

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Alterações da macrofauna do solo induzidas pela expansão de cultivo de  
cana-de-açúcar sobre áreas de pastagem extensiva**

**Beatriz da Silva Vanolli**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra  
em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de  
Plantas

**Piracicaba  
2021**

**Beatriz da Silva Vanolli**  
**Engenheira Agrônoma**

**Alterações da macrofauna do solo induzidas pela expansão de cultivo de cana-de-açúcar sobre áreas de pastagem extensiva**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011.

Orientador:  
Prof. Dr. **MAURÍCIO ROBERTO CHERUBIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

**Piracicaba**  
**2021**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Vanolli, Beatriz da Silva

Alterações da macrofauna do solo induzidas pela expansão de cultivo de cana-de-açúcar sobre áreas de pastagem extensiva / Beatriz da Silva Vanolli. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2021.

60 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Mudança de uso da terra 2. Qualidade do solo 3. Fauna do solo. 4. Biodiversidade I. Título

## DEDICATÓRIA

*Dedico essa dissertação de mestrado aos meus avós  
Elvira Valecki e Cipriano Carneiro, grandes  
trabalhadores, exemplos de caráter e dignidade, que  
nunca deixaram faltar estudo para seus filhos e  
netos.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (USP-ESALQ) e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas por fornecer a oportunidade de obter meu mestrado em ciências.

Meu orientador prof. Dr. Maurício Roberto Cherubin por permitir que eu faça parte de sua equipe de pesquisa. Obrigado por me ensinar, apoiar e encorajar a crescer a cada dia. Por acreditar no meu potencial e confiar em todas minhas decisões, pelo companheirismo e apoio em todos os momentos de dúvidas, incertezas e conquistas. Você é uma inspiração para mim como cientista, professor e pessoa.

Além disso, quero agradecer ao prof. Dr. André Luiz Custódio Franco pela disposição e paciência em me ajudar na introdução de modelos estatísticos do projeto de mestrado.

Aos colegas do Soil Health & Management Research Group – SOHMA pela ajuda, amizade, e por proporcionarem nosso ambiente produtivo e de harmonia. Agradecimento em especial ao meu colega Victor Maciel, por me acompanhar nas coletas a campo e identificação dos organismos, e minha colega Bruna pelo auxílio na elaboração de imagens que compõem essa dissertação.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo apoio ao projeto – Código de Financiamento 001.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – (FAPESP) pelo financiamento da bolsa de mestrado no Brasil (# 2019/16764-6) e também pelos recursos financeiros advindos do projeto de Auxílio à Pesquisa Regular (# 2018/09845-7).

A minha família por todo amor e carinho, especialmente meus pais, Ivone e Kleber, que sempre priorizaram a minha educação, meus sonhos e planos, que fizeram o possível e o impossível para que eu tivesse a oportunidade de chegar até aqui, e por sempre acreditarem em meu potencial.

Ao meu irmão, Rafael, por sempre comemorar minhas vitórias e acreditar em mim até quando eu duvidei, me fazer rir em momentos de dificuldade e ajudar a seguir em frente.

A minha afilhada Heloisa, que com seus três aninhos me faz ter esperanças de um mundo melhor, e apesar da saudade, me motiva a avançar estudando e me dedicando a ciência.

As minhas primas Tainara, Ingrid, Bianca e Nicole, pelo interesse em minhas pesquisas, admiração e companheirismo, pelas conversas e jogos que me trouxeram leveza durante esse período.

A minha amiga e xará Beatriz, que além de dividir o lar, me incentivou, acalmou, enalteceu e acreditou em mim em todos os momentos.

As minhas melhores amigas Carla e Jana, que me acompanham desde a infância, em vocês sempre encontrei todo apoio desde a infância até o mestrado, obrigada por todo companheirismo, cumplicidade e amor incondicional.

Agradeço a Deus por ser minha maior força nos momentos de angústia e desespero e colocar esperança, amor e fé no meu coração; Nossa Senhora Aparecida, minha santa de enorme devoção, por sempre guiar meus passos e abençoar o meu caminho durante essa trajetória. Sou grata por todas as bênçãos e oportunidades que recebi.

**EPÍGRAFE**

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.*

*Albert Einstein*

## SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. MATERIAIS.....	15
2.1 Descrição dos locais de estudo.....	15
2.2 Sequência de mudança de uso da terra.....	20
2.3 Amostragem.....	24
2.3.1 Macrofauna Edáfica.....	24
2.3.2 Macrofauna Epígea.....	24
2.3.3 Extração e identificação.....	25
2.3.4 Carbono e Nitrogênio da biomassa microbiana.....	26
2.3.5 Propriedades químicas e físicas do solo.....	27
2.4 Análise de dados.....	28
3. RESULTADOS.....	31
3.1 Abundância total da macrofauna.....	31
3.2 Abundância, riqueza, diversidade e uniformidade da macrofauna edáfica.....	34
3.3 Abundância, riqueza, diversidade e uniformidade da macrofauna epígea.....	38
3.4 Distribuição e abundância de organismos.....	41
3.5 Relação entre macrofauna e atributos de químicos, físicos e biológicos.....	43
4. DISCUSSÃO.....	46
4.1 A mudança de uso da terra e os organismos da macrofauna.....	46
4.2 O impacto da remoção da palhada da cana-de-açúcar na macrofauna.....	49
4.3 Distribuição da macrofauna edáfica no perfil do solo.....	49
4.4 Correlações da macrofauna aos indicadores físicos químicos e biológicos.....	50
5. CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS.....	54



## RESUMO

### **Alterações da macrofauna do solo induzidas pela expansão de cultivo de cana-de-açúcar sobre áreas de pastagem extensiva**

A expansão do cultivo de cana-de-açúcar sobre áreas de pastagem degradadas tem sido um dos principais cenários de mudança de uso de terra (MUT) na região centro-sul do Brasil. No entanto, sabe-se que a MUT pode afetar negativamente na biodiversidade do solo, e as múltiplas funções e serviços associados a estes organismos. Dentre os organismos, a macrofauna é fundamental para fragmentação vegetal, estruturação e estabilização do solo. Diante disso, o objetivo do trabalho foi avaliar as alterações na macrofauna edáfica e epígea, induzidas pela expansão de cultivo de cana-de-açúcar sobre áreas de pastagem extensiva. Para tanto, foram investigadas cronossequências de MUT (abordagem sincrônica), incluindo os seguintes usos: i) vegetação nativa, ii) pastagem degradada, iii) canavial recém implantado sobre área de pastagem (cana-planta); e iv) canavial consolidado (cana-soca), em dois locais, um de solo argiloso e outro de arenoso no estado de São Paulo. Ao fim da estação chuvosa entre o período de março a abril de 2019, foram coletados monólitos (25 x 25 x 10 cm) nas profundidades 0-10, 10-20, 20-30 cm para avaliação da macrofauna edáfica. Para avaliação da macrofauna epígea foram instaladas armadilhas de queda em cada ponto amostral. A composição da macrofauna edáfica e epígea diferiu entre os usos da terra. A vegetação nativa abrigou maior riqueza de grupos edáficos e epígeos. Coleópteros e minhocas estiveram associada a áreas de pastagem, principalmente em solo argiloso. A análise de efeitos mistos lineares mostrou que a MUT afetou a abundância relativa de macroinvertebrados edáficos (Uso da terra  $p=0,1191$ ;  $r^2_{\text{marginal}} = 0,28$ ,  $r^2_{\text{condicional}} = 0,33$ ) e epígeos (Uso da terra  $p=0,0176$ ;  $r^2_{\text{marginal}} = 0,22$ ,  $r^2_{\text{condicional}} = 0,32$ ). A grande maioria da macrofauna edáfica concentrou-se na camada superficial do solo (0-10 cm) com redução em profundidade (10-20 e 20-30 cm). De modo geral, a abundância e diversidade da macrofauna apresentaram correlação positiva para matéria orgânica, carbono e nitrogênio microbiano, macroporosidade e porosidade total, e correlação negativa para densidade do solo ( $p < 0,05$ ). Este estudo chama a atenção para perda significativa da abundância e diversidade da macrofauna nas áreas de cana soca. Dada a importância desses organismos para o funcionamento do solo e ecossistemas, são necessárias práticas de manejo e conservação do solo para manutenção da macrofauna edáfica e epígea em áreas de cana-de-açúcar, e importantes para aumentar a qualidade do solo e a sustentabilidade deste sistema de produção.

Palavras-chave: Mudança de uso da terra, Qualidade do solo, Fauna do solo, Biodiversidade

## ABSTRACT

### **Changes in soil macrofauna induced by the expansion of sugarcane cultivation over areas of extensive pasture**

The sugarcane expansion over extensive pasture areas has been one of the main scenarios for land use change (LUC) in the south-central region of Brazil. However, it is known that LUC can negatively affect soil biodiversity, and the multiple functions and services associated with these organisms. Among the organisms, the macrofauna is fundamental for plant fragmentation, structuring and soil stabilization. herefore, we aim to evaluate changes in the edaphic and epigeic macrofauna, induced by sugarcane expansion cultivation over extensive pasture. For this purpose, LUC chronosequences (synchronic approach) were investigated, including the following uses: i) native vegetation, ii) extensive pasture, ii) newly implanted sugarcane field over pasture area (Sugarcane); and iv) consolidated sugarcane (Sugarcane ratoon), in two locations, one with clayey soil and the other with sandy soil in the state of São Paulo. At the end of the rainy season between March and April 2019, monoliths (25 x 25 x 10 cm) were collected at depths 0-10, 10-20, and 20-30 cm for the assessment of the edaphic macrofauna. To assess the epigeic macrofauna, pitfall traps were installed at each sampling point. The edaphic and epigeic macrofauna composition differed between land uses. The native vegetation had greater abundance of edaphic and epigeic groups. Coleoptera and earthworms were associated with pasture areas, mainly in clayey soil. The analysis of mixed linear effects showed that LUC affected the relative abundance of edaphic macroinvertebrates (Land use  $p = 0.1191$   $r^2_{\text{marginal}} = 0.28$ ,  $r^2_{\text{conditional}} = 0.33$ ) and epigeic (Land use  $p = 0.0176$ ;  $r^2_{\text{marginal}} = 0.22$ ,  $r^2_{\text{conditional}} = 0.32$ ). The vast majority of the edaphic macrofauna was concentrated in the topsoil (0-10 cm) with a reduction in depth (10-20 and 20-30 cm). In general, the abundance and diversity of macrofauna showed a positive correlation for organic matter, carbon and microbial nitrogen, macroporosity and total porosity, and a negative correlation for soil density ( $p < 0.05$ ). This study draws attention to the significant loss of the abundance and diversity of the sugarcane ratoon macrofauna. Given the importance of these organisms for the functioning of the soil and ecosystems, soil management and conservation practices are necessary to maintain the edaphic and epigeic macrofauna in sugarcane areas, and are important for increasing soil quality and sustainability production system.

Keywords: Land use change, Soil quality, Soil fauna, Biodiversity



## 1. INTRODUÇÃO

O solo é um grande reservatório da biodiversidade do planeta (Decaëns et al., 2004). Cerca de um quarto das espécies dos grupos de vertebrados e invertebrados (já descritas) são especificamente habitantes do solo ou da serapilheira (Decaëns et al., 2006). O desequilíbrio da biodiversidade pode influenciar diretamente no controle de doenças, qualidade dos alimentos produzidos, além da qualidade do ar e da água (Bardgett & Van Der Putten, 2014; Joly et al., 2018). A fauna do solo é composta por invertebrados que habitam ou passam um ou mais ciclos de vida dentro do perfil do solo (Baretta et al., 2011). Dentre os organismos, a macrofauna é fundamental para estruturação e estabilização do solo (Jouquet et al., 2006). Pertencem a macrofauna, invertebrados com diâmetro superior a 2 mm (e.g., cupins, formigas, minhocas besouro, entre outros) visíveis aos olhos humanos (Barrios, 2007; Lavelle et al., 2001). Dentre os principais grupos que compõem a macrofauna estão: Oligochaeta, Coleoptera, Hymenoptera, Araneae, Hemiptera, Isopoda, Geophilomorpha e outros táxons (Lavelle et al., 2001). Esses são responsáveis pela fragmentação e decomposição inicial do material orgânico, translocação de carbono, ciclagem de nutrientes, contribuem para o aumento da porosidade do solo afetando a infiltração e distribuição de água no perfil, além de criar habitats para microrganismos e plantas (Baretta et al., 2011; Barros et al., 2002; Berke, 2010; Filser et al., 2016; Lavelle et al., 2001; Menta & Remelli, 2020)

A macrofauna edáfica representa um dos componentes mais importantes das comunidades que vivem no solo (Menta & Remelli, 2020), esses invertebrados são responsáveis por formar agregados estabilizados e capazes de decompor substâncias como lignina e taninos que são substâncias recalcitrantes, contribuindo para o aumento da disponibilidade de nutrientes para plantas e microrganismos (Lavelle, 1997; Samson et al., 1994). O início da decomposição de substâncias se dá por meio da macrofauna epígea, os macroinvertebrados que habitam a superfície do solo. Estudos têm caracterizado esses organismos como bioindicadores de qualidade do solo (Baretta et al., 2011; Silva & Alves, 2013), pois são muito sensíveis a perturbações antrópicas, como adoção de práticas agrícolas.

Ademais, a biota do solo pode contribuir para moldar a biodiversidade dos invertebrados acima do solo que ligam-se diretamente a respostas ecológicas dos ecossistemas terrestres e as mudanças ambientais atuais e futuras (Bardgett & Van Der Putten, 2014). A redução da biodiversidade dos solos impacta a redução da qualidade do mesmo e conseqüentemente a produtividade da cultura de interesse além de, a comunidades biológicas do solo está associada a outras propriedades do solo, como fertilidade do solo, estrutura e movimento da água (Melman et al., 2019). Porém, o entendimento sobre a distribuição e diversidade desses

organismos tem ocorrido de forma lenta, e ainda pouco se sabe sobre os impactos que a transformação do ambiente pode ter nesses organismos, que dificulta os setores que realizam a previsão de cenários futuros relacionados a não preservação da biodiversidade do solo (Phillips et al., 2019). O uso da terra, dinâmica e composição da paisagem tem impactos diretos sobre a comunidade e distribuição da macrofauna, as quais respondem rapidamente às práticas adotadas (Lemessa, Hambäck, & Hylander, 2015; Marichal et al., 2014; Vasconcelos et al., 2020).

As práticas agrícolas e sistemas de cultivo simplificados, como o cultivo da cana-de-açúcar em monocultura, podem afetar a abundância e diversidade da macrofauna (Abreu et al., 2014; Franco et al., 2016; Menandro et al., 2019). A cultura de cana-de-açúcar tem grande importância no setor econômico, social e ambiental do estado de São Paulo e do Brasil sendo estratégica para a produção bioenergética nacional e mundial devido à crescente demanda energética (Goldemberg et al., 2014). O Brasil destaca-se como maior produtor mundial de cana-de-açúcar estendendo-se por aproximadamente 8,4 milhões de hectares, com uma produção de 642,07 milhões de toneladas na safra 2020/2021, com destaque para a produção na região centro sul (92% da produção nacional) (CONAB, 2020; EPE, 2018). O país é o segundo maior produtor de etanol do mundo (27,86 bilhões de litros de etanol na safra 2020/2021)(CONAB, 2020) e possui a maior frota (~40 milhões) de veículos flex (Sindipeças e Abipeças, 2019). Apesar disso, para atender a demanda energética brasileira na próxima década, projeções indicam a necessidade de expansão da área cultivada com cana-de-açúcar no país (Goldemberg et al., 2014). Estima-se que 170 milhões de hectares do território brasileiro seja de áreas de pastagem destinado ao setor da pecuária (Strassburg et al., 2014). Grande parte dessa imensa área de pastagem encontra-se em algum estágio de degradação, em que a produtividade média nacional atinge somente 32 a 34% da produtividade potencial. A intensificação das pastagens cultivadas liberaria áreas disponíveis suficientes para a expansão de culturas agrícolas, dentre elas a cana de açúcar (Bustamante et al., 2012). Aumentar o potencial produtivo dos pastos degradados para um percentual entre 49 a 50% já seria o suficiente para atender a demanda de carne até pelo menos 2040, não sendo necessário a abertura de novas áreas, o que resulta na conservação dos ecossistemas naturais (Strassburg et al., 2014). Com base nesses dados, destaca-se a potencial expansão da cana-de-açúcar sobre áreas de pastagens degradadas, gerando mínimos impactos ambientais (Adami et al., 2012; Strassburg et al., 2014) o que pode refletir em melhoria da qualidade do solo (Cherubin et al., 2016) e sustentabilidade agrícola no centro-sul do Brasil (Oliveira et al., 2019).

