
Dolichoderinae	<i>Dorymyrmex sp.</i>	0	0	51
Ectatomminae	<i>Gnamptogenys sp.1</i>	42	11	9
	<i>Gnamptogenys sp.2</i>	2	0	1
	<i>Holcponera sp.</i>	16	10	0
Formicinae	<i>Brachymyrmex sp.1</i>	2	6	0
	<i>Brachymyrmex sp.2</i>	0	1	0
	<i>Brachymyrmex sp.3</i>	0	8	1
	<i>Brachymyrmex sp.4</i>	0	3	0
	<i>Camponotus sp.1</i>	20	25	1
	<i>Camponotus sp.2</i>	1	1	0
	<i>Camponotus sp.3</i>	1	3	1
	<i>Camponotus sp.4</i>	1	2	0
	<i>Camponotus sp.5</i>	0	1	2
	<i>Camponotus sp.6</i>	1	0	0
Myrmicinae	<i>Acromyrmex sp.1</i>	6	2	0
	<i>Acromyrmex sp.2</i>	3	1	3

Subfamília	Morfoespécie	Mata	Restauro	Pasto
	<i>Acromyrmex sp.3</i>	1	0	0
	<i>Apterostigma sp.</i>	0	1	0
	<i>Atta sp.1</i>	51	272	75
	<i>Atta sp.2</i>	1	1	0
	<i>Cephalotes sp.</i>	1	0	0
	<i>Crematogaster sp.</i>	2	1	2
	<i>Cyphomyrmex sp.</i>	10	2	1
	<i>Mycetomoellerius sp.</i>	3	9	0
	<i>Mycetophylax sp.</i>	0	1	1
	<i>Mycocepurus sp.1</i>	0	2	2
	<i>Mycocepurus sp.2</i>	1	1	0
	<i>Pheidole sp.1</i>	10	147	55
	<i>Pheidole sp.2</i>	13	41	2
	<i>Pheidole sp.3</i>	16	3	8
	<i>Pheidole sp.4</i>	3	4	0
	<i>Pheidole sp.5</i>	74	27	21
	<i>Pheidole sp.6</i>	3	4	3
	<i>Pheidole sp.7</i>	28	6	0
	<i>Pheidole sp.8</i>	0	2	0
	<i>Solenopsis sp.1</i>	8	3	1
	<i>Solenopsis sp.2</i>	4	2	0
	<i>Solenopsis sp.3</i>	2	1	0
	<i>Strumigenys sp.</i>	0	2	0
	<i>Tranopelta sp.</i>	0	2	0
	<i>Wasmannia sp.</i>	1	2	0
	<i>Xenomyrmex sp.</i>	2	2	0
Ponerinae	<i>Anochetus sp.</i>	1	5	1
	<i>Hypoponera sp.1</i>	3	0	1
	<i>Hypoponera sp.2</i>	1	1	0

Subfamília	Morfoespécie	Mata	Restauro	Pasto
	<i>Hypoponera sp.3</i>	0	0	1
	<i>Neoponera sp.1</i>	1	1	13
	<i>Neoponera sp.2</i>	9	2	1
	<i>Odontomachus sp.</i>	3	5	14
Pseudomyrmecinae	<i>Pseudomyrmex sp.1</i>	2	2	0
	<i>Pseudomyrmex sp.2</i>	0	1	0
	Abundância total	349	629	271

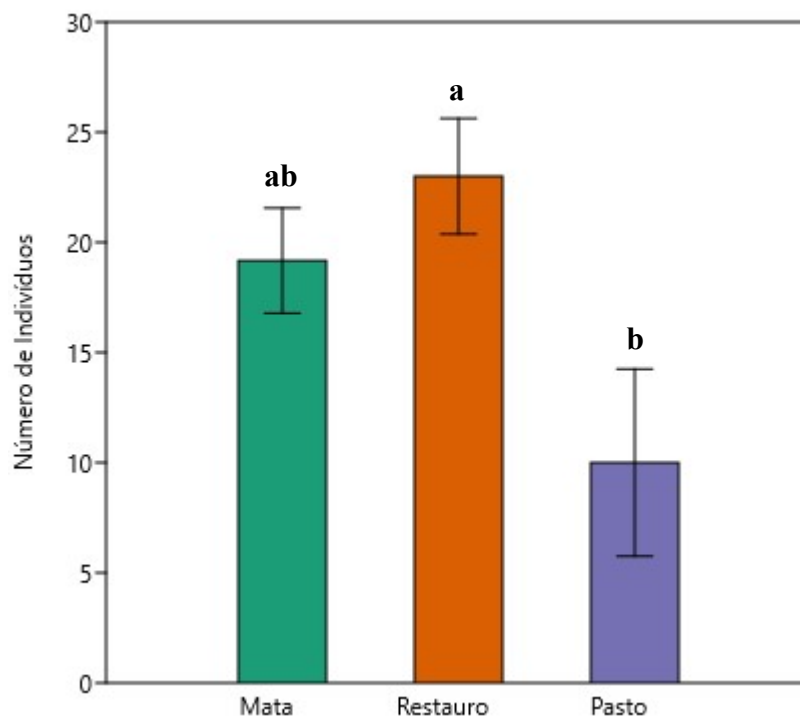
A subfamília Myrmicinae é a mais rica em espécies e gêneros dentro da família Formicidae (Baccaro *et al.*, 2015), abrangendo 6 tribos, cerca de 147 gêneros vivos e 7.193 espécies (Bolton, 2024). O Brasil é um dos países mais biodiversos, abrigando aproximadamente 31% dos gêneros reconhecidos no mundo, e é o segundo mais diverso em relação às espécies de formigas, com 60 gêneros e cerca de 650 espécies pertencentes à Myrmicinae (Baccaro *et al.*, 2015). A subfamília Myrmicinae ocupa uma diversidade de habitats muito grande (Fernández, 2003) e seus hábitos de nidificação, reprodução e alimentação são muito variados (Fernández; Serna, 2019). Sendo assim, o elevado número de táxons encontrados para Myrmicinae em relação às demais subfamílias pode ser atribuído à sua alta capacidade de adaptação a diferentes condições ambientais, diversidade taxonômica e ampla distribuição geográfica.