Porém, quando tratamos de aspectos biológicos do solo, podem haver impactos negativos na biodiversidade, os quais ameaçam a sustentabilidade do cultivo da cana no Brasil

(Oliveira et al., 2019). Recentemente, têm-se realizado estudos voltados para os impactos da MUT sobre a perda ou ganho de habitats da biodiversidade do solo. Franco et al. (2016) verificaram que a introdução da cana-de-açúcar sobre áreas de pastagem promoveu uma redução de abundância (89%) e diversidade (39%) da macrofauna do solo. Essa redução deve-se principalmente às intensas práticas de preparo do solo e a adoção de insumos agrícolas no sistema da cana-de-açúcar (Franco et al., 2016; Oliveira et al., 2019). A remoção de resíduos vegetais sobre a superfície do solo pode potencializar o efeito negativo da cana-de-açúcar na abundância da macrofauna (Menandro et al., 2019). A pesquisa voltada a biodiversidade do solo e suas funções têm crescido, visando o desenvolvimento de práticas sustentáveis de manejo do solo (Joly et al., 2018). A quantificação deste compartimento e suas atividades se tornam extremamente importantes quando se trata de conservação dos solos.

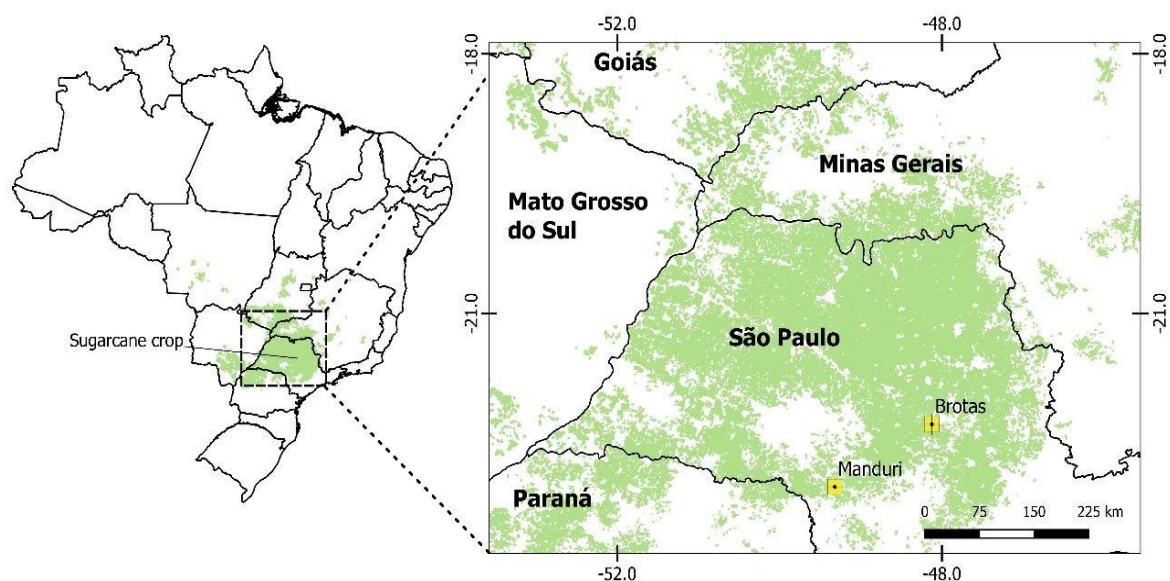
Recentemente, Franco et al., (2020) verificaram que os engenheiros do ecossistema afetam a estruturação do solo, proteção física da MOS e finalmente o estoque de C do solo. Nesse sentido, a redução da diversidade da macrofauna ou abundância de grupos específicos tem efeito direto e indireto em importantes funções e serviços ecossistêmicos do solo como sequestro de C, decomposição, ciclagem de nutriente, estruturação do solo, regulação do fluxo de água e produtividade das plantas (Bottinelli et al., 2015; Menta & Remelli, 2020). Embora a fauna do solo tenha enorme importância, poucos estudos têm explorado suas respostas a mudança de uso da terra para a expansão do cultivo de bioenergia. Além disso, a maioria dos estudos de macrofauna não abrangem concomitantemente os organismos edáficos e epígeos (Franco et al., 2016; Menandro et al., 2019; Vasconcelos et al., 2020; Vazquez et al., 2020). Sendo assim, a hipótese testada foi que a mudança de uso da terra afeta negativamente os atributos da comunidade (abundância e diversidade) da macrofauna edáfica e epígea, e tais efeitos pode se acentuar ao longo do cultivo da cana-de-açúcar. O objetivo do estudo foi quantificar as mudanças da abundância, riqueza e diversidade da macrofauna edáfica e epígea em áreas que a pastagem extensiva foi convertida em cana-de-açúcar. Avaliar a correlação dos macroinvertebrados aos demais atributos do solo, por meio da amostragem de carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, propriedades químicas e físicas do solo.



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Descrição dos locais de estudo

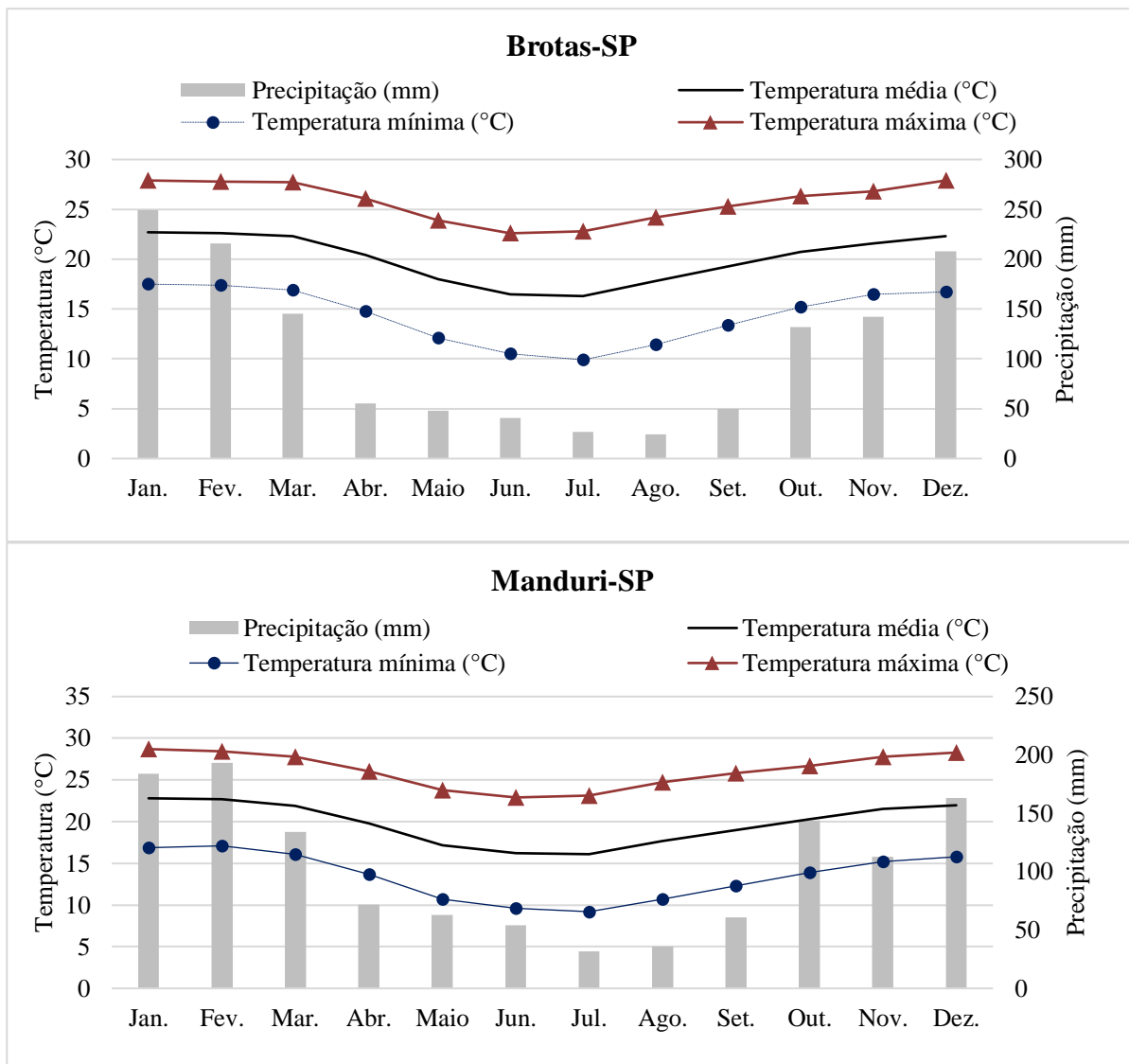
As áreas de estudo estão em locais estratégicos e representativos da região Centro-Sul, principal região produtora de cana-de-açúcar do Brasil (Figura 1), localizadas nos municípios de: i) Manduri, mesorregião de Sorocaba, centro-sul do estado de São Paulo (Lat.: 23°00' S; Long.: 49°19' O) com altitude média de 709 m; ii) Brotas, mesorregião de Piracicaba, centro do estado de São Paulo (Lat.: 22°17' S; Long.: 48°07' O) com altitude média de 677 m.



**Figura 1.** Localização locais de estudo no Brasil, destacando Manduri/SP e Brotas/SP.

O clima da região de Manduri é classificado como Cfa (classificação de Köppen e Geiger) com uma pluviosidade média de 1249 mm ao longo do ano e temperatura média anual de 19.8 °C (Figura 2). A classificação climática para Brotas é Cwa (classificação de Köppen e Geiger) com pluviosidade média anual de 1337 mm, concentrada principalmente nos meses de outubro a março, e a temperatura média anual é de 20,0 °C (Figura 2). Os locais apresentam a estação chuvosas concentrada na primavera-verão (outubro-março) e a estação seca no outono-inverno (abril-setembro).





**Figura 2.** Média mensal de temperatura (máxima, média e mínima) (°C) e precipitação (mm) na região de Manduri-SP e Brotas-SP. Fonte: CLIMATE-DATE.ORG. (<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/manduri-287233/>) (<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/brotas-34905/>).

O solo da área de Manduri é classificado como Latossolo Vermelho de textura argilosa (Santos et al., 2018), enquanto o solo de Brotas é classificado como Neossolo Quartzarênico com textura arenosa (Santos et al., 2018). Com base no contraste textural dos locais, a área de Manduri foi nomeada como “Argiloso”, e de Brotas como “Arenoso” (Tabela 1). Uma caracterização química completa do solo pode ser encontrada na Tabela 2 e 3.

**Tabela 1.** Distribuição de tamanho de partícula do solo (%) em solo arenoso e argiloso no Estado de São Paulo, Brasil.

\*VN= vegetação nativa, PA= pastagem, CAp= cana-de-açúcar planta, CAs=cana-de-açúcar segunda soqueira,

Identificação do local	Solo arenoso				
Localização geográfica	Brotas-SP (Lat.: 22°17' S; Long.: 48°07' O)				
Classificação do solo	Neossolos quartzarênicos				
Distribuição de tamanho de partícula do solo (%)					
Profundidade (cm)		VN	PA	Cap	CAs
0-20	argila	05	05	07	08
	silte	01	02	01	00
	areia	94	93	92	92
20-40	argila	07	10	12	15
	silte	02	02	02	00
	areia	91	88	86	85
Identificação do local	Solo argiloso				
Localização geográfica	Manduri-SP (Lat.: 23°00' S; Long.: 49°19' O)				
Classificação do solo	Latossolo Vermelho				
Distribuição de tamanho de partícula do solo (%)					
Profundidade (cm)		VN	PA	Cap	CAs
0-20	argila	59	47	62	58
	silte	31	27	29	32
	areia	10	26	09	10
20-40	argila	61	50	65	58
	silte	30	25	29	31
	areia	09	25	06	11

CA-s-p = cana-de-açúcar com acúmulo de palha no solo.

**Tabela 2:** Atributos de acidez, CTC e matéria orgânica do solo para as camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm sob mata nativa, pastagem, cana-planta e cana-soca nos locais estudados.

Atributos*	Argiloso				Arenoso			
	Vegetação Nativa	Pastagem	Cana-Planta	Cana-Soca	Vegetação Nativa	Pastagem	Cana-Planta	Cana-Soca
----- 0-10 cm -----								
pH	4,07 ( $\pm 0,09$ )	4,85 ( $\pm 0,19$ )	5,27 ( $\pm 0,35$ )	5,05 ( $\pm 0,12$ )	3,77 ( $\pm 0,20$ )	4,25 ( $\pm 0,05$ )	4,35 ( $\pm 0,19$ )	4,97 ( $\pm 0,17$ )
H+Al	130,33 ( $\pm 8,08$ )	40,25 ( $\pm 5,56$ )	38,33 ( $\pm 6,35$ )	41,5 ( $\pm 6,55$ )	60,00 ( $\pm 6,92$ )	33,25 ( $\pm 1,50$ )	41,66 ( $\pm 9,23$ )	20,50 ( $\pm 1,91$ )
V%	9,25 ( $\pm 2,21$ )	46,66 ( $\pm 4,50$ )	51,33 ( $\pm 9,45$ )	58,75 ( $\pm 7,08$ )	7,75 ( $\pm 1,70$ )	18,75 ( $\pm 1,25$ )	24,00 ( $\pm 7,81$ )	39,00 ( $\pm 3,00$ )
CTC	144,43 ( $\pm 6,71$ )	69,65 ( $\pm 6,69$ )	100,70 ( $\pm 17,15$ )	100,75 ( $\pm 9,14$ )	59,95 ( $\pm 10,76$ )	40,80 ( $\pm 1,78$ )	47,30 ( $\pm 7,35$ )	37,50 ( $\pm 4,92$ )
MO	47,33 ( $\pm 6,11$ )	35,00 ( $\pm 3,91$ )	31,00 ( $\pm 7,00$ )	36,25 ( $\pm 2,62$ )	22,25 ( $\pm 6,02$ )	20,00 ( $\pm 1,82$ )	19,00 ( $\pm 1,82$ )	13,00 ( $\pm 1,63$ )
----- 10-20 cm -----								
pH	3,95 ( $\pm 0,05$ )	4,87 ( $\pm 0,26$ )	4,82 ( $\pm 0,28$ )	4,77 ( $\pm 0,25$ )	3,87 ( $\pm 0,15$ )	4,15 ( $\pm 0,05$ )	4,62 ( $\pm 0,37$ )	4,77 ( $\pm 0,32$ )
H+Al	131,50 ( $\pm 7,00$ )	41,00 ( $\pm 6,55$ )	35,33 ( $\pm 2,30$ )	56,00 ( $\pm 6,92$ )	45,33 ( $\pm 2,88$ )	34,00 ( $\pm 0$ )	28,25 ( $\pm 6,94$ )	21,00 ( $\pm 4,69$ )
V%	5,75 ( $\pm 0,90$ )	43,33 ( $\pm 5,13$ )	44,00 ( $\pm 6,92$ )	30,66 ( $\pm 6,65$ )	4,25 ( $\pm 2,36$ )	12,50 ( $\pm 2,88$ )	39,25 ( $\pm 11,89$ )	36,25 ( $\pm 11,89$ )
CTC	139,67 ( $\pm 7,48$ )	60,80 ( $\pm 5,74$ )	64,16 ( $\pm 13,53$ )	76,72 ( $\pm 7,87$ )	52,17 ( $\pm 9,92$ )	38,95 ( $\pm 1,29$ )	41,30 ( $\pm 8,46$ )	32,70 ( $\pm 1,51$ )
MO	31,75 ( $\pm 3,86$ )	26,50 ( $\pm 2,64$ )	28,00 ( $\pm 6,97$ )	28,00 ( $\pm 2,16$ )	16,00 ( $\pm 2,16$ )	14,00 ( $\pm 1,41$ )	14,00 ( $\pm 3,46$ )	9,00 ( $\pm 0,81$ )
----- 20-30 cm -----								
pH	3,92 ( $\pm 0,09$ )	4,72 ( $\pm 0,44$ )	4,55 ( $\pm 0,52$ )	4,32 ( $\pm 0,63$ )	3,95 ( $\pm 0,05$ )	4,17 ( $\pm 0,09$ )	4,55 ( $\pm 0,46$ )	4,67 ( $\pm 0,28$ )
H+Al	131,50 ( $\pm 7,00$ )	46,00 ( $\pm 10,39$ )	41,00 ( $\pm 14,79$ )	80,33 ( $\pm 17,03$ )	40,50 ( $\pm 6,75$ )	35,00 ( $\pm 2,00$ )	27,33 ( $\pm 9,23$ )	22,00 ( $\pm 4,32$ )
V%	4,00 ( $\pm 1,41$ )	32,66 ( $\pm 12,05$ )	29,66 ( $\pm 15,69$ )	15,00 ( $\pm 5,56$ )	3,50 ( $\pm 2,51$ )	12,50 ( $\pm 3,78$ )	29,00 ( $\pm 16,46$ )	32,00 ( $\pm 8,12$ )
CTC	136,75 ( $\pm 6,32$ )	56,45 ( $\pm 6,82$ )	57,16 ( $\pm 7,31$ )	93,56 ( $\pm 14,11$ )	41,97 ( $\pm 5,96$ )	40,07 ( $\pm 2,25$ )	41,22 ( $\pm 7,78$ )	32,05 ( $\pm 2,54$ )
MO	29,75 ( $\pm 2,21$ )	23,25 ( $\pm 2,62$ )	23,75 ( $\pm 3,50$ )	24,25 ( $\pm 0,95$ )	10,75 ( $\pm 1,25$ )	12,5 ( $\pm 1,00$ )	14,25 ( $\pm 3,30$ )	7,5 ( $\pm 1,00$ )

\*Unidades: pH  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol L<sup>-1</sup> (pH); acidez potencial (H+Al) (mmolc dm<sup>-3</sup>); V(%): Saturação da CTC por bases; CTC (mmolc dm<sup>-3</sup>): capacidade de troca de cátions; MO (g dm<sup>-3</sup>) colorimétrica.

**Tabela 3:** Teores de macronutrientes do solo para as camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm sob mata nativa, pastagem, cana-planta e cana-soca nos locais estudados.

Atributos*	Argiloso				Arenoso			
	Vegetação Nativa	Pastagem	Cana-Planta	Cana-Soca	Vegetação Nativa	Pastagem	Cana-Planta	Cana-Soca
----- 0-10 cm -----								
P	14,33 ( $\pm 3,78$ )	4,5 ( $\pm 0,57$ )	7,66 ( $\pm 1,52$ )	11,33 ( $\pm 3,21$ )	3,00 ( $\pm 0,95$ )	3,00 ( $\pm 3,55$ )	3,00 ( $\pm 6,95$ )	7,75 ( $\pm 4,50$ )
S	7,50 ( $\pm 0,70$ )	5,00 ( $\pm 0,70$ )	9,33 ( $\pm 2,51$ )	15,00 ( $\pm 1,41$ )	5,3 ( $\pm 0,57$ )	7,00 ( $\pm 1,20$ )	7,50 ( $\pm 0,70$ )	8,00 ( $\pm 1,41$ )
K	1,87 ( $\pm 0,68$ )	0,90 ( $\pm 0,10$ )	1,70 ( $\pm 0,69$ )	1,50 ( $\pm 1,27$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )**	<0,90 ( $\pm 0$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )
Ca	4,75 ( $\pm 2,06$ )	18,66 ( $\pm 7,72$ )	39,66 ( $\pm 17,03$ )	43,25 ( $\pm 5,73$ )	2,50 ( $\pm 0,57$ )	3,50 ( $\pm 5,77$ )	5,75 ( $\pm 2,21$ )	12,00 ( $\pm 5,35$ )
Mg	5,50 ( $\pm 1,94$ )	14,00 ( $\pm 1,00$ )	24,66 ( $\pm 8,50$ )	16,66 ( $\pm 1,15$ )	1,00 ( $\pm 0$ )	3,00 ( $\pm 0$ )	2,25 ( $\pm 0,95$ )	4,25 ( $\pm 1,50$ )
----- 10-20 cm -----								
P	11,00 ( $\pm 0,81$ )	3,00 ( $\pm 0$ )	5,00 ( $\pm 0,70$ )	7,33 ( $\pm 4,04$ )	3,00 ( $\pm 3,09$ )	3,00 ( $\pm 0,57$ )	3,00 ( $\pm 6,07$ )	3,00 ( $\pm 0$ )
S	6,00 ( $\pm 2,12$ )	<5,00 ( $\pm 0$ )	6,00 ( $\pm 0,563$ )	30,66 ( $\pm 6,50$ )	6,00 ( $\pm 1,22$ )	<5,00 ( $\pm 0$ )	5,33 ( $\pm 0,57$ )	<5,00 ( $\pm 0$ )
K	1,67 ( $\pm 0,28$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )	1,20 ( $\pm 0$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )
Ca	3,00 ( $\pm 0$ )	15,66 ( $\pm 0,57$ )	11,66 ( $\pm 2,08$ )	16,50 ( $\pm 3,10$ )	<1,00 ( $\pm 0$ )	3,25 ( $\pm 0,95$ )	9,66 ( $\pm 4,72$ )	7,25 ( $\pm 2,06$ )
Mg	3,50 ( $\pm 1,00$ )	8,75 ( $\pm 2,87$ )	10,50 ( $\pm 3,78$ )	9,25 ( $\pm 2,36$ )	1,00 ( $\pm 0,56$ )	1,25 ( $\pm 0,50$ )	6,33 ( $\pm 3,21$ )	3,75 ( $\pm 1,50$ )
----- 20-30 cm -----								
P	6,75 ( $\pm 2,06$ )	<3,00 ( $\pm 0$ )	5,00 ( $\pm 3,53$ )	3,00 ( $\pm 1,41$ )	3,00 ( $\pm 0$ )	3,00 ( $\pm 1,00$ )	3,00 ( $\pm 4,71$ )	3,00 ( $\pm 0$ )
S	<5,00 ( $\pm 0$ )	5,00 ( $\pm 0$ )	8,00 ( $\pm 4,24$ )	33,33 ( $\pm 17,21$ )	5,00 ( $\pm 0,53$ )	5,00 ( $\pm 0,58$ )	5,00 ( $\pm 0,12$ )	5,00 ( $\pm 0,23$ )
K	1,25 ( $\pm 0,23$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )	<0,90 ( $\pm 0$ )
Ca	1,00 ( $\pm 0$ )	9,0 ( $\pm 4,39$ )	7,25 ( $\pm 4,42$ )	7,00 ( $\pm 1,73$ )	<1,00 ( $\pm 0$ )	3,25 ( $\pm 1,25$ )	5,25 ( $\pm 3,20$ )	6,25 ( $\pm 1,50$ )
Mg	2,75 ( $\pm 0,95$ )	5,50 ( $\pm 2,08$ )	6,00 ( $\pm 3,55$ )	7,50 ( $\pm 9,37$ )	1,00 ( $\pm 0,25$ )	1,25 ( $\pm 0,50$ )	4,00 ( $\pm 1,73$ )	3,00 ( $\pm 0,81$ )

\*Unidades: Fósforo (P) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ); enxofre (S) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ); potássio (K) ( $\text{mmolc dm}^{-3}$ ); cálcio (Ca) ( $\text{mmolc dm}^{-3}$ ) e magnésio (Mg) ( $\text{mmolc dm}^{-3}$ );

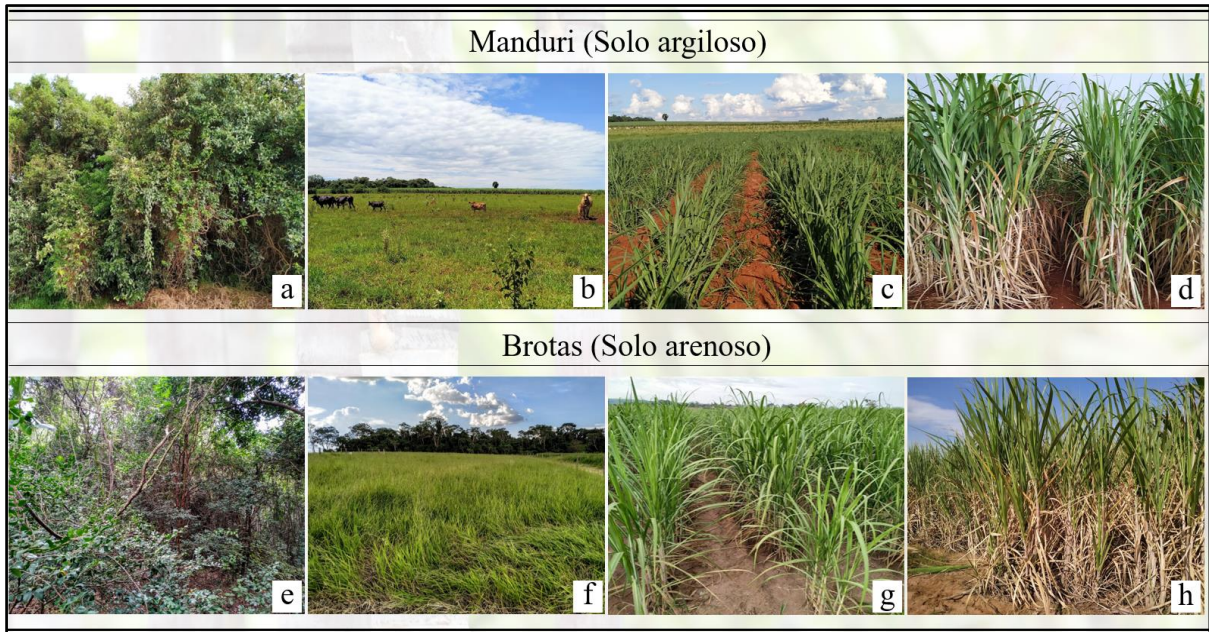
\*\*(<) menor do que o limite de quantificação

## 2.2 Sequência de mudança de uso da terra

Para avaliar os efeitos da MUT na macrofauna do solo, adotou-se uma abordagem sincrônica em que identificamos cronosssequências de mudança de uso da terra com os seguintes usos: i) vegetação nativa (NV) - fragmento de Mata Atlântica, a qual foi utilizada com uma referência de ecossistema natural ; ii) pastagem extensiva (PA) – manejada em pastejo contínuo sem investimento em adubação e calagem e tendo como planta forrageira a braquiária; iii) Cana planta (CAp) - área de cana-de-açúcar recém convertida (out 2018) da pastagem extensiva, utilizando preparo convencional de solo; e iv) Cana soca (CAs) - área cultivada com cana-de-açúcar em 2ª soqueira (Argiloso) e 3ª soqueira (Arenoso), cultivadas de modo convencional com colheita mecanizada sem remoção de palha (CAs). A área Arenosa possui um tratamento adicional em que a cana soca possui uma subdivisão de cana soca com palha (CAs-p) e sem palha (CAs). A colheita na área é mecânica em que a palha é distribuída de forma uniforme na lavoura e depois faz-se a operação de enleiramento onde a palha é retirada da linha e adicionada na entrelinha, resultando na deposição de palha no mesmo local no decorrer dos anos.

Os quatro usos da terra estão localizados em áreas adjacentes (lado a lado), para minimizar os efeitos de variações climáticas, topográficas e edáfica. As diferenças temporais no tempo MUT adicionadas aos tipos contrastantes de solo entre os locais aumentaram a força do conjunto de dados coletados. Nas figuras 3 e 4 são apresentadas uma visão geral de cada uma das áreas estudadas.





**Figura 3.** Áreas experimentais com diferentes usos de terra utilizadas para avaliação dos serviços ecossistêmicos do solo em Manduri-SP: a) Área de vegetação nativa; b) Área de pastagem extensiva; c) Área de cana-planta; d) Área de cana-soca. Brotas-SP: e) Área de vegetação nativa; f) Área de pastagem extensiva; g) Área de cana-planta; h) Área de cana-soca.



**Figura 4.** Tratamento adicional: Contraste de palhada em Cana Soca em solo Arenoso. No canto inferior direito temos a) Cana soca com palha; canto superior esquerdo b) Sem palha.

Informações detalhadas sobre o histórico da área e manejo do solo nos locais de estudo são fornecidas em (Bonini da Luz et al., 2020), conforme Tabela 4.

**Tabela 4.** Histórico do uso da terra e descrição das práticas de manejo adotadas nas área de estudo.

Local	Uso*	Descrição
Solo Arenoso	VN	Vegetação secundária e Floresta estacional semidecidual composta por <i>Trichillia clausenii</i> , <i>Euterpe edulis</i> , e <i>Aspidosperma polyneuron</i> como espécies dominantes.
	PA	<b>A Conversão da VN para PA ocorreu em 1975.</b> A PA foi cultivada com brachiaria ( <i>Brachiaria decumbens</i> ) cv. Basilik, sem aplicação de fertilizante mineral e com taxa de lotação animal de ~7 unidades animal (UA) (7 UA ha <sup>-1</sup> ) até 2018. <i>B. decumbens</i> foi substituída por <i>Brachiaria brizanta</i> cv. Marandu em 2018. Durante esta conversão foram aplicados na superfície do solo 2 Mg ha <sup>-1</sup> de calcário, e 200, 135, and 115 kg ha <sup>-1</sup> de nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente. Para controle de ervas daninhas foi aplicado 1,5 L ha <sup>-1</sup> de 2,4-D (i.a). A taxa de lotação animal permaneceu a mesma que no período anterior com pastejo contínuo durante o ano.
	CAp	<b>A conversão da PA para CAp ocorreu em 2018.</b> A conversão ocorreu por meio do preparo convencional com aração e gradagem. Foram aplicados 2 t ha <sup>-1</sup> de calcário na superfície do solo e 60, 150 e 120 kg ha <sup>-1</sup> de nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente foram aplicados nas linhas de plantio. A cultivar plantada foi IAC SP 97-4039.
	CAs	<b>A conversão da PA para CAs ocorreu em 2002.</b> Nos anos seguintes a colheita foi realizada mecanicamente sem queima e sem remoção de palha. A renovação do canavial foi realizada a cada 5 anos através da aração e gradagem. A última renovação ocorreu em 2017 onde a cultivar IAC SP 97-4039 foi plantada. Após a colheita de 2018, foram aplicados 155, 41 e 86 kg ha <sup>-1</sup> de nitrogênio, fósforo, e potássio, respectivamente.
	CAs-p	<b>Descrição de CAs.</b> Durante a colheita mecanizada a palha é distribuída de forma uniforme na área e depois faz-se a operação de enleiramento onde a palha é retirada da linha e adicionada na entrelinha, resultando na deposição de palha no mesmo local no decorrer dos anos.
Solo Argiloso	VN	Mesma descrição que no solo arenoso.
	PA	<b>A Conversão da VN para PA ocorreu em 1970.</b> A pastagem foi composta por <i>Brachiaria decumbens</i> sem adição de fertilizante mineral. O pastejo é contínuo com taxa de lotação de 1,2 AU ha <sup>-1</sup> .
	CAp	<b>A conversão da PA para CAp ocorreu em 2018.</b> A conversão ocorreu através do preparo convencional com aração e gradagem. Foram aplicados 2 t ha <sup>-1</sup> de calcário na superfície do solo e 50, 150 e 50 kg ha <sup>-1</sup> de nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente foram aplicados nas linhas de plantio.
	CAs	<b>A conversão da PA para CAs ocorreu em 2016.</b> Em 2017 e 2018 foi realizada colheita mecânica sem queima e sem remoção de palha. Após cada colheita 90 e 80 kg ha <sup>-1</sup> de nitrogênio e potássio foram aplicados respectivamente.

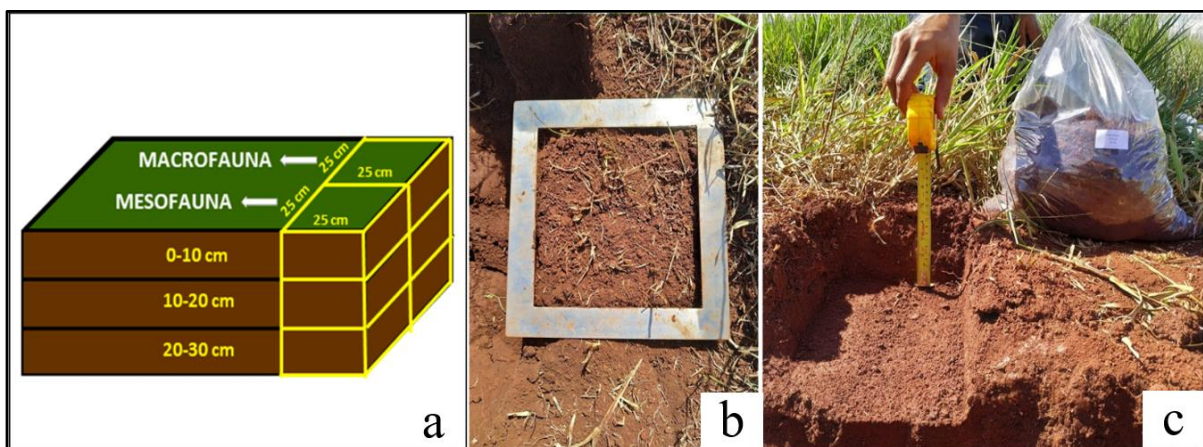
\*VN= vegetação nativa, PA= pastagem, CAp= cana-de-açúcar planta, CAs=cana-de-açúcar segunda soqueira, CAs-p = cana-de-açúcar com acúmulo de palha no solo.