Como mencionado anteriormente, dentre os gêneros de Myrmicinae coletados, *Pheidole*, foi a mais abundante, o que comprova sua adaptabilidade em ocupar uma ampla variedade de ambientes e ecossistemas (Baccaro *et al.*, 2015). Devido à sua hiperdiversidade e abundância, são ecologicamente muito importantes, destacando-se por sua capacidade em dispersão de sementes e controle de outros artrópodes (Baccaro *et al.*, 2015). Por serem insetos generalistas e oportunistas (Silvestre; Silva, 2001), a sua notável presença pode estar associada ao fato do seu rápido estabelecimento em ambientes tanto degradados como em recuperação.

O gênero *Atta*, popularmente conhecido como saúva ou tanajura, foi o segundo mais numeroso, com 400 indivíduos coletados. Essas formigas pertencem ao grupo das attíneas (ou subtribo Attina), que é endêmica da região neotropical (Fernández, 2003). Conhecidas também como formigas-cortadeiras, elas possuem relação mutualística com fungos, cultivando-os em

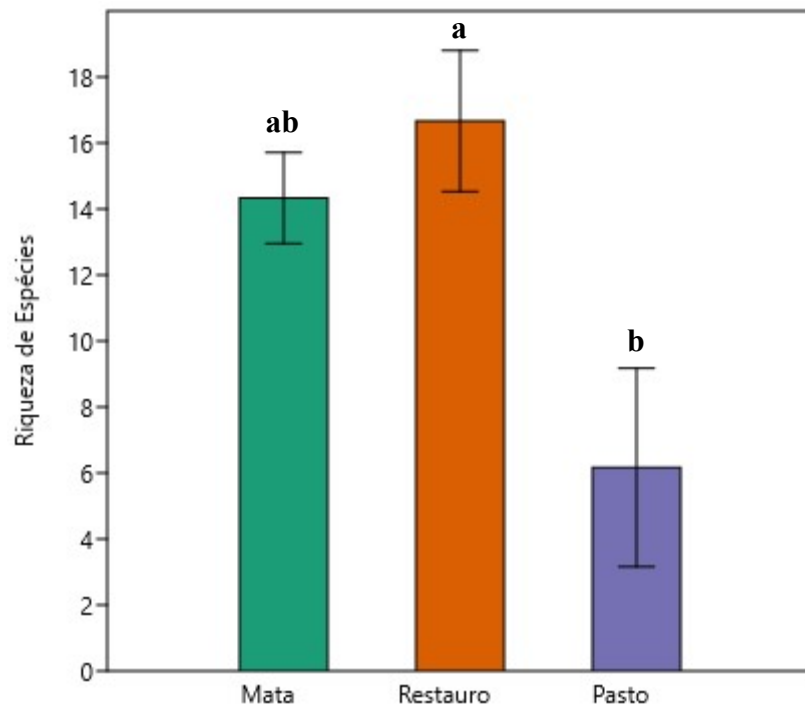
seus ninhos para alimentar suas larvas (Fernández, 2003; Baccaro *et al.*, 2015). Esse comportamento concede a elas o título de pragas agrícolas, pois para manterem a associação com o fungo simbiote necessitam de grandes quantidades de material vegetal fresco, o que muitas vezes pode acabar com plantações. Por outro lado, são reconhecidas como engenheiras de ecossistemas, uma vez que “a presença das cortadeiras pode trazer impactos positivos sobre a estrutura química e física do solo, ajudando na aeração e ciclagem de nutrientes” (Baccaro *et al.*, 2015, p. 213), podendo beneficiar áreas em restauro, visto que sua presença contribui para o crescimento da vegetação.

Em relação à abundância da mirmecofauna, os resultados mostraram variação significativa entre os diferentes usos de solo ( $F_{2,15} = 4,37, P = 0,032$ ), com os maiores valores na área de restauro, seguida pela mata e, por último, pelo pasto, conforme os resultados apresentados pelo teste de Tukey (Figura 3).