## 2.3 Amostragem

### 2.3.1 Macrofauna edáfica

A amostragem de campo para a macrofauna do solo foi realizada ao fim da estação chuvosa entre o período de março a abril de 2019. Em cada uso da terra foram demarcadas quatro repetições de coletas espaçadas cerca de 50 m entre si, assim, para cada área de estudo (Brotas e Manduri), o número de pontos amostrais totalizou 16 (*i.e.*, 4 usos x 4 repetições). As amostras foram coletadas nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade, onde estão concentradas as maiores alterações decorrentes da mudança de uso da terra. Com base na metodologia recomendada pelo “Tropical Soil Biology and Fertility” (TSBF) (Anderson & Ingram, 1989) foram coletados monólitos em cada ponto amostral com dimensões de 25 cm comprimento x 25 cm de largura x 10 cm de espessura em três profundidades 0-10, 10-20 e 20-30 cm (Fig. 5-A). Utilizou-se um gabarito de ferro (marcador) para demarcação da área dos monólitos (Fig. 5-B) e com o auxílio de uma pá reta os mesmos foram removidos, armazenadas em sacos plásticos e identificados conforme a camada e número da amostra (Fig. 5-C).

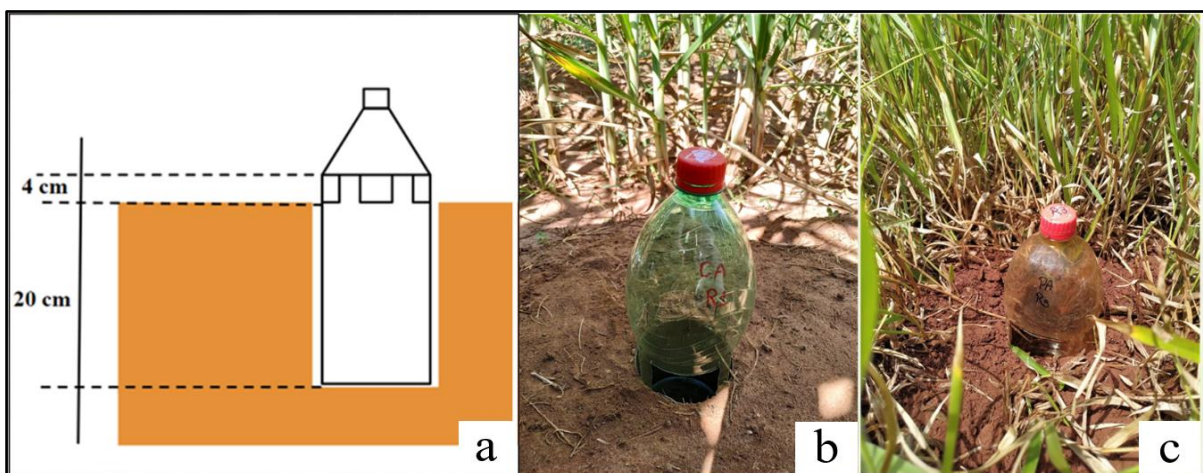


**Figura 5:** Coletas de monólitos nos diferentes usos de terra para avaliação da macrofauna. a) Representação esquemática dos monólitos de solo coletados; b) gabarito de ferro utilizado para mensurar os monólitos; c) Amostra coletada armazenada em sacos plásticos.

### 2.3.2 Macrofauna Epígea

A coleta da macrofauna epígea (organismos que habitam a superfície do solo) se deu por meio da instalação de armadilhas de queda do tipo “Pitfall”, como método alternativo para avaliar a macrofauna epígea (Moldenke, 1994). A instalação ocorreu entre no início de março de 2020 para ambos os locais. Em cada área, o número de armadilhas totalizou 20 (*i.e.*, 4 usos x 5 repetições) equidistantes em 30 metros. A armadilha do tipo “Pitfall” utilizada recebe o nome de Trampa de Provid, idealizada por Antonioli et al. (2006) (Fig. 6-A). Consiste

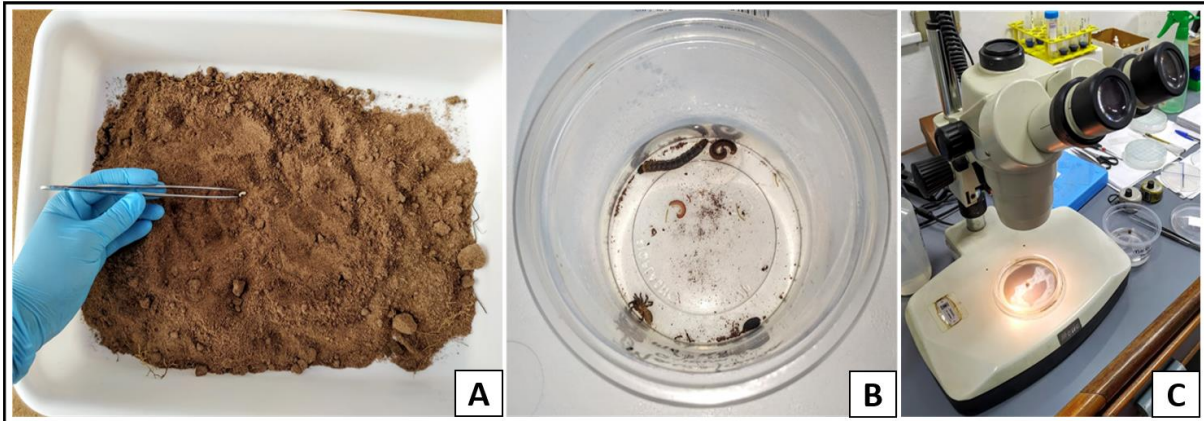
basicamente em uma garrafa do tipo Pet com capacidade de 2 litros, contendo 4 aberturas na forma de janelas com dimensões de 6 x 4 cm na altura de 20 cm de sua base (Antoniolli et al., 2006) contendo em seu interior 200 mL de álcool 70% e 5 gotas de formol a 2%. Elas foram enterradas no solo de modo que os bordos das aberturas ficassem ao nível da superfície do solo (Fig. 6-B; C). As armadilhas foram mantidas no campo durante dez dias e após esse período as amostras foram coletadas e armazenadas em geladeira para posterior identificação. A posteriori os macroinvertebrados coletados foram identificados a nível de Classe, Subclasse, Ordem e/ou Família com auxílio de microscópio estereoscópico, com aumento de 40 vezes.



**Figura 6:** Instalação de armadilhas de queda para avaliação da macrofauna epígea; a) Representação esquemática de armadilha de queda adaptada de Antoniolli et al. (2006); b) Armadilha instalada na área de cana-planta em Brotas-SP; c) Armadilha instalada na área de pastagem extensiva em Manduri-SP.

### 2.3.3 Extração e identificação

As amostras de solo coletadas foram levadas ao laboratório e inspecionadas, com a utilização de bandejas plásticas e pinças faz-se a triagem dos macros invertebrados (Fig. 7-A) que foram armazenados em frascos contendo álcool 70% para conservação até a identificação dos mesmos. A macrofauna edáfica, coletada por meio das armadilhas, também passou por triagem com uso de pinça. Todos os invertebrados maiores de 2,0 mm de diâmetro, tanto para macrofauna edáfica quanto epígea foram identificados a nível de Classe, Subclasse, Ordem e/ou Família com auxílio de microscópio estereoscópico, com aumento de 40 vezes (Fig. 7-B; C).



**Figura 7.** Extração da macrofauna edáfica do solo; A- Triagem de macroinvertebrados; B – Armazenamento dos macroinvertebrados coletados em álcool 70%; C- Identificação e quantificação da macrofauna edáfica do solo por meio do microscópio estereoscópico.

### 2.3.4 Carbono e Nitrogênio da biomassa microbiana

O carbono da biomassa microbiana (CBM) e o nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) foram determinados pelo método clorofórmio-fumigação-extração (CFE) proposto por (Sparling & West, 1988; Vance, Brookes, & Jenkinson, 1987).

Foram coletadas três alíquotas de 10 g de cada amostra de solo, duas para determinação do CBM e uma para análise do teor de umidade. Metade das amostras foi fumigada (F) por 24 h em dessecador com béquer contendo 25 mL de clorofórmio livre de etanol. As amostras não fumigadas (NF) foram mantidas em condição ambiente. Após a fumigação, foram adicionados as amostras, 40 mL de  $K_2SO_4$  0,5 M para extração do CBM, em seguida, foram submetidas à agitação horizontal (200 rpm) por 30 min. Logo após fez-se a filtração por meio do papel de filtro Whatman nº 2. Posteriormente, 8 mL do extrato filtrado foi transferido para tubo digestor e adicionou-se 2 mL de dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ ) 66,7 mM e 15 mL de uma mistura 1:2 (v/v) de  $H_2SO_4/H_3PO_4$ , finalizando a digestão em banho-maria a 100 °C por 30 min. Com isso, após o resfriamento, a solução foi transferida para um frasco de Erlenmeyer de 125 mL, com adição de água destilada até atingir o volume de 50 mL. O  $K_2Cr_2O_7$  residual, na presença do indicador ferroína, foi medido por titulação com uma solução de  $(NH_4)_2Fe(SO_4)_6 \cdot 6H_2O$  33,3 mM em  $H_2SO_4$  concentrado. Com isso, o carbono foi determinado pela redução do  $K_2Cr_2O_7$  dos extratos filtrados. O teor de CBM foi estabelecido pela diferença entre o carbono orgânico extraído das amostras de solo F e NF utilizando-se um fator de correção (kEC) de 0,33 (Sparling & West, 1988).

Para análise do nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) adicionou-se alíquota de 0,6 mL, dos extratos de solo obtidos (fumigados e não-fumigados), em tubos de ensaio de 20

mL. Em seguida, adicionou-se tampão de ácido cítrico e reagente ninidrina. Os tubos passaram por aquecimento de 100° C em banho-maria por 20 minutos. Logo após, 4 mL de água com etanol (1:1) foi adicionado as amostras. Fez-se homogeneização das soluções e mediu-se a absorvância em 570 nm. Os teores de NBM foram determinados pela diferença entre a quantidade de compostos ninidrina extraídos por K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,5 M das amostras de solo F e NF (Joergensen & Brookes, 1990).

### 2.3.5 Propriedades químicas e físicas do solo

Amostras para caracterização química do solo foram coletadas nos mesmos pontos e tempo dos dados da macrofauna edáfica. Ao lado da coleta de monólitos coletou-se amostras deformadas com auxílio de uma espátula para três profundidades (0-10, 10-20, 20-30 cm) em cada ponto amostral, e esses dados foram utilizados para verificar correlações entre os atributos químicos do solo e a macrofauna do solo. Os atributos químicos do solo foram quantificados pelos métodos analíticos descritos em van Raij et al. (2001): acidez ativa (pH<sub>CaCl<sub>2</sub></sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>), acidez potencial (H+Al) por solução SMP, cálcio disponível (Ca) e magnésio (Mg) por resina de troca iônica / absorção atômica, potássio (K) por resina de troca iônica / emissão atômica, fósforo (P) por resina de troca iônica / colorimetria, e enxofre (S-sulfato) por fosfato de cálcio / turbidimetria, saturação por bases (V%) e potencial capacidade de troca catiônica (CTC<sub>pH7</sub>), e matéria orgânica (MO), determinada por colorimetria com ácido sulfúrico.

Para indicadores físicos, foram coletadas amostras indeformadas utilizando anéis volumétricos de ~100 cm<sup>3</sup>. As amostras foram preparadas e saturadas com água destilada por capilaridade por 48 h e submetidas a tensão da água de 30 e 100 hPa utilizando câmaras de pressão. A cada tensão, após as amostras atingirem o equilíbrio matricial, essas foram pesadas, secas em estufa a 105 ° C por 24 h e novamente pesadas para determinação da umidade gravimétrica e da densidade do solo (DS). Para determinação da densidade calculou-se a razão entre a massa do solo seco e o volume do anel. O conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ) foi calculado pela relação entre densidade do solo e umidade gravimétrica. A macro- (MaP), meso- (MeP) e microporosidade (MiP) foram calculadas de acordo com a distribuição de poros em função do raio de cada poro, sendo macroporos > 50  $\mu$ m, mesoporos entre 50-15  $\mu$ m e microporos < 15  $\mu$ m de acordo com (Cavalcanti et al., 2020). Portanto, as seguintes relações foram calculadas.

$$PT = [1 - (DS/DP)]; \text{ MaP} = PT - \theta_{30\text{hPa}}; \text{ MeP} = \theta_{30\text{hPa}} - \theta_{100\text{hPa}}; \text{ MiP} = \theta_{100\text{hPa}}.$$

Em que, PT e DP são porosidade total e densidade de partículas respectivamente,  $\theta_{30\text{hPa}}$  e  $\theta_{100\text{hPa}}$  são o conteúdo volumétrico de água nas tensões de 30 e 100 hPa respectivamente.

## 2.4 Análise de dados

Após a identificação e quantificação dos componentes edáficos foram determinados: Abundância total de organismos (indivíduos m<sup>2</sup>) e riqueza taxonômica (número de grupos de macrofauna) com os quais calculou-se índice de diversidade de Shannon (H') e Índice de Equabilidade de Pielou (J').

O índice de Shannon foi calculado por meio da equação 1.

$$H' = - \sum_{i=1}^s (p_i \log_2 p_i) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: H' = Índice de Shannon. Σ = Número total de táxons encontrados no local. p<sub>i</sub> = Abundância relativa (proporção) da espécie "i" na amostra.

O Índice de Pielou varia de 0 a 1, definido pelo padrão de equabilidade de indivíduos entre espécies ou grupos, ou seja, quanto as proporções das espécies estão igualmente distribuídas na comunidade, calculado pela equação 2.

$$J' = \frac{H'}{\ln(S)} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde J' = índice de Pielou; H' = índice de Shannon; S = número de espécies ou grupos; ln = logaritmo na base natural.

A normalidade dos dados foi testada pelo teste de Shapiro-Wilk's ( $p < 0,05$ ). Dados de abundância, índice de Shannon e índice Pielou passaram por transformação em log (x+1), para que a premissa da distribuição normal dos dados fosse obtida. Realizou-se a análise de modelos lineares de efeitos mistos entre variáveis de macrofauna edáfica e epígea (abundância, riqueza de grupos, índice de Shannon e uniformidade) e uso da terra. O uso da terra e a profundidade da camada do solo foram inseridos como efeitos fixos no modelo (sem efeito de interação). Como efeito aleatório inseriu-se local para explicar a interdependência que decorre de ter medições repetidas por local. Para cada modelo, tanto o  $r^2_{\text{marginal}}$  (proporção da variância explicada pelas variáveis moderadoras) e o  $r^2_{\text{condicional}}$  (o de todo o modelo, incluindo o efeito aleatório) foram calculados seguindo (Nakagawa & Schielzeth, 2013). Os valores de p foram obtidos por testes de razão de verossimilhança do modelo completo com o efeito em questão contra o modelo sem o efeito em questão. Todas as análises foram conduzidas usando o software R, versão 3.2.2 (R. Core, 2013), e pacotes nlme (Pinheiro, Bates, DebRoy, & Sarkar,

2014), piecewiseSEM (Lefcheck, 2016) vegan (Oksanen, Blanchet, & Kindt, 2016) e ggplot2 (Wickham, 2009).

Por fim, efetuou-se a análise de correlação linear de Pearson entre os dados da macrofauna (i.e., Abundância, Diversidade de Shannon, principais macroinvertebrados) e os atributos químicos e físicos do solo (i.e., pH do solo, macronutrientes, CTC, Carbono da biomassa microbiana, Nitrogênio da biomassa microbiana, densidade e porosidade do solo).





### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Frequência da macrofauna.