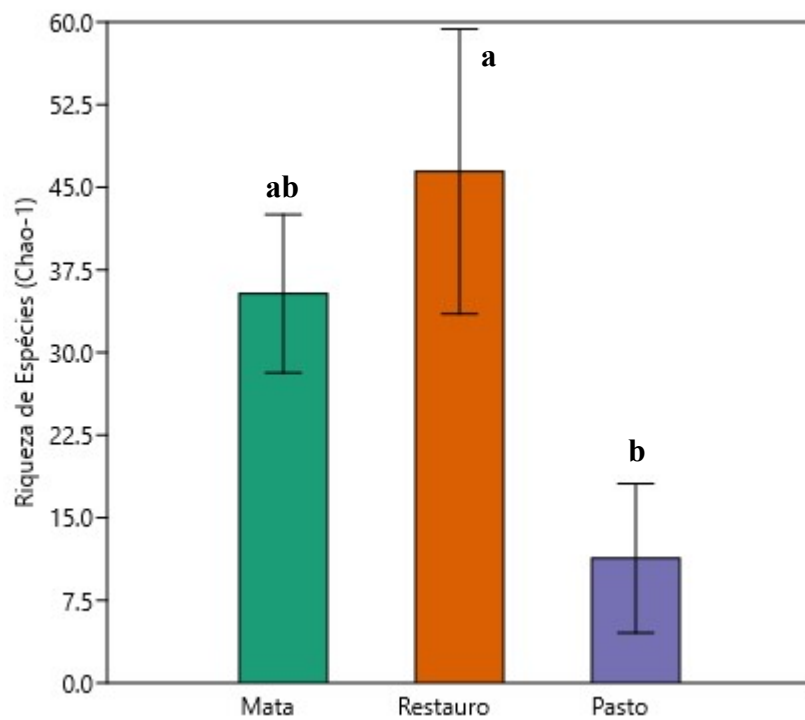


**Figura 3** - Abundância média de formigas ( $\pm$  erro padrão). Letras iguais representam diferenças não-significativas conforme o teste de Tukey ( $P > 0,05$ ).

O mesmo padrão foi encontrado para a riqueza de espécies ( $F_{2,15} = 5,88, P = 0,013$ ) e o estimador de Chao-1 ( $F_{2,15} = 3,65, P = 0,051$ ), com maior riqueza de espécies encontrada no restauro, intermediária na mata e menor riqueza no pasto (Figura 4 e 5), de acordo com o teste de Tukey.

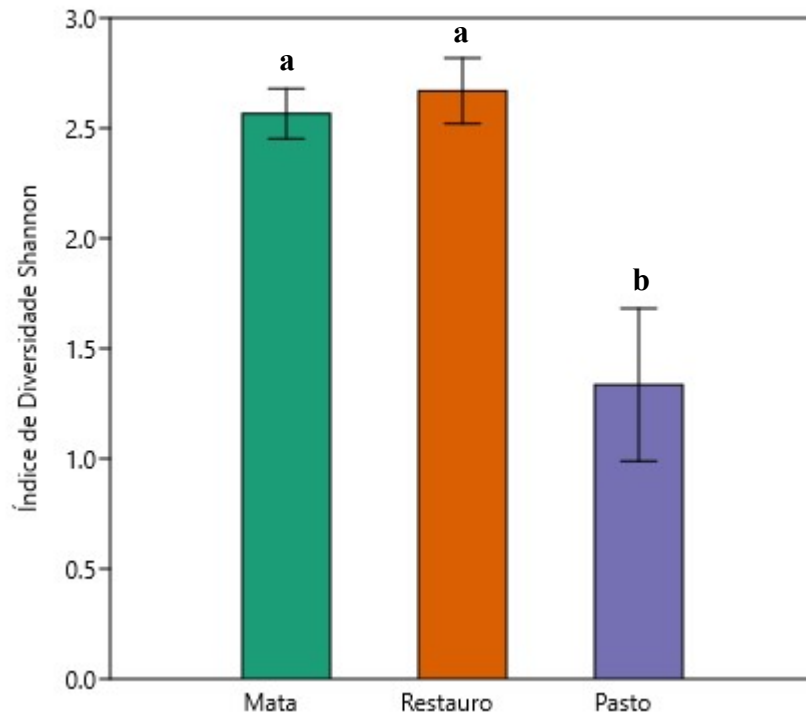


**Figura 4** - Riqueza média de espécies observada ( $\pm$  erro padrão). Letras iguais representam diferenças não-significativas conforme o teste de Tukey ( $P > 0,05$ ).



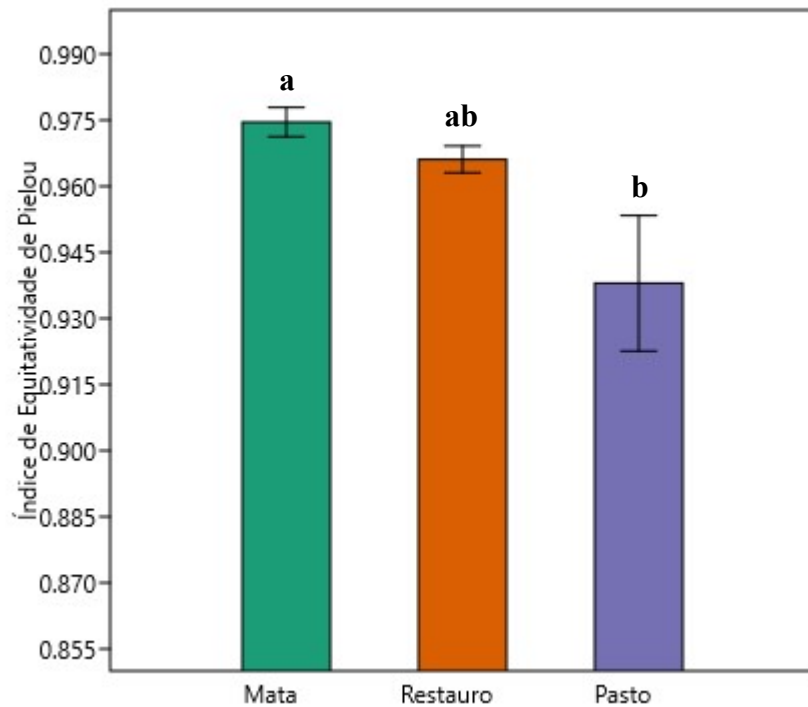
**Figura 5** - Riqueza média de espécies de acordo com o estimador Chao-1 ( $\pm$  erro padrão). Letras iguais representam diferenças não-significativas conforme o teste de Tukey ( $P > 0,05$ ).

Ao se considerar a abundância relativa, o índice de diversidade de Shannon demonstrou que a comunidade de formigas é mais diversa para o restauro e mata, em comparação com o pasto ( $F_{2,15} = 10,6$ ,  $P = 0,001$ ), de acordo com o teste de Tukey (Figura 6).

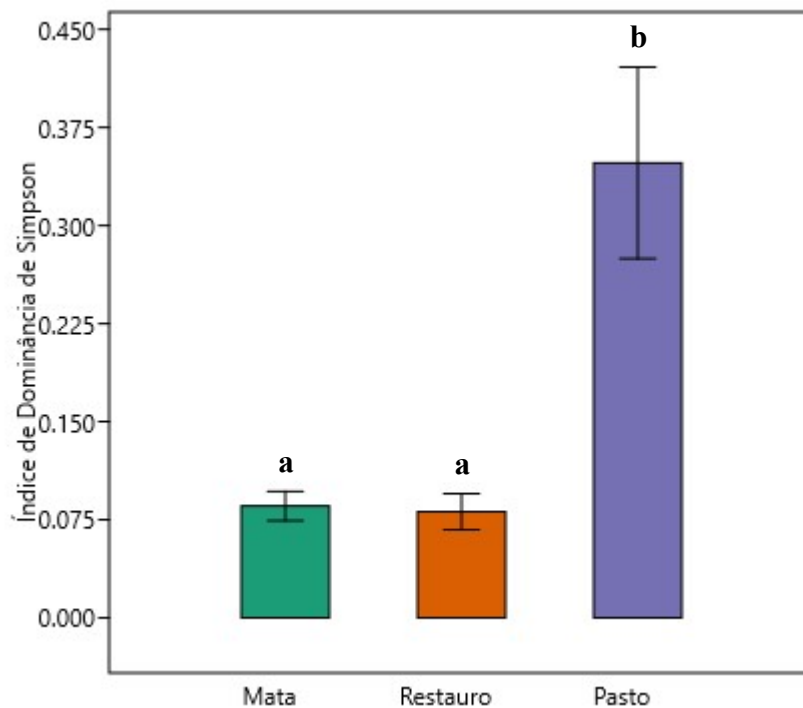


**Figura 6** - Diversidade média ( $\pm$  erro padrão) na comunidade de formigas de acordo com o Índice de Diversidade de Shannon. Letras iguais representam diferenças não-significativas conforme o teste de Tukey ( $P > 0,05$ ).

Quanto ao Índice de Equitatividade de Pielou, as três comunidades apresentaram valores próximos a um, ou seja, alta equitatividade (Figura 7). Com a ANOVA rejeitou-se a hipótese de que não havia diferença significativa entre as médias dos grupos ( $F_{2,15} = 4,23$ ,  $P = 0,035$ ) e, a partir do teste de Tukey constatou-se que as diferenças significativas eram entre mata e pasto, com valores intermediários no restauro. Ainda, mesmo que o pasto tenha apresentado uma equitatividade relativamente alta, em relação ao índice de dominância de Simpson, esse apresentou maior dominância de espécies em relação às demais comunidades ( $F_{2,15} = 12,2$ ,  $P = 0,001$ ) (Figura 8), em outras palavras, poucas espécies são muito abundantes nesse tipo de vegetação em comparação com os outros usos de solo, conforme o teste de Tukey.



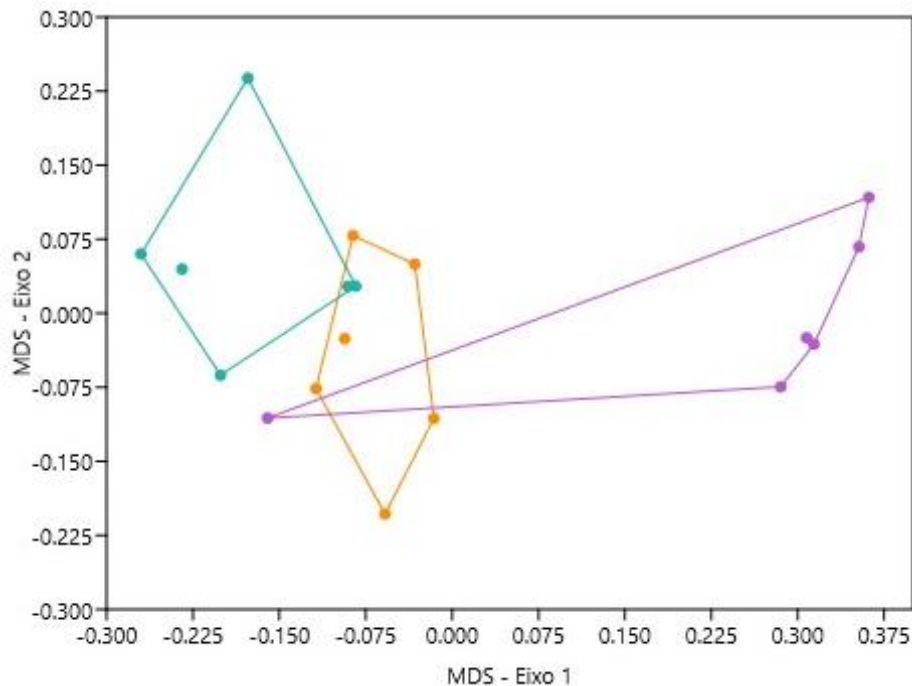
**Figura 7** - Índice de Equitatividade de Pielou. Os valores indicam as médias ( $\pm$  erro padrão). Letras iguais representam diferenças não-significativas conforme o teste de Tukey ( $P > 0,05$ )



**Figura 8** - Índice de Dominância de Simpson. Os valores indicam as médias ( $\pm$  erro padrão). Letras iguais representam diferenças não-significativas conforme o teste de Tukey ( $P > 0,05$ ).