Um total de 12 táxons da macrofauna do solo foram identificados entre edáfica e epígea, sendo eles: Aranae, Chilopoda, Coleoptera, Dermaptera, Diplopoda, Diptera, Formicidae, Hemiptera, Hymenoptera, Isoptera, Oligochaeta, Orthoptera. Além desses grupos frequentes nos diferentes usos da terra, também foram encontrados, alguns indivíduos com frequência igual a 1 das ordens: Blattodea, Chilopoda, Diplopoda, Lepdoptera, Mantodea, Neuroptera, os quais foram agrupados como Outros adotando como nota de corte organismos encontrados com frequência igual a 1 (Tabelas 5 e 6). Os grupos Orthoptera e Dermaptera foram identificados exclusivamente na superfície do solo (macrofauna epígea) (Tabela 6).

No solo argiloso, a riqueza da macrofauna edáfica, para camada de 0-30 do solo, consistiu em nove grupos (Tabela 5), dos quais sete estavam presentes na vegetação nativa e pastagem, enquanto cinco grupos foram identificados na área de cana palha e, seis grupos na cana soca. Já no solo arenoso, foram identificados quatro grupos (Coleoptera, Oligochaeta, Aranae e Hemiptera), três deles encontrados em vegetação nativa com exclusividade da Ordem Aranae não encontrada nos demais usos da terra. Somente a Ordem Coleoptera foi identificada na pastagem, compondo o único grupo encontrado na camada de 0-30 cm nessa área. Na área de cana planta foram identificados os grupos Coleoptera e Hemiptera. Os grupos Coleoptera e Oligochaeta foram os dois grupos presentes nas áreas de cana soca e cana soca com palha. A pastagem no solo argiloso foi o local individual com maior número médio indivíduos em subsuperfície (708) com predominância da Subclasse Oligochaeta ( $564 \pm 315$ ) e, no solo arenoso a vegetação nativa teve a maior média de indivíduos (112). Em ambos os solos o menor número médio de indivíduos na camada de 0-30 cm foi na cana soca (Tabela 5).

No solo argiloso, todos os grupos estavam presentes na vegetação nativa, oito grupos foram identificadas na pastagem, nove na cana planta enquanto na área de cana soca foram encontrados apenas seis grupos. No solo arenoso, o maior número de táxons (nove) foi identificado na área de pastagem, a vegetação nativa comportou sete grupos. Oito grupos foram encontrados na cana planta, sete grupos na cana soca e, na área de cana soca com palha oito grupos foram identificados. O maior número médio de indivíduos na superfície correspondeu a área de pastagem (52,8 em solo argiloso e 68,4 no solo arenoso) com predominância dos grupos Coleoptera e Formicidae e as menores médias foram encontradas na vegetação nativa no solo argiloso (26,8), e na cana soca no solo arenoso (19,75) (Tabela 6).



**Tabela 5.** Abundância (indivíduos m<sup>-2</sup>) e desvio padrão dos grupos da macrofauna do solo na camada de 0-30 cm.

Táxon	Nome Comum	Nível Taxonômico	Argiloso				Arenoso				
			Vegetação Nativa	Pastagem extensiva	Cana Planta	Cana Soca	Vegetação Nativa	Pastagem extensiva	Cana Planta	Cana Soca	Cana Soca (palha)
Coleoptera	Besouros	Ordem	56±14	108±49	12±4	60±17	104±36	32±12	24±11	8±5	68±27
Oligochaeta	Minhocas	Subclasse	32±10	564±315	168±97	24±8	4±2	0±0	0±0	4±2	48±14
Aranae	Aranhas	Ordem	16±9	0±0	4±2	0±0	4±2	0±0	0±0	0±0	0±0
Chilopoda	Centopeias	Classe	48±28	4±2	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0
Diplopoda	Piolhos-de-cobra	Classe	80±46	4±2	0±0	4±2	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0
Diptera	Moscas	Ordem	12±7	0±0	0±0	4±2	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0
Formicidae	Formigas	Família	16±9	12±7	12±4	16±6	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0
Hemiptera	Percevejos	Ordem	0±0	12±7	4±2	0±0	0±0	0±0	40±12	0±0	0±0
Isoptera	Cupins	Subordem	0±0	4±2	0±0	60±28	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0
Total			260	708	264	168	112	32	64	12	116
Riqueza (nº de táxons)			7	7	5	6	3	1	2	2	2

N=4

**Tabela 6.** Abundância (indivíduos por armadilha) e desvio padrão dos grupos da macrofauna epígea.

Táxon	Nome Comum	Nível Taxonômico	Argiloso				Arenoso				
			Vegetação Nativa	Pastagem extensiva	Cana Planta	Cana Soca	Vegetação Nativa	Pastagem extensiva	Cana Planta	Cana Soca	Cana Soca (palha)
Coleoptera	Besouros	Ordem	0,6±0,8	18,0±11,4	9,6±6,9	11,2±13,7	34,6±16,9	25,0±6,3	6,6±2,3	12,8±12,4	22,4±16,2
Aranae	Aranhas	Ordem	1,6±1,1	2,2±2,1	1,6±1,5	1,4±1,3	1,4±0,5	2,2±1,7	0,6±0,8	0,3±0,5	2,4±1,9
Hymenoptera	Vespas	Ordem	0,4±0,5	0±0	3,8±8,4	0±0	0±0	0,2±0,4	0±0	1,3±1,5	0±0
Diptera	Moscas	Ordem	0,6±1,3	0,6±1,3	0,2±0,4	0,2±0,4	0,4±0,5	1,8±1,6	0,8±0,8	0,8±0,9	1,2±1,3
Formicidae	Formigas	Família	15,0±8,3	23,6±9,2	8,8±7,4	13,4±11,0	17,2±7,4	18,2±8,7	5,0±3,6	1,8±2,3	27,6±30,8
Hemiptera	Percevejos	Ordem	0,2±0,4	0±0	0,6±0,8	0±0	0,2±0,4	0,8±0,8	1,6±3,0	0±0	0,4±0,5
Isoptera	Cupins	Subordem	0,4±0,8	0,2±0,4	1,2±2,1	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0	0±0
Orthoptera	Gafanhotos	Ordem	3,6±4,0	2,4±1,9	3,0±2,8	8,0±6,1	0±0	16,0±13,5	9,8±6,4	0,8±0,9	5,2±1,9
Dermaptera	Tesourinha	Ordem	4,0±3,3	5,2±2,1	1,2±0,8	2,8±2,7	15,8±9,8	1,2±1,3	0,2±0,4	2,3±1,7	1,8±2,0
Outros			0,4±0,2	0,6±0,1	0±0	0±0	2,4±0,8	3,0±1,5	0,4±0,2	0±0	1,2±3,3
Total			26,8	52,8	30	37	72	68,4	25	19,75	62,2
Riqueza (n° de taxóns)			10	8	9	6	7	9	8	7	8

N=5

### 3.2 Abundância, riqueza, diversidade e uniformidade da macrofauna edáfica.

A mudança de uso da terra e o aumento da profundidade do solo afetou a abundância da macrofauna edáfica (Uso da terra  $p=0,1191$ ; Profundidade  $p<0,0001$ ;  $r^2_{\text{marginal}}= 0,28$ ,  $r^2_{\text{condicional}}= 0,33$ ) (Fig. 8–A). Em relação a área de VN, considerada área de referência sem perturbação antrópica, a abundância total ( $\log + 1$ ) da macrofauna foi menor na PA ( $-1,53 \pm 0,97$ ,  $p=0,1175$ ), CAp ( $-1,08 \pm 0,97$ ,  $p=0,2686$ ), expressivamente menor em CAs ( $-2,59 \pm 0,97$ ,  $p=0,0092$ ) e para CAs-p inferior em ( $-1,67 \pm 1,19$ ,  $p=0,1643$ ). O aumento da profundidade do solo favoreceu a redução dos organismos na camada 10–20 cm ( $-1,15 \pm 0,42$ ;  $p= 0,0073$ ) e 20–30 cm ( $-1,30 \pm 0,42$ ;  $p=0,0025$ ) em comparação a camada superficial de 0–10 cm (Fig. 8).

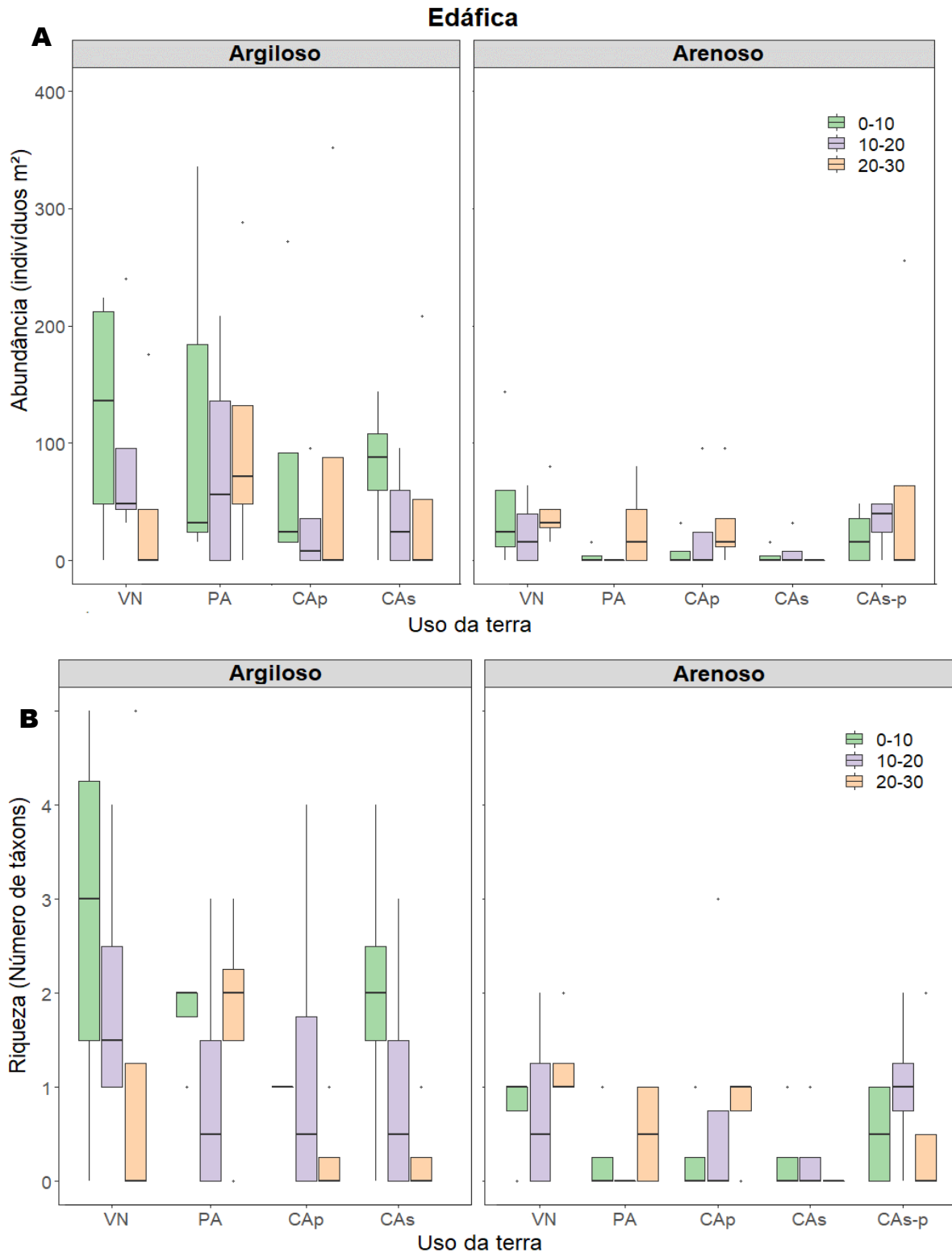
A riqueza absoluta de macroinvertebrados edáficos também foi alterada com a mudança de uso da terra e ocorreu redução em profundidade (Uso da terra  $p=0,0434$ ; Profundidade  $p<0,0001$ ;  $r^2_{\text{marginal}}= 0,29$ ,  $r^2_{\text{condicional}}= 0,33$ ) (Fig. 8-B). A riqueza de organismos em relação a vegetação nativa foi inferior em todos os usos da terra, PA ( $-1,87 \pm 0,51$ ,  $p=0,0004$ ), CAp ( $-1,37 \pm 0,51$ ,  $p=0,0088$ ), CAs ( $-1,87 \pm 0,51$ ,  $p=0,0004$ ), CAs-p ( $-1,87 \pm 0,62$ ,  $p=0,0037$ ). A maior riqueza de organismos estava presente na camada de 0-10 cm com redução significativa nas camadas de 10-20 cm ( $-2,51 \pm 0,51$ ;  $p= 0,0000$ ) e 20–30 cm ( $-2,00 \pm 0,51$ ;  $p= 0,0002$ ) (Fig. 8-B).

A diversidade da fauna do solo representada pelo “índice de diversidade de Shannon” foi afetada com a mudança de uso da terra e com aumento da profundidade. Na macrofauna edáfica, quanto mais profunda a camada do solo, menores índices de diversidade ( $\log + 1$ ) foram constatados (Uso da terra  $p=0,0434$ ; Profundidade  $p=0,0001$ ;  $r^2_{\text{marginal}}= 0,30$ ,  $r^2_{\text{condicional}}= 0,34$ ) (Tabela 7) Na camada de 10-20 cm do solo encontrou-se menor diversidade de organismos em relação à camada superficial ( $-1,57 \pm 0,30$   $p<0,0001$ ), assim como, na camada 20-30 cm ( $-1,46 \pm 0,30$ ,  $p<0,0001$ ).

O Índice de Equabilidade de Pielou, o qual representa a uniformidade da distribuição dos indivíduos dentre os grupos existentes da macrofauna do solo, não sofreu alterações devido a mudança de uso da terra, somente reduções com aumento da profundidade (Profundidade  $p=0,0001$ ;  $r^2_{\text{marginal}}= 0,25$ ,  $r^2_{\text{condicional}}= 0,30$ ) (camada 10-20 cm redução de  $-0,11 \pm 0,02$   $p<0,0001$  e camada 20-30 cm  $-0,11 \pm 0,02$   $p<0,0001$ ) havendo predominância do grupo Coleoptera (Tabela 7).

Ao visualizar graficamente os dados de abundância e riqueza (Fig. 8), nota-se que a área de PA teve alta abundância relativa de organismos em relação as áreas de cana-de-açúcar, no entanto, quando comparada aos dados de diversidade e uniformidade da fauna edáfica (Tabela

7), a PA apresentou menor índice de diversidade ( $-0,50 \pm 0,19$ ,  $p=0,0113$ ) em relação a VN, confirmando a dominância de grupos específicos nas áreas (Oligochaeta e Coleoptera) enquanto a área de CAs apresentou diversidade inferior a VN em  $-0,36 \pm 0,19$ ,  $p=0,0688$ , marginalmente significativo (Tabela 7).



**Figura 8** - Abundância e riqueza da macrofauna edáfica em função do uso da terra em dois locais (Argiloso e Arenoso). (A) Abundância absoluta de organismos (B) Riqueza absoluta de organismos representados

gráficamente como valores medianos (linhas grossas nas caixas), intervalos interquartis e outliers (pontos) para  $n = 4$ .