As diferenças na estrutura das comunidades refletiram-se também na composição de espécies. O modelo PERMANOVA indicou diferenças significativas na composição das comunidades de formigas entre os grupos (Pseudo- $F_{2,15} = 4,24$ ,  $P < 0,001$ ), com diferenças

entre restauro e pasto ( $P = 0,012$ ), e mata e pasto ( $P = 0,004$ ), enquanto o restauro e mata apresentaram composições similares ( $P = 0,150$ ). A ordenação pelo MDS (Figura 9) indica forte separação das amostras do pasto em relação às amostras do restauro e da mata, indicando que as comunidades de formigas desses dois tipos de vegetação compartilham mais características em comum do que com o pasto, com exceção da amostra P1.



**Figura 9** - Ordenação das amostras da mata (símbolos azuis), restauro (símbolos laranja) e pasto (símbolos roxos) por Análise de Escalonamento Multidimensional (MDS) a partir da matriz de similaridade de Bray-Curtis. Stress = 0,167.

Os resultados encontrados sugerem que os diferentes tipos de vegetação têm influência sobre a comunidade de formigas edáficas e na composição de suas espécies. Os índices de diversidade de Shannon, diversidade de Simpson e equitatividade de Pielou podem ser visualizados no anexo A para cada sítio. A abundância, riqueza observada e riqueza estimada variaram entre os três ambientes, indicando que vegetações com características distintas apresentam, conseqüentemente, diferentes estruturas e composições de comunidades. Os maiores valores desses três índices foram encontrados tanto no restauro quanto nas florestas de referência, sugerindo que a recuperação da estrutura florestal da área restaurada pode ter resultado em ecossistemas similares ao de florestas maduras, com maior biodiversidade por conta da presença de árvores grandes e um dossel bem desenvolvido, o que influencia não apenas na variedade de recursos, mas também no microclima, criando condições favoráveis para a vida de diversas espécies (Barretto; Catharino, 2015).

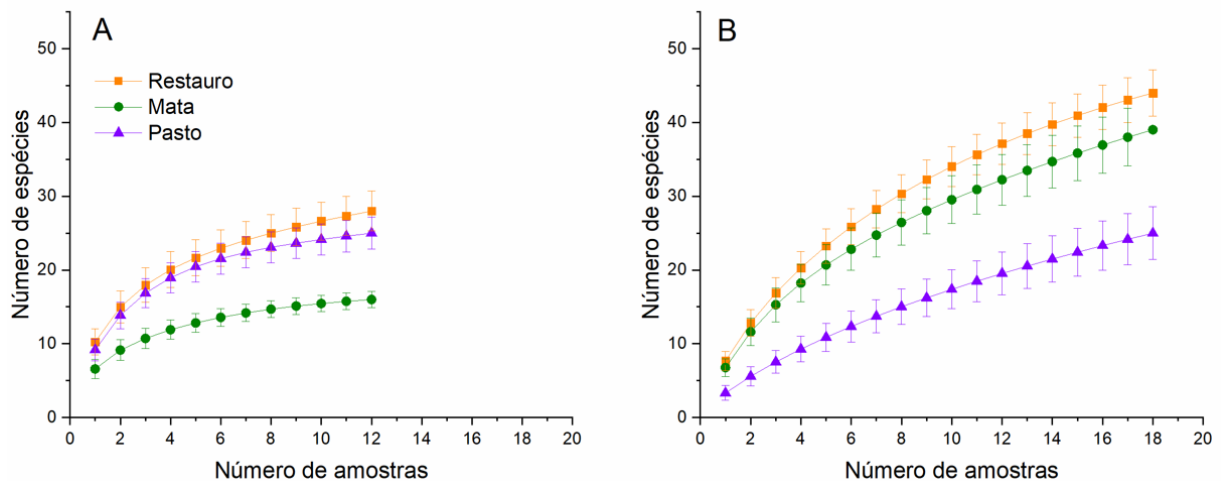
Dunn (2004) estimou que a recuperação da diversidade da mirmecofauna em florestas tropicais pode levar de 20 a 40 anos para se consolidar totalmente, enquanto Bihn *et al.* (2008) extrapola esses dados para 50 a centenas de anos. Contudo, Bihn *et al.* (2008) também discute a importância de se levar em conta o histórico do uso e ocupação do solo anterior ao restauro, havendo diferenças no estabelecimento de formigas em áreas menos perturbadas e extremamente exploradas, sendo mais lento nesta última. Os nossos resultados indicam que a recuperação da diversidade de formigas pode ser bem mais rápida, em até 10 anos, ao menos na escala espacial estudada.

Os valores mais altos do restauro podem ter sido influenciados pela alta abundância de formigas dos gêneros *Atta* e *Pheidole* encontradas nesse ambiente, os três tipos de vegetação somam 870 desses indivíduos, sendo 507 apenas do restauro, representando 58% da amostra. A heterogeneidade arbórea e a presença de variados microhabitats nessa vegetação, devido à alta quantidade de gramíneas e, principalmente, serapilheira, provavelmente proporciona maior diversidade de alimentos e locais de nidificação, ocasionando a abundante presença desses gêneros na área em recuperação (Queiroz; Ribas; França, 2013; Ribas *et al.*, 2003). Ademais, o desenvolvimento da vegetação da área restaurada permitiu o estabelecimento de novas morfoespécies, isto é possível tendo em vista que quanto mais heterogêneo e complexo um habitat, maior a diversidade de formigas na escala da paisagem, levando aos altos níveis de riqueza da mirmecofauna nesse ambiente (Pacheco; Vasconcelos, 2012). Outros estudos (e.g., Pacheco; Vasconcelos, 2012; Vasconcelos *et al.*, 2023; Ribas *et al.*, 2003) também encontraram maior número de espécies de formigas em áreas mais heterogêneas. Do mesmo modo, de acordo com a hipótese de heterogeneidade do habitat (Tews *et al.*, 2004), ambientes mais homogêneos podem ter redução em relação à diversidade, e ser caracterizado pela dominância por poucas espécies, como no caso da área de pasto, que apresentou nível mais alto em relação aos outros tipos de vegetação. Sendo assim, esses fatores levaram a uma aproximação na composição da mirmecofauna entre restauro e mata, visto que a regeneração vegetal e suas funções ecológicas possibilitaram que essas duas áreas apresentassem menores dissimilaridades em relação a estrutura da vegetação, expandindo as condições para forrageamento e nidificação das formigas na área.

### 3.2 COMUNIDADES DE FORMIGAS APÓS 5 E 10 ANOS DE RESTAURAÇÃO

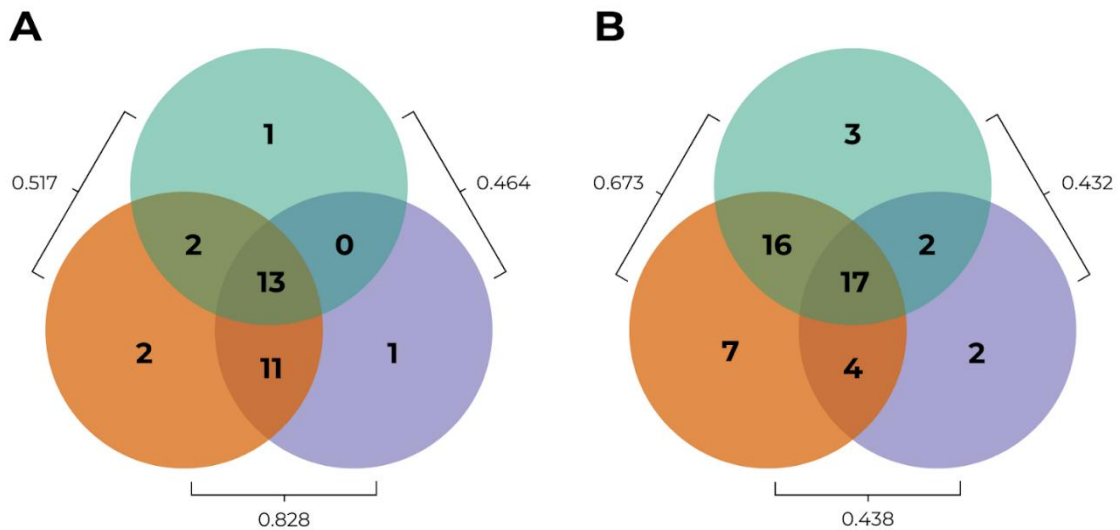
As curvas de rarefação para o período de 2018 (Figura 10.A) indicam que o restauro e pasto, respectivamente, apresentaram os maiores números de espécies em relação à mata, com

estabilização em torno de 28 e 25 espécies. Dessa forma, a mata exibiu o menor número, estabilizando por volta de 16 espécies. Quanto ao ano de 2023 (Figura 10.B), a área de restauro continuou manifestando os valores mais elevados de número de espécies, com cerca de 45. No entanto, agora seguida da mata, que apresentou um aumento, agora com aproximadamente 39, refletindo melhorias após cinco anos. O pasto, por outro lado, não demonstrou alterações relevantes no número de espécies.



**Figura 10** - Riqueza estimada de espécies por rarefação para os anos de 2018 (A) e de 2023 (B). As barras indicam uma unidade de erro padrão.

Sendo assim, por meio do diagrama de Venn (Figura 11), pode-se observar que, para o ano de 2018 (Figura 11.A), das 30 espécies encontradas, aproximadamente 43% eram comuns para os três ambientes. O restauro e a mata compartilhavam 7% das espécies, enquanto o restauro e o pasto possuíam 37% em comum. Já entre a mata e pasto, não havia espécies compartilhadas. No restauro, 7% das espécies ocorriam apenas nesse ambiente, e tanto a mata quanto o pasto apresentavam 3% cada. Quanto ao ano de 2023 (Figura 11.B), das 51 morfoespécies coletadas, cerca de um terço (33%) são compartilhadas entre os três tipos de vegetação. Além disso, o restauro e a mata possuem em comum 31% das espécies, o restauro e o pasto 8%, e a mata e o pasto 4%. Ainda, 14% ocorrem exclusivamente no restauro, 6% na mata e 4% no pasto.



**Figura 11** – Diagrama de Venn ilustrando as espécies compartilhadas entre os três tipos de vegetação (pasto = roxo, restauro = laranja, mata = verde) após 5 e 10 anos (A e B, respectivamente) e o índice de similaridade de Jaccard comparando a proporção de espécies entre os tipos de vegetação.

À vista disso, percebe-se que, de 2018 para 2023, houve um aumento de 70% da mirmecofauna encontrada no local de estudo. A mata e o pasto passaram de zero a duas morfoespécies compartilhadas, sendo essas *Gnamptogenys* e *Hypoponera*. Esse crescimento também pode ser observado para a quantidade de formigas em comum entre restauro e mata, demonstrando maior similaridade entre as comunidades de formigas dessas vegetações, o que indica uma melhora nas condições ambientais da área restaurada, assemelhando-se ao remanescente florestal. Do mesmo modo, isso pode ser notado por conta da diminuição de morfoespécies compartilhadas entre restauro e pasto, evidenciando menores semelhanças entre os dois e corroborando com a hipótese de que, após 10 anos do restauro, as comunidades de formigas dessa vegetação tendem a se tornarem mais parecidas com as da área controle.