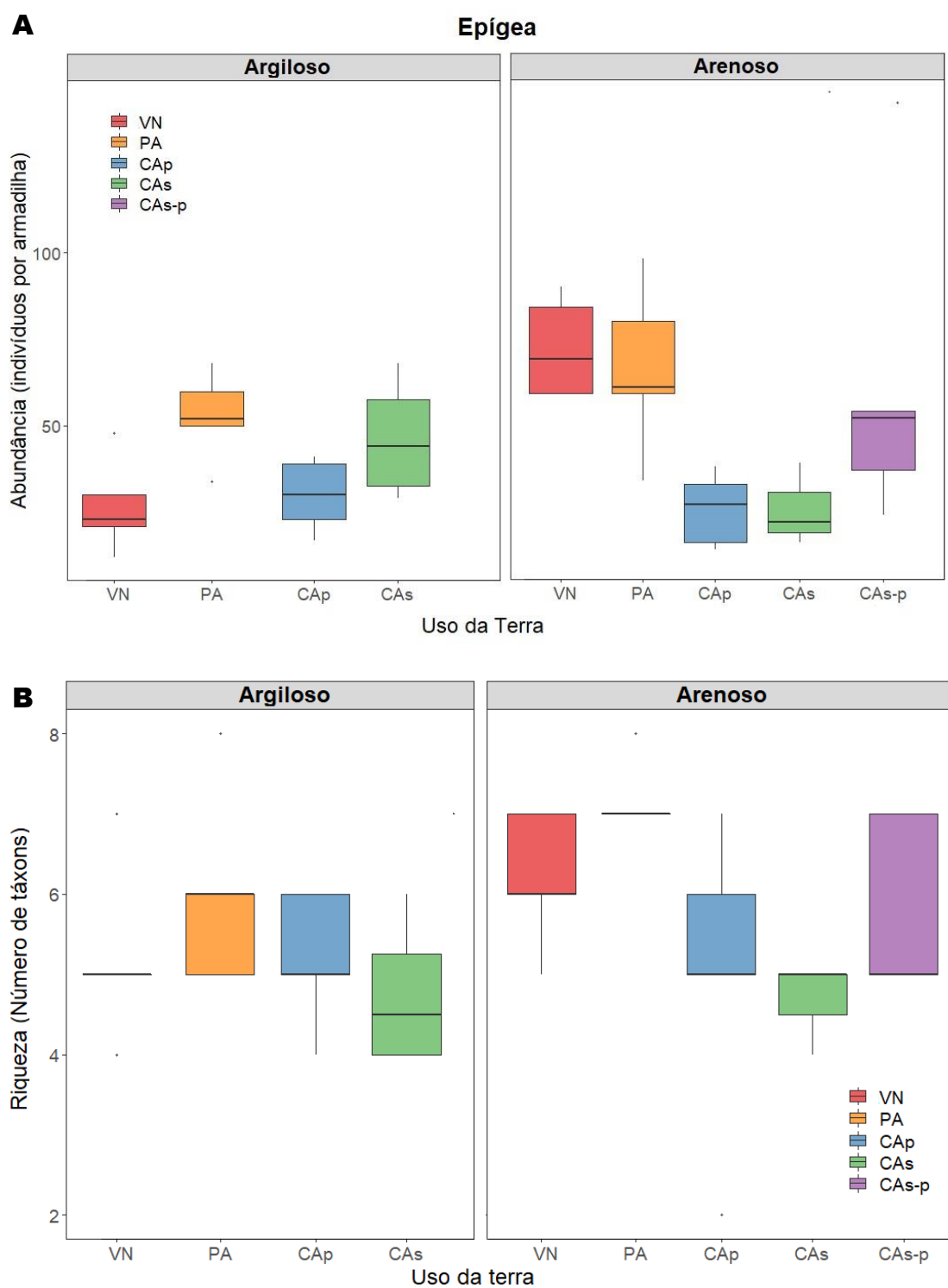
**Tabela 7** – Diversidade de Shannon e índice Pielou (equabilidade) da macrofauna edáfica em função do uso da terra em dois locais (Argiloso e Arenoso).

	Argiloso				Arenoso					
	VN	PA	CAp	CAs	VN	PA	CAp	CAs	CAs-p	
----- 0-10 cm -----										
Shannon	1,29±0,10	0,19±0,18	0,33±0,66	0,49±0,63	0,14±0,28	0,00±0,00	0,22±0,43	0,00±0,00	0,17±0,34	
Pielou	0,59±0,04	0,09±0,08	0,15±0,30	0,22±0,28	0,08±0,15	0,00±0,00	0,12±0,24	0,00±0,00	0,10±0,19	
----- 10-20 cm -----										
Shannon	0,00±0,00	0,32±0,39	0,00±0,00	0,39±0,45	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,16±0,31	
Pielou	0,00±0,00	0,15±0,17	0,00±0,00	0,18±0,20	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,09±0,17	
----- 20-30 cm -----										
Shannon	0,30±0,34	0,43±0,52	0,00±0,00	0,00±0,00	0,17±0,34	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	
Pielou	0,14±0,15	0,20±0,23	0,00±0,00	0,00±0,00	0,10±0,19	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	0,00±0,00	
<i>Shannon</i>				<i>Pielou</i>						
Uso da terra	$p=0,0434$			Uso da terra	$p=0,5276$					
Profundidade	$p=0,0001$			Profundidade	$p=0,0001$					
$r^2_{\text{marginal}}$	0,29			$r^2_{\text{marginal}}$	0,25					
$r^2_{\text{condicional}}$	0,33			$r^2_{\text{condicional}}$	0,30					

### 3.3 Abundância, riqueza, diversidade e uniformidade da macrofauna epígea.

A abundância da macrofauna epígea foi afetada pela mudança de uso da terra epígea (Uso da terra  $p=0,0176$ ;  $r^2_{\text{marginal}}= 0,22$ ,  $r^2_{\text{condicional}}= 0,32$ ) (Fig. 9-A). A menor abundância absoluta de macroinvertebrados ( $\log + 1$ ) foi encontrada na área de CAs com  $-0,43 \pm 0,17$ ,  $p=0,0161$  em relação a VN. A riqueza de táxons também sofreu alterações com a mudança de uso da terra (uso da terra  $p=0,0124$ ;  $r^2_{\text{marginal}}= 0,24$ ,  $r^2_{\text{condicional}}= 0,35$ ) (Fig. 9-B) e, apresentou comportamento similar a abundância, sendo inferior na área de CAs ( $-0,98 \pm 0,54$ ,  $p=0,0798$ ) marginalmente significativo comparado a VN. Para os demais usos não houveram reduções expressivas ( $p>0,05$ ).

Os Índices de diversidade de Shannon e equabilidade de Pielou sofrem alterações devido a mudança de uso da terra e reduções com aumento da profundidade (diversidade de organismos ( $\log + 1$ ): Uso da terra  $p=0,0477$ ;  $r^2_{\text{marginal}}= 0,24$ ,  $r^2_{\text{condicional}}= 0,35$ ; uniformidade dos organismos ( $\log + 1$ ): uso da terra  $p=0,0533$ ;  $r^2_{\text{marginal}}= 0,17$ ,  $r^2_{\text{condicional}}= 0,29$ . Houve redução de diversidade e uniformidade de organismos na CAs em relação a vegetação nativa, fato que não ocorreu para os demais usos da terra (Diversidade de Shannon  $-0,08 \pm 0,03$   $p=0,0195$ , Equabilidade de Pielou  $-0,04 \pm 0,01$   $p=0,0248$ ) (Tabela 8).



**Figura 9** - Abundância e riqueza da macrofauna epígea em função do uso da terra em dois locais (Argiloso e Arenoso). (A) Abundância absoluta de organismos (B) Riqueza absoluta de organismos representados graficamente como valores medianos (linhas grossas nas caixas), intervalos interquartis e outliers (pontos) para  $n = 4$ .



**Tabela 8** – Diversidade de Shannon e índice Pielou (equabilidade) da macrofauna epígea em função do uso da terra em dois locais (Argiloso e Arenoso).

	Argiloso				Arenoso				
	VN	PA	CAp	CAs	VN	PA	CAp	CAs	CAs-p
Shannon	1,26±0,18	1,24±0,18	1,27±0,25	1,23±0,05	1,19±0,20	1,37±0,14	1,28±0,36	0,77±0,49	1,21±0,16
Pielou	0,49±0,07	0,48±0,07	0,49±0,10	0,48±0,02	0,44±0,07	0,51±0,06	0,47±0,13	0,28±0,18	0,44±0,06
<i>Shannon</i>		<i>Pielou</i>							
Uso da terra	$p=0,0477$	Uso da terra	$p=0,0533$						
$r^2_{\text{marginal}}$	0,18	$r^2_{\text{marginal}}$	0,17						
$r^2_{\text{condicional}}$	0,29	$r^2_{\text{condicional}}$	0,29						

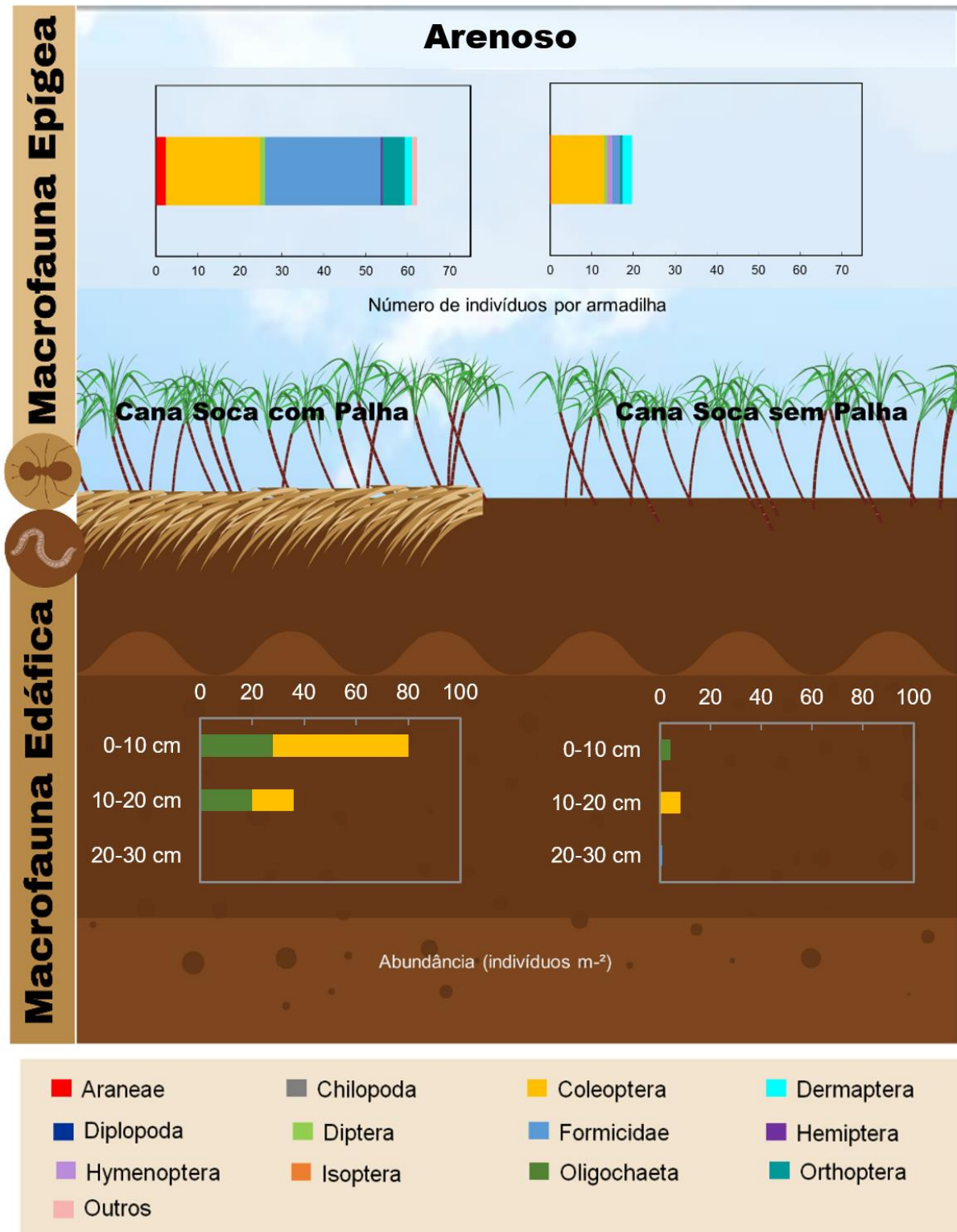
### **3.4 Distribuição e abundância de organismos.**

Avaliando de forma integrada a composição da macrofauna edáfica, epígea e a distribuição dos organismos em profundidade (Fig. 10), pode-se observar maiores valores de abundância da macrofauna epígea na VN e PA para ambos os solos. No entanto, na área de PA podemos constatar a predominância de alguns grupos (Formicidae e Coleoptera), ainda, em solo arenoso houve destaque do grupo Orthoptera na área. As áreas de cana-de-açúcar apresentaram visivelmente, menos organismos que a VN e PA para ambos os solos. A camada superior de 0-10 cm do perfil amostral do solo abrigou a grande maioria dos organismos, correspondendo, em média, 70% dos organismos encontrados em cada uso da terra. Na macrofauna edáfica, notamos grande riqueza de organismos na VN no solo argiloso, com redução de táxons nos demais usos. Em solo argiloso, houve a predominância de Oligochaeta na PA e CAp, já na área de CAs observou-se maior riqueza, sendo encontrado com diversos grupos taxonômicos como Coleoptera, Formicidae, Diplopoda. A redução de organismos com o aumento da profundidade do solo ficou evidente em todos os usos da terra (Fig. 10).



**Figura 10-** Distribuição vertical da abundância por grupo da macrofauna edáfica e epígea.

Considerando o manejo da palhada na área de cana soca em solo arenoso, observou-se maior abundância e riqueza de organismos na CAS-p em relação a CAS principalmente da macrofauna epígea com predominância dos grupos Coleoptera e Formicidae. Vale destacar que a presença de palha na superfície comportou maior abundância de predadores como o grupo Araneae (Fig. 11).



**Figura 11-** Distribuição vertical da abundância por grupo da macrofauna edáfica e epígea em tratamento.

### 3.5 Relação entre macrofauna e atributos de químicos, físicos e microbiológicos

A abundância da macrofauna e diversidade de organismos apresentaram correlação positiva para MO, CTC, CBM, NBM, MaP e PT, e correlação negativa para atributos físicos

como Ds e MeP ( $p < 0,05$ ) (Tabela 9). A matéria orgânica do solo, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana e presença de macroporos estão associados positivamente a todos os artrópodes identificados no estudo. O grupo Oligochaeta teve correlação positiva com Ca e Mg, e atributos biológicos como matéria orgânica, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana ( $p < 0,05$ ). A abundância de formigas (Formicidae) mostrou-se relacionada a presença de K e Mg ( $p < 0,05$ ). Os grupos Diplopoda, Chilopoda e Aranae apresentaram correlações semelhantes, em que a presença de K, H+Al estiveram relacionados a presença desses táxons ( $p < 0,05$ ). A densidade do solo tem correlação negativa com todos os organismos identificados, quanto maior a densidade do solo menor será a presença desses grupos, principalmente Formicidae, Diplopoda, Chilopoda e Aranae ( $p < 0,05$ ). A presença de organismos condicionou porosidade ao solo, e, os microporos estiveram correlacionados com a presença de indivíduos da família Formicidae (Tabela 9).

**Tabela 9** - Correlação entre macrofauna, atributos químicos, físicos e biológicos do solo.

	Atributos do Solo*																	
	pH	MO	P	S	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V(%)	CBM	NBM	Ds	MaP	MeP	MiP	PT
<b>Abundância</b>	0,138	<b>0,394</b>	0,076	0,009	0,156	<b>0,284</b>	<b>0,371</b>	0,048	<b>0,324</b>	<b>0,199</b>	<b>0,184</b>	<b>0,471</b>	<b>0,445</b>	<b>-0,215</b>	<b>0,236</b>	<b>-0,195</b>	0,176	<b>0,217</b>
<b>Diversidade de Shannon</b>	-0,042	<b>0,387</b>	0,113	<b>0,220</b>	<b>0,197</b>	0,093	0,135	<b>0,332</b>	0,114	<b>0,380</b>	-0,059	<b>0,537</b>	<b>0,404</b>	<b>-0,382</b>	<b>0,293</b>	<b>-0,204</b>	<b>0,269</b>	<b>0,364</b>
<b>Oligochaeta</b>	0,171	<b>0,280</b>	-0,032	-0,022	0,088	<b>0,268</b>	<b>0,364</b>	-0,041	<b>0,308</b>	0,104	<b>0,212</b>	<b>0,357</b>	<b>0,341</b>	-0,119	0,141	-0,152	0,130	0,126
<b>Coleoptera</b>	-0,070	0,125	0,100	0,085	0,065	0,025	0,022	0,062	0,028	0,074	-0,044	0,087	0,061	-0,117	<b>0,215</b>	-0,051	0,004	0,145
<b>Formicidae</b>	0,078	<b>0,339</b>	0,062	0,153	<b>0,239</b>	0,199	<b>0,258</b>	0,142	<b>0,228</b>	<b>0,246</b>	0,107	<b>0,392</b>	<b>0,426</b>	<b>-0,211</b>	<b>0,156</b>	-0,184	<b>0,210</b>	<b>0,196</b>
<b>Diplopoda</b>	-0,139	<b>0,399</b>	0,139	0,031	<b>0,362</b>	-0,046	0,026	<b>0,386</b>	-0,011	<b>0,376</b>	-0,147	<b>0,586</b>	<b>0,543</b>	<b>-0,349</b>	<b>0,303</b>	-0,123	0,156	<b>0,314</b>
<b>Chilopoda</b>	-0,134	<b>0,311</b>	0,067	-0,041	<b>0,223</b>	-0,070	0,003	<b>0,346</b>	-0,038	<b>0,324</b>	-0,143	<b>0,440</b>	<b>0,402</b>	<b>-0,295</b>	<b>0,224</b>	-0,111	0,117	<b>0,218</b>
<b>Aranae</b>	-0,141	<b>0,348</b>	0,088	-0,047	<b>0,324</b>	-0,058	0,041	<b>0,344</b>	-0,014	<b>0,333</b>	-0,146	<b>0,533</b>	<b>0,515</b>	<b>-0,331</b>	<b>0,327</b>	-0,077	0,077	<b>0,288</b>

\*Unidades: pH:  $\text{pHCaCl}_2$  0,01 mol L<sup>-1</sup>; MO matéria orgânica (g dm<sup>-3</sup>); P: Fósforo (mg dm<sup>-3</sup>); S: enxofre (mg dm<sup>-3</sup>); K: potássio (mmolc dm<sup>-3</sup>); Ca: cálcio (mmolc dm<sup>-3</sup>) e Mg: magnésio (mmolc dm<sup>-3</sup>); H+Al: acidez potencial (mmolc dm<sup>-3</sup>); SB: Soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions (mmolc.dm<sup>-3</sup>); V(%): Saturação da CTC por bases; CBM: Carbono da biomassa microbiana; NBM: Nitrogênio da biomassa microbiana; Ds: Densidade do solo; MaP: Macroporosidade do solo; MeP: Mesoporosidade do solo; MiP: Microporosidade do solo; PT: Porosidade total.