Nesse cenário, a trajetória sucessional do restauro tornou possível maiores similaridades com o ecossistema de referência, apresentando maior sobreposição da mirmecofauna quando comparado ao estudo anterior, pois o restauro e mata agora apresentam menores diferenças na estrutura florestal (Pacheco; Vasconcelos, 2012). Além do mais, ambientes mais simplificados, onde não há vegetação arbórea e, conseqüentemente, não há um dossel fechado e serapilheira, faz com que haja maior incidência solar e, dessa forma, cria-se condições mais extremas, podendo levar a restrição de algumas comunidades de formigas no pasto, pois esses fatores são decisivos para as mudanças na composição dessas (da Silva *et al.*, 2022).

## 4 CONCLUSÕES

Este estudo teve como principal objetivo avaliar se a composição e estrutura das comunidades de formigas edáficas em uma área de restauro, após 10 anos, tendem a se assemelhar aos remanescentes florestais. Os resultados, em comparação com os dados de 2018, demonstram uma alteração na diversidade e composição de espécies na área de estudo, indicando que as comunidades da área restaurada está se tornando mais semelhante às comunidades do remanescente florestal, de tal forma que o desenvolvimento da vegetação influencia não somente a estrutura florestal, mas também as suas comunidades biológicas (Lohbeck *et al.*, 2012; Norden *et al.*, 2015; Batisteli; Tanaka; Souza, 2018). Portanto, como a mirmecofauna do restauro tornou-se mais parecida com as comunidades de formigas da área controle, estes resultados sugerem um avanço na trajetória sucessional. Esses resultados reafirmam a hipótese de que quanto mais heterogêneo o habitat, maior a diversidade de espécies, uma vez que oferecem maior disponibilidade e possibilidades de explorar os recursos existentes (Pacheco; Vasconcelos, 2012).

Nesse contexto, é evidente a importância de esforços para recuperar áreas degradadas, uma vez que nossos resultados mostram que a restauração é uma estratégia eficaz para mitigar a perda de biodiversidade causada pelos impactos negativos das ações antrópicas no uso e ocupação do solo. Ademais, destaca a relevância de utilizar parâmetros de monitoramento além dos convencionais como a vegetação, uma vez que comunidades animais de solo como a mirmecofauna podem responder ao desenvolvimento da trajetória sucessional de locais em restauração, pois os macroinvertebrados estão diretamente ligados à recuperação de ecossistemas e funções associadas. Dessa forma, o uso de formigas pode ser útil no processo de avaliar a qualidade do ecossistema e também auxiliar no processo de análises do sucesso da restauração, contribuindo para tomadas de decisões.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, M. J. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. **Austral ecology**, v. 26, n. 1, p. 32-46, 2001.
- BATISTELI, A. F.; TANAKA, M. O.; SOUZA, A. L. T. Bird functional traits respond to forest structure in riparian areas undergoing active restoration. **Diversity**, v. 10, n. 3, p. 90, 2018.
- BACCARO, F. B. et al. **Guia Para os Gêneros de Formigas do Brasil**. 2015.
- BARRETTO, E. H. P.; CATHARINO, E. L. M.. Florestas maduras da região metropolitana de São Paulo: diversidade, composição arbórea e variação florística ao longo de um gradiente litoral-interior, Estado de São Paulo, Brasil. **Hoehnea**, v. 42, n. 3, p. 445–469, jul. 2015.
- BIHN, J. H. et al. Do secondary forests act as refuges for old growth forest animals? Recovery of ant diversity in the Atlantic forest of Brazil. **Biological conservation**, v. 141, n. 3, p. 733-743, 2008.
- BOLTON, B. AntCat. An online catalog of the ants of the world, 2024. Disponível em: <<http://antcat.org>>. Acesso em: 24 set. 2024.
- BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, nº 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e nº 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 25 maio 2012.
- BRIONES, M. J. I. Soil fauna and soil functions: a jigsaw puzzle. **Frontiers in Environmental Science**, v. 2, p. 7, 2014
- BROWN, G. R.; MATTHEWS, I. 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**, v. 6, n. 12, p. 3953-3964, 2016.
- COLWELL, Robert K.; MAO, Chang Xuan; CHANG, Jing. Interpolating, extrapolating, and comparing incidence-based species accumulation curves. **Ecology**, v. 85, n. 10, p. 2717-2727, 2004.
- DA SILVA, W. B. et al. Effectiveness of ant communities to detect anthropogenic disturbance in Neotropical forest landscapes: a case study in the Brazilian Amazon. **Biodiversity and Conservation**, v. 31, n. 1, p. 211-226, 2022.
- DE AZEVEDO, F. et al. Diversidade de formigas epígeas em cultivo orgânico e convencional de *Citrus sinensis* na região noroeste do Paraná, Brasil. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 19, n. 1, p. 38-52, 2024.
- DUNN, R. R. Recovery of faunal communities during tropical forest regeneration. **Conservation Biology**, v. 18, n. 2, p. 302-309, 2004.

EMBRAPA. **Caracterização meteorológica – Embrapa Pecuária Sudeste**. Disponível em: <<https://www.cppse.embrapa.br/meteorologia/index.php?pg=caracterizacao>>. Acesso em: 12 nov. 2025.

FEITOSA, R. M.; DIAS, A. M. An illustrated guide for the identification of ant subfamilies and genera in Brazil. **Insect Systematics & Evolution**, v. 1, n. aop, p. 1-121, 2024. Chave de identificação para subfamílias e gêneros de formigas do Brasil (PT-BR)

FEITOSA, R. M. et al. Ants of Brazil: an overview based on 50 years of diversity studies. **Systematics and Biodiversity**, v. 20, n. 1, p. 1-27, 2022.

FERNÁNDEZ, F. Subfamilia Myrmicinae. Capítulo 22. Pp. 307-330 in: Fernández, F. (Ed) **Introducción a las Hormigas de la región Neotropical**. Bogotá, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 2003.

FERNÁNDEZ, F.; SERNA, F. J. Subfamilia Myrmicinae. Capítulo 27. Pp. 791-888 in: Fernández, F.; Guerrero, R. J.; Delsinne, T. (eds.) 2019d. **Hormigas de Colombia**. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1198 pp, 2019.

HAMMER, Ø., HARPER, D.A.T., and P. D. Ryan, 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. **Palaeontologia Electronica** 4(1): 9pp.

IAC – Instituto Agrônomo de Campinas. **Latossolos**. Disponível em: <<https://solossp.iac.gov.br/>>. Acesso em: 12 nov. 2025.

IBGE. **Banco de Dados de Informações Ambientais (BDIA)**. Disponível em: <<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>>. Acesso em: 12 nov. 2025.

IBGE. **São Carlos (SP)**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-carlos.html>>. Acesso em: 12 nov. 2025.

LOHBECK, Madelon et al. Functional diversity changes during tropical forest succession. **Perspectives in plant ecology, evolution and systematics**, v. 14, n. 2, p. 89-96, 2012, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1433831911000679>.

MACERA, L. G.; PEREIRA, S. R.; SOUZA, A. L. T. de. Survival and growth of tree seedlings as a function of seed size in a gallery forest under restoration. **Acta Botanica Brasilica**, v. 31, n. 4, p. 539-545, 2017.

NICKELE, M. A. et al. Assessing forest restoration effectiveness in the Seasonal Semideciduous Forest in the Upper Paraná Atlantic Forest ecoregion using epigaeic ant assemblages. **Journal of Tropical Ecology**, v. 39, p. e37, 2023.

NORDEN, Natalia et al. Successional dynamics in Neotropical forests are as uncertain as they are predictable. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 112, n. 26, p. 8013-8018, 2015. <http://www.pnas.org/lookup/doi/10.1073/pnas.1500403112>.

PACHECO, Renata; VASCONCELOS, Heraldo L. Habitat diversity enhances ant diversity in a naturally heterogeneous Brazilian landscape. **Biodiversity and Conservation**, v. 21, p. 797-809, 2012.

PESTANA, Luís Fernando de Abreu. **Comunidades de macroinvertebrados de solo respondem à restauração e à fertilidade do solo de florestas ripárias?**. 2019.

QUEIROZ, A. C. M. de; RIBAS, C. R.; FRANÇA, F. M. Microhabitat Characteristics That Regulate Ant Richness Patterns: The Importance of Leaf Litter for Epigaeic Ants. **Sociobiology**, Feira de Santana, Brazil, v. 60, n. 4, p. 367–373, 2013.

RIBAS, C. R. et al. **Cartilha para avaliação de impactos ambientais e reabilitação de áreas degradadas baseada em comunidade de formigas e suas interações com plantas**. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

RIBAS, C. R. et al. Tree heterogeneity, resource availability, and larger scale processes regulating arboreal ant species richness. **Austral Ecology**, v. 28, n. 3, p. 305-314, 2003.

RIIS, T. et al. Global overview of ecosystem services provided by riparian vegetation. **BioScience**, v. 70, n. 6, p. 501-514, 2020.

SEGAT, Julia Corá et al. Ants as indicators of soil quality in an on-going recovery of riparian forests. **Forest Ecology and Management**, v. 404, p. 338-343, 2017.

SILVESTRE, R.; SILVA, R. R. Guildas de formigas da Estação Ecológica Jataí, Luis Antônio - SP - sugestões para aplicação de guildas como bioindicadores ambientais. **Biotemas**, v. 1, n. 14, p. 3769, 2001.

TEIXEIRA, H. M. et al. Linking vegetation and soil functions during secondary forest succession in the Atlantic forest. **Forest Ecology and Management**, v. 457, p. 117696, 2020.

TEWS, Jörg et al. Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the importance of keystone structures. **Journal of biogeography**, v. 31, n. 1, p. 79-92, 2004.

VASCONCELOS, H. L. et al. The Ground-Dwelling ant Fauna from a Cerrado Reserve in Southeastern Brazil: Vegetation Heterogeneity as a promoter of ant diversity. **Neotropical Entomology**, v. 52, n. 1, p. 36-45, 2023.

WILLIAMS-LINERA, Guadalupe et al. Litterfall, vegetation structure and tree composition as indicators of functional recovery in passive and active tropical cloud forest restoration. **Forest Ecology and Management**, v. 493, p. 119260, 2021.

**ANEXO A - Valores dos índices de diversidade obtidos por parcela**

<b>Parcela</b>	<b>Diversidade de Shannon</b>	<b>Dominância de Simpson</b>	<b>Equitatividade J Pielou</b>
M3	2.61	0.08	0.96
M4	2.59	0.08	0.98
M5	2.81	0.07	0.97
M7	2.03	0.14	0.97
M9	2.63	0.08	0.97
M10	2.74	0.07	0.99
R1	3.03	0.06	0.97
R2	1.99	0.15	0.96
R6	2.67	0.08	0.96
R7	2.65	0.07	0.98
R8	2.95	0.06	0.97
R9	2.73	0.07	0.96
P1	2.94	0.06	0.96
P2	0.69	0.50	1.00
P6	0.64	0.56	0.92
P7	1.24	0.33	0.90
P8	1.49	0.25	0.93
P9	1.01	0.39	0.92

M = Mata, R = Restauo, P = Pasto