Valores em negrito representam  $p < 0,05$ .

#### 4. DISCUSSÃO

A macrofauna do solo é sensível a mudanças de uso e manejo da terra (Lavelle et al., 2006). Com isso, as de cultivo intensivo com práticas agronômicas realizadas de forma inadequada podem ter impacto prejudicial nas comunidades da macrofauna. O preparo intensivo do solo reduz a estabilidade de microagregados, a estabilização da matéria orgânica e provoca alterações no microclima do solo, fazendo com que haja redução de cobertura, desorganização física dos habitats que contribui para redução da abundância dos principais grupos da macrofauna (Lemessa et al., 2015; Sofo, Mininni, & Ricciuti, 2020).

Pode-se notar que áreas com menor perturbação antrópica como a VN apresentaram maior abundância e riqueza de táxons (Fig. 8). As pastagens fornecem habitat e alimento para permanência de alguns grupos da macrofauna do solo, ao contrário de culturas anuais (Decaëns et al., 2004). Já nas áreas de cana-de-açúcar, onde o sistema de manejo intensivo predomina, pode ocorrer o agravamento da perda da biodiversidade do solo (Franco et al., 2016; Menandro et al., 2019; Oliveira et al., 2019). Esses estudos em áreas de cana-de-açúcar têm sido desenvolvidos para compreender as alterações provocadas pelo manejo da cultura sobre a macrofauna do solo. Porém, muitos destes estudos avaliam a macrofauna do solo através de coleta de monólitos ou armadilhas, havendo pouca integração entre eles (Abreu et al., 2014; Franco et al., 2016; Menandro et al., 2019). Como resultado, têm-se uma visão limitada do impacto da mudança de uso-de-terra e do manejo agrícola sobre os organismos edáficos ou epígeos. Por exemplo, quando se utiliza armadilhas tipo “pitfall”, não é possível avaliar com clareza os impactos sobre os organismos que vivem permanentemente dentro do solo. Sendo assim, é de grande importância estudos como este, que buscam avaliar os organismos da macrofauna com diferentes comportamentos, desde aqueles que predominantemente habitam a interface solo-serapilheira, até aqueles que vivem permanentemente dentro do solo, uma vez que as práticas agrícolas podem alterar a composição e diversidades desses grupos em diferentes graus de intensidade, por meio das mudanças de habitat, disponibilidade de alimentos e competição.

##### 4.1 A mudança de uso da terra e os organismos da macrofauna.

As áreas de vegetação nativa, tanto para macrofauna edáfica quanto epígea, apresentaram alta abundância e diversidade (Fig. 8 e 9). A presença de grupos predadores como Aranae, Chilopoda, Diplopoda, foi expressiva na vegetação nativa (Fig. 10). Os Chilopodas e Diplopodas são artrópodes dominantes em solos florestais e tendem a ser mais abundantes e

diversificados em habitats úmidos e predominam horizontes superficiais do solo. A maioria das espécies de milípedes (que englobam chilopodas e diplopodas) são detritívoros, se alimentam de matéria vegetal morta, como serapilheira e madeira (Hopkin & Read, 1992).

A baixa umidade no solo arenoso e menor acúmulo de material vegetal na vegetação nativa desse local explica a ausência desses organismos em solo arenoso. No solo arenoso, na vegetação nativa ocorreu predominância dos grupos Coleoptera e Araneae (Fig 10). A presença de Coleoptera pode estar associada a solos com maior oferta de matéria orgânica, principalmente resíduos vegetais com diferentes relações C/N, em que a taxa de decomposição é variável, pois além de servir como alimento, fornecem abrigo e proteção à esses invertebrados (Pompeo et al., 2020). As aranhas possuem hábitos alimentares de predadores generalistas edáficos, e com o manejo do solo ou mudança do uso da terra ocorre a modificação do habitat e redução da disponibilidade de presas (Argañaraz et al., 2020). A presença predominante desses grupos corrobora outros estudos, em que os grupos Coleoptera, Formicidae e Araneae foram os mais comuns encontrados, em que a presença de aranhas esteve associada a cobertura de árvores na paisagem e cobertura não agrícola aberta como a pastagem (Lemessa et al., 2015).

A pastagem foi marcada por grupos de organismos como Formicidae, Coleoptera, e pontos amostrais com alta taxa de Oligochaeta. A família Formicidae esteve presente em todos os usos do solo (Fig. 10 e 11). As formigas possuem ampla adaptabilidade de espécies e diversos hábitos alimentares (Esquivel et al., 2019). Algumas espécies apresentam maior adaptabilidade em habitats mais simplificados, como pastagens, devido aos seus baixos requisitos ecológicos (Delabie et al., 2009). No solo argiloso, um ponto amostral que se sobressaiu aos demais com grande abundância de minhocas tornando esse grupo o mais abundante da área de pastagem. A concentração de Oligochaeta em alguns pontos do solo pode ser explicado pelo acúmulo de carbono provindo do esterco de gado no sistema de pastagem (Schon, Mackay, Gray, Dodd, & van Koten, 2015). A presença de minhocas traz ganhos positivos ao solo, pois esses invertebrados constroem estruturas biogênicas por meio de bioporos, participando da estabilidade estrutural de solos tropicais (Nadolny et al., 2020). A elevada abundância de Oligochaeta em áreas de pastagem também foi confirmada por Franco et al. (2016).

Os grupos da macrofauna do solo, considerados “engenheiros do ecossistema” (minhocas, formigas e cupins) juntamente com os microrganismos têm papel fundamental na agregação de partículas do solo em agregados biogênicos (Bottinelli et al., 2015; Brussaard et al., 2007). Alguns estudos têm usado os engenheiros do ecossistema como indicadores biológicos de mudança de uso da terra em pastagens tropicais, devido à alta sensibilidade a perturbações no solo (Vazquez et al., 2020; Velásquez et al., 2012). O aumento da perturbação



do solo pode contribuir para a redução de organismos ao aumentar a variação antrópica na biota do solo (Morriën et al., 2017). Com o passar dos anos, a pastagem torna-se um ambiente com menor perturbação antrópica, quando comparado com as áreas de cana-de-açúcar de recente conversão, contendo maior abundância de invertebrados. Outros trabalhos confirmam que o tamanho da comunidade da macrofauna em solos tropicais tende a aumentar com o tempo após a conversão da vegetação nativa em pastagem (Franco et al., 2016; Lavelle et al., 2014; Vazquez et al., 2020).

A conversão da cana-de-açúcar sobre áreas de pastagem comportou menor abundância da macrofauna, principalmente epígea, com destaques dos grupos Coleoptera e Formicidae que predominaram na pastagem (Fig. 9 e 10). A perturbação gerada pelo preparo do solo pode ser prejudicial aos organismos principalmente aqueles que circulam a superfície do solo. Em ambientes simplificados, como é o caso da monocultura, a cobertura do solo apresenta características inferiores à de ambientes complexos, nessa situação ocorre baixa concentração de nutrientes, altos teores de polifenóis totais o que acarreta na redução de grupos taxonômicos da macrofauna (Baretta et al., 2014). Nessas áreas de monocultura é comum que alguns grupos específicos mais adaptados como formigas, capazes de colonizar locais de baixo recursos, predominem o ambiente (Esquivel et al., 2019)

De modo geral, o cultivo de cana soca impactou negativamente a abundância, riqueza taxonômica, diversidade e uniformidade da macrofauna (Fig. 8 e 9; Tabela 7 e 8), confirmando nossa hipótese. O manejo da cultura da cana-de-açúcar é realizado de forma intensa com preparo do solo e uso de insumos químicos. A perturbação da área na cana soca é constante com as práticas de manejo do solo, pragas e doenças, além da colheita com a entrada de máquinas agrícolas e a reforma do canavial. Observou-se que, com a redução da abundância e diversidade de organismos na cana soca, os grupos Coleoptera e Formicidae voltaram a predominar principalmente quando observamos a fauna epígea, como ocorreu na área de pastagem (Fig. 10). Esses grupos estão entre os mais diversos artrópodes em ambiente terrestre e algumas espécies são mais adaptadas a ambientes simplificados (Bottinelli et al., 2015; Delabie et al., 2009). Além disso, algumas espécies de coleóptera são considerados insetos pragas nos canaviais como a broca da cana-de-açúcar *Migdolus fryanus* (Westwood, 1863) (Coleoptera: Vesperidae) (Machado & Habib, 2006).

A redução da macrofauna nos solos da cana-de-açúcar pode afetar atributos físicos e químicos do solo. Grupos como formigas, cupins e minhocas desempenham um papel fundamental na estruturação e estabilização dos solos. Participam da agregação e aumento da macroporosidade do solo, conforme correlação significativa observada na tabela 9, afetando a

infiltração e distribuição de água no perfil, além de criar habitats para organismos, incluindo microrganismos e planta (Baretta et al., 2011; Culliney, 2013; P. Lavelle et al., 2006; Samson et al., 1994). Sabe-se que os macroinvertebrados exercem papel fundamental na fragmentação dos resíduos vegetais e na regulação de processos biológicos do solo além de serem fonte de biomassa para os microrganismos responsáveis por todos os processos de disponibilização de nutrientes (Petersen & Luxton, 1982). A cultura da cana-de-açúcar esteve ligada a menores teores de matéria orgânica, assim como menores índices de abundância e diversidade (Tabela 2). O cultivo intensivo da cultura da cana-de-açúcar pode apresentar efeitos negativos aos atributos físicos e biológicos como maior compactação do solo, degradação estrutural e menor armazenamento de carbono orgânico do solo que estão intimamente ligados a menor abundância e diversidade da macrofauna do solo (Cherubin et al., 2016).

#### **4.2 O impacto da remoção da palhada da cana-de-açúcar na macrofauna**

Na área de cana-de-açúcar soca, no solo arenoso, onde avaliou-se remoção e não remoção da palhada do solo, notou-se um grande aumento de abundância e diversidade de organismos epígeos na presença de palhada no solo, principalmente predadores como Araneae (Fig. 11). Sistemas onde há presença de resíduos vegetais sobre o solo favorecem maior abundância de grupos de predadores, em relação a sistemas em que não há cobertura (Silva et al., 2008). As respostas da macrofauna edáfica à remoção da palha são menos expressivas nos solos arenosos o que confirma a baixa variação da fauna edáfica (Abreu et al., 2014; Menandro et al., 2019). Outros trabalhos que revelaram que a remoção total da palhada do solo prejudica a macrofauna, resultando na redução da abundância, riqueza e diversidade da macrofauna do solo (Portilho et al., 2011; Menandro et al., 2019). Provavelmente a maior abundância e diversidade de macrofauna epígea na palha esteja associada a maior diversidade de abrigo a habitat no local.

A deposição da palha na superfície do solo contribui para entrada de carbono no solo e, diversificação de habitat tornando local heterogêneo, de preferência para os organismos de superfície, como abrigo, nidificação, alimentação (da Costa & Drescher, 2018; Portilho et al., 2011).

#### **4.3 Distribuição da macrofauna edáfica no perfil do solo**

A grande maioria da macrofauna edáfica concentrou-se na camada superficial do solo (0-10 cm) (Fig. 12), fato que também ocorreu em outros estudos (Vasconcelos et al., 2020;

Franco et al., 2016). Com o aumento da profundidade nota-se redução gradativa da matéria orgânica do solo em todos os usos independente do solo (Tabela 2). A matéria orgânica do solo tem correlação positiva com abundância e diversidade de organismos (Tabela 9). Outros estudos também constataram relações entre a redução da abundância de organismos com a redução de estoques de carbono orgânico no solo e, a dependência da profundidade do solo para o estoque de carbono (Franco et al., 2020). A distribuição vertical da macrofauna edáfica pode estar atrelada ao horizonte superficial devido a deposição da liteira sobre a superfície do solo e ainda, a menor densidade do solo na superfície com maior presença de oxigênio.

#### **4.4 Correlações da macrofauna aos indicadores físicos químicos e biológicos.**

Os teores de matéria orgânica do solo estiveram relacionados a distribuição vertical da macrofauna edáfica, em que maior abundância e diversidade de organismos ocorreu em superfície (0-10 cm) (Tabela 2). Ficou evidente e contrastante a diversidade de macrofauna edáfica em solo argiloso e arenoso (Fig. 10 e 11). O solo argiloso apresentou aproximadamente mais de 50% de matéria orgânica em relação ao solo arenoso (Tabela 2) fato que pode estar ligado a menor abundância da macrofauna edáfica no solo arenoso.

A abundância e diversidade da macrofauna apresentou correlações positivas com atributos biológicos como carbono e nitrogênio da biomassa microbiana (Tabela 9). Sabe-se que o início do processo de decomposição do material orgânico se dá com os macro invertebrados e, os microrganismos, chamados de engenheiros químicos, convertem o material fragmentado em nutrientes para o solo, que podem ser mineralizados ou imobilizados na biomassa microbiana (Culliney, 2013). Os artrópodes além de estarem ligados as funcionalidades dos microrganismos, também influenciam a distribuição de populações microbianas no solo por meio do transporte ligados a seus corpos ou formação de micro-habitat no solo (Baretta et al., 2011).

Observou-se que a presença de macroporos e porosidade total do solo esteve relacionada a abundância e diversidade de todos os organismos identificados (Tabela 9). A movimentação desses macroinvertebrados contribuem para formação de galerias e bioporos favorecendo a passagem de ar e infiltração de água. Em estudo focado nas propriedades físicas e hidráulicas do solo nestas mesma áreas experimentais, da Luz et al., (2020) confirmaram menor macroporosidade na camada de 10-20 cm na área de cana soca, o que corrobora a correlação entre abundância de organismos e porosidade do solo, sendo essa área, a que apresentou menor abundância. Porém, em ambos os solos, a porosidade total não foi alterada devido à conversão

de PA para cana-de-açúcar. A pedoturbação provocada por esses organismos atua na entrada de matéria orgânica em subsuperfície assim como aumento de nutrientes minerais e área para troca iônica radicular das plantas e também servem para misturar matéria orgânica nas camadas superiores do solo. Organismos específicos como as minhocas podem alterar a estrutura do solo e modificar comunidades microbianas, além de fazerem associações organo-minerais em seu intestino por meio na ingestão de solo, resultando na mineralização de carbono orgânico (Barthod et al., 2020). Dessa forma, a fertilidade dos solos é favorecida pela biodiversidade (Baretta et al., 2011; Lal, 1988; Samson et al., 1994b), como observado nas correlações entre abundância total ou de grupos específicos com os macronutrientes do solo (Tabela 9).



## 5. CONCLUSÃO

A vegetação nativa apresentou alta riqueza e diversidade de organismos. A conversão da vegetação nativa para pastagem não alterou a abundância da macrofauna, porém resultou na redução da riqueza e diversidade, resultando na dominância dos grupos Coleoptera e Formicidae. A conversão da pastagem para o cultivo da cana-de-açúcar (planta) não trouxe perdas significativas iniciais à macrofauna do solo, porém o cultivo de cana soca impactou negativamente a abundância, riqueza taxonômica, diversidade e uniformidade da macrofauna.

Esse estudo mostrou que a expansão da cana-de-açúcar sobre áreas de pastagem prejudica a macrofauna edáfica e epígea com o decorrer dos anos. A remoção da palha da cana-de-açúcar do solo também resultou em menor abundância da macrofauna epígea comparada ao local com acúmulo de palha, mostrando preferência dos organismos para o solo coberto. Tais achados reforçam a necessidade estratégias de manejo que priorizem a manutenção da fauna do solo. Dentre as estratégias de manejo, pode-se citar aquelas que proporcionem um ambiente mais favorável a manutenção de uma biota mais abundante e diversa, tais como a manutenção da palha (como verificado nesse estudo), bem como, a transição do sistema de preparo convencional para o preparo mínimo/direto e a introdução de culturas de cobertura na renovação do canavial.

Finalmente, no decorrer do trabalho, foram identificadas algumas limitações que geram novas oportunidade para futuros estudos. Dentre eles estão a classificação dos organismos em nível taxonômico com melhor resolução; elucidar melhor os mecanismos pelo qual o sistema de produção afeta os organismos e avaliar potenciais perdas de funções do solo relacionadas a perdas da biodiversidade do solo; e estudos mais robustos em uma mesma área, envolvendo não somente a macrofauna, mas também os outros grupos de organismos que compõem a biodiversidade (mesofauna e microrganismos).



## REFERÊNCIAS

- Abreu, R. R. de L., de Lima, S. S., De Rodrigues Oliveira, N. C., & Leite, L. F. C. (2014). Edafic fauna under different straw levels in sugarcane crop. *Pesquisa Agropecuaria Tropical*, *44*(4), 409–416. <https://doi.org/10.1590/s1983-40632014000400002>
- Adami, M., Rudorff, B. F. T., Freitas, R. M., Aguiar, D. A., Sugawara, L. M., & Mello, M. P. (2012). Remote Sensing Time Series to Evaluate Direct Land Use Change of Recent Expanded Sugarcane Crop in Brazil. *Sustainability*, *4*(4), 574–585. <https://doi.org/10.3390/su4040574>
- Anderson, J., & Ingram, J. (1989). *Tropical soil biology and fertility*. 157, 265. Retrieved from [http://courses.washington.edu/esrm304a/lectures/Soils/Tropical Soil Biology and Fertility Methods\\_Web Soils Reading.pdf](http://courses.washington.edu/esrm304a/lectures/Soils/Tropical%20Soil%20Biology%20and%20Fertility%20Methods_Web%20Soils%20Reading.pdf)
- Antoniolli, Z. I., Conceição, P. C., Böck, V., Port, O., Silva, D. M. da, & Silva, R. F. da. (2006). Método alternativo para estudar a fauna do solo. *Ciência Florestal*, *16*(4), 407. <https://doi.org/10.5902/198050981922>
- Argañaraz, C. I., Rubio, G. D., Rubio, M., & Castellarini, F. (2020). Ground-dwelling spiders in agroecosystems of the Dry Chaco: a rapid assessment of community shifts in response to land use changes. *Biodiversity*, 1–11. <https://doi.org/10.1080/14888386.2020.1831605>
- Bardgett, R. D., & Van Der Putten, W. H. (2014). Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, *515*(7528), 505–511. <https://doi.org/10.1038/nature13855>
- Baretta, D., Bartz, M. L. C., Fachini, I., Anselmi, R., Zortéa, T., & Baretta, C. R. D. M. (2014). Soil fauna and its relation with environmental variables in soil management systems. *Revista Ciencia Agronomica*, *45*(5), 871–879. <https://doi.org/10.1590/s1806-66902014000500002>
- Baretta, D., Santos, J. C. P., Segat, J. C., & Geremia, E. V. (2011). Fauna edáfica e qualidade do solo. *Tópicos Em Ciência Do Solo*, (October 2014), 119–170.
- Barrios, E. (2007). Soil biota, ecosystem services and land productivity. *Ecological Economics*, *64*(2), 269–285. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.004>
- Barros, E., Pashanasi, B., Constantino, R., & Lavelle, P. (2002). Effects of land-use system on the soil macrofauna in western Brazilian Amazonia. *Biology and Fertility of Soils*, *35*(5), 338–347. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0479-z>
- Barthod, J., Dignac, M. F., Le Mer, G., Bottinelli, N., Watteau, F., Kögel-Knabner, I., & Rumpel, C. (2020). How do earthworms affect organic matter decomposition in the presence of clay-sized minerals? *Soil Biology and Biochemistry*, *143*, 107730. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107730>
- Berke, S. K. (2010). Functional groups of ecosystem engineers: A proposed classification with comments on current issues. *Integrative and Comparative Biology*, *50*(2), 147–157. <https://doi.org/10.1093/icb/icq077>
- Bonini da Luz, F., Carvalho, M. L., Aquino de Borba, D., Schiebelbein, B. E., Paiva de Lima, R., & Cherubin, M. R. (2020). Linking Soil Water Changes to Soil Physical Quality in Sugarcane Expansion Areas in Brazil. *Water*, *12*(11), 3156. <https://doi.org/10.3390/w12113156>
- Bordonal, R. de O., Menandro, L. M. S., Barbosa, L. C., Lal, R., Milori, D. M. B. P., Kolln, O. T., ... Carvalho, J. L. N. (2018). Sugarcane yield and soil carbon response to straw removal in south-central Brazil. *Geoderma*, *328*, 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.05.003>
- Bottinelli, N., Jouquet, P., Capowiez, Y., Podwojewski, P., Grimaldi, M., & Peng, X. (2015). Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil and Tillage Research*, *146*(PA), 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.007>



- Brussaard, L., de Ruiter, P. C., & Brown, G. G. (2007). Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121(3), 233–244. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.013>
- Bustamante, M. M. C., Nobre, C. A., Smeraldi, R., Aguiar, A. P. D., Barioni, L. G., Ferreira, L. G., ... Ometto, J. P. H. B. (2012). Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. *Climatic Change*, 115(3–4), 559–577. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0443-3>
- Caldeira-Pires, A., Benoist, A., Luz, S. M. da, Silverio, V. C., Silveira, C. M., & Machado, F. S. (2018). Implications of removing straw from soil for bioenergy: An LCA of ethanol production using total sugarcane biomass. *Journal of Cleaner Production*, 181, 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.119>
- Castioni, G. A., Cherubin, M. R., Menandro, L. M. S., Sanches, G. M., Bordonal, R. de O., Barbosa, L. C., ... Carvalho, J. L. N. (2018). Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. *Soil and Tillage Research*, 184, 301–309. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.007>
- Cavalcanti, R. Q., Rolim, M. M., de Lima, R. P., Tavares, U. E., Pedrosa, E. M. R., & Cherubin, M. R. (2020). Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. *Geoderma*, 370, 114353. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114353>
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Cerri, C. E. P., Franco, A. L. C., Tormena, C. A., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2016). Soil Quality Indexing Strategies for Evaluating Sugarcane Expansion in Brazil. *PLOS ONE*, 11(3), e0150860. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860>
- Cherubin, M. R., Lisboa, I. P., Silva, A. G. B., Varanda, L. L., Bordonal, R. O., Carvalho, J. L. N., ... Cerri, C. E. P. (2019, December 1). Sugarcane Straw Removal: Implications to Soil Fertility and Fertilizer Demand in Brazil. *Bioenergy Research*, Vol. 12, pp. 888–900. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10021-w>
- Conab - Companhia Nacional de Abastecimento. (2020). Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar.
- Culliney, T. (2013). Role of Arthropods in Maintaining Soil Fertility. *Agriculture*, 3(4), 629–659. <https://doi.org/10.3390/agriculture3040629>
- da Costa, L. M., & Drescher, M. S. (2018). Implications of agricultural management on the epigeic fauna and soil physical properties of a clayey Oxisol. *Revista Ceres*, 65(5), 443–449. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201865050009>
- de Vasconcelos, W. L. F., Rodrigues, D. de M., Silva, R. O. C., & Alfaia, S. S. (2020). Diversity and abundance of soil macrofauna in three land use systems in Eastern Amazonia. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 44, 1–16. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190136>
- Decaëns, T., Jiménez, J. J., Barros, E., Chauvel, A., Blanchart, E., Fragoso, C., & Lavelle, P. (2004). Soil macrofaunal communities in permanent pastures derived from tropical forest or savanna. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103(2), 301–312. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.005>
- Decaëns, T., Jiménez, J. J., Gioia, C., Measey, G. J., & Lavelle, P. (2006). The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*, 42(SUPPL. 1), S23–S38. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.07.001>
- Delabie, J. H. C., Céréghino, R., Groc, S., Dejean, A., Gibernau, M., Corbara, B., & Dejean, A. (2009). Ants as biological indicators of Wayana Amerindian land use in French Guiana. *Comptes Rendus - Biologies*, 332(7), 673–684. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2009.01.006>
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. (2018). Cenários de Demanda para o PNE 2050.

- Esquivel, D. M. S., Wajnberg, E., de Menezes e Souza, L. C., Acosta-Avalos, D., Pinho, M. B., & Harada, A. Y. (2019). Magnetic material diversity in Brazilian ants: displacement behaviour and environmental adaptability. *European Biophysics Journal*, *48*(2), 161–171. <https://doi.org/10.1007/s00249-018-1343-x>
- Filser, J., Faber, J. H., Tiunov, A. V., Brussaard, L., Frouz, J., De Deyn, G., ... Jiménez, J. J. (2016). Soil fauna: Key to new carbon models. *Soil*, *2*(4), 565–582. <https://doi.org/10.5194/soil-2-565-2016>
- Franco, A. L. C., Bartz, M. L. C., Cherubin, M. R., Baretta, D., Cerri, C. E. P., Feigl, B. J., ... Cerri, C. C. (2016). Loss of soil (macro)fauna due to the expansion of Brazilian sugarcane acreage. *Science of the Total Environment*, *563–564*, 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.116>
- Franco, A. L. C., Cherubin, M. R., Cerri, C. E. P., Six, J., Wall, D. H., & Cerri, C. C. (2020). Linking soil engineers, structural stability, and organic matter allocation to unravel soil carbon responses to land-use change. *Soil Biology and Biochemistry*, *150*, 107998. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107998>
- Franco, A. L. C., Cherubin, M. R., Cerri, C. E. P., Six, J., Wall, D. H., & Cerria, C. C. (2020). Linking soil engineers, structural stability, and organic matter allocation to unravel soil carbon responses to land-use change. *Soil Biology and Biochemistry*, 107998. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107998>
- Goldemberg, J., Mello, F. F. C., Cerri, C. E. P., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2014). Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. *Energy Policy*, *69*, 14–18. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.02.008>
- Hopkin, S. P., & Read, H. J. (1992). The biology of millipedes. *The Biology of Millipedes*.
- Joergensen, R. G., & Brookes, P. C. (1990). Ninhydrin-reactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0.5 m K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> soil extracts. *Soil Biology and Biochemistry*, *22*(8), 1023–1027. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90027-W](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90027-W)
- Joly, C. A., G Padgurschi Autores, M. C., F Pires, A. P., Antonio Agostinho, A., Carlos Marques, A., Amaral, A., ... Dias Loyola, R. (2018). *CAPÍTULO 1 \_ APRESENTANDO O DIAGNÓSTICO BRASILEIRO DE BIODIVERSIDADE E SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS*. Retrieved from [https://www.ipbes.net/system/tdf/downloads/IPBES-4-INF-9\\_EN\\_0.pdf?file=1&type=node&id=13451](https://www.ipbes.net/system/tdf/downloads/IPBES-4-INF-9_EN_0.pdf?file=1&type=node&id=13451)
- Jouquet, P., Dauber, J., Lagerlöf, J., Lavelle, P., & Lepage, M. (2006, June 1). Soil invertebrates as ecosystem engineers: Intended and accidental effects on soil and feedback loops. *Applied Soil Ecology*, Vol. 32, pp. 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.07.004>
- Lal, R. (1988). Effects of macrofauna on soil properties in tropical ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *24*(1–3), 101–116. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90059-X](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90059-X)
- Lavelle, P. (1997). Faunal Activities and Soil Processes: Adaptive Strategies That Determine Ecosystem Function. *Advances in Ecological Research*, *27*(C), 93–132. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60007-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60007-0)
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., ... Rossi, J. P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, *42*(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.10.002>
- Lavelle, Patrick, Barros, E., Blanchart, E., Brown, G., Desjardins, T., Mariani, L., & Rossi, J.-P. (2001). SOM management in the tropics: Why feeding the soil macrofauna? In *Managing Organic Matter in Tropical Soils: Scope and Limitations* (Vol. 61, pp. 53–61). [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2172-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2172-1_6)

- Lavelle, Patrick, Rodríguez, N., Arguello, O., Bernal, J., Botero, C., Chaparro, P., ... Fonte, S. J. (2014). Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing orinoco river basin of colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 185, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.020>
- Lefcheck, J. S. (2016). piecewiseSEM: Piecewise structural equation modelling in r for ecology, evolution, and systematics. *Methods in Ecology and Evolution*, 7(5), 573–579. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12512>
- Lehmann, A., Zheng, W., & Rilling, M. C. (2017). Soil biota contributions to soil aggregation. *Nature Ecology & Evolution*, 1(12), 1828. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/s41559-017-0344-y>
- Lemessa, D., Hambäck, P. A., & Hylander, K. (2015). The effect of local and landscape level land-use composition on predatory arthropods in a tropical agricultural landscape. *Landscape Ecology*, 30(1), 167–180. <https://doi.org/10.1007/s10980-014-0115-y>
- Machado, L. A., & Habib, ; M. (2006). MIGDOLUS FRYANUS (WESTWOOD, 1863) (COLEOPTERA: VESPERIDAE): PRAGA DA CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR. *Arq. Inst. Biol*, 73(3), 375–381.
- Marichal, R., Grimaldi, M., Feijoo, M. A., Oszwald, J., Praxedes, C., Ruiz Cobo, D. H., ... Lavelle, P. (2014). Soil macroinvertebrate communities and ecosystem services in deforested landscapes of Amazonia. *Applied Soil Ecology*, 83, 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.05.006>
- Melman, D. A., Kelly, C., Schneekloth, J., Calderón, F., & Fonte, S. J. (2019). Tillage and residue management drive rapid changes in soil macrofauna communities and soil properties in a semiarid cropping system of Eastern Colorado. *Applied soil ecology*, 143, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.05.022>
- Menandro, L. M. S., de Moraes, L. O., Borges, C. D., Cherubin, M. R., Castioni, G. A., & Carvalho, J. L. N. (2019). Soil Macrofauna Responses to Sugarcane Straw Removal for Bioenergy Production. *Bioenergy Research*, 12(4), 944–957. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10053-2>
- Menta, C., & Remelli, S. (2020a). Soil health and arthropods: From complex system to worthwhile investigation. *Insects*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/insects11010054>
- Menta, C., & Remelli, S. (2020b). Soil Health and Arthropods: From Complex System to Worthwhile Investigation. *Insects*, 11(1), 54. <https://doi.org/10.3390/insects11010054>
- Moldenke, A. R. (1994). Arthropods. In A. WEAVER, R. W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P.; BEZDICEK, D.; SMITH, S.; TABATABAI, A.; WOLLUM (Ed.), *Methods of Soil Analysis: microbiological and biochemical properties. Madison: SSSA. Part 2.* (pp. 517–542). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c24>
- Molotoks, A., Stehfest, E., Doelman, J., Albanito, F., Fitton, N., Dawson, T. P., & Smith, P. (2018). Global projections of future cropland expansion to 2050 and direct impacts on biodiversity and carbon storage. *Global Change Biology*, 24(12), 5895–5908. <https://doi.org/10.1111/gcb.14459>
- Morriën, E., Hannula, S. E., Snoek, L. B., Helmsing, N. R., Zweers, H., De Hollander, M., ... Van Der Putten, W. H. (2017). Soil networks become more connected and take up more carbon as nature restoration progresses. *Nature Communications*, 8. <https://doi.org/10.1038/ncomms14349>
- Nadolny, H., Santos, A., Demetrio, W., Ferreira, T., dos Santos Maia, L., Caroline Conrado, A., ... Brown, G. (2020). Recommendations for assessing earthworm populations in Brazilian ecosystems. *Pesq. Agropec. Bras*, 55, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01006>

- Nakagawa, S., & Schielzeth, H. (2013). A general and simple method for obtaining R<sup>2</sup> from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and Evolution*, 4(2), 133–142. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00261.x>
- Oksanen, J., Blanchet, F., & Kindt, R. (2016). *Vegan: Community Ecology Package. R package: 2.3*. Retrieved from <https://apps.worldagroforestry.org/publication/vegan-community-ecology-package-r-package-23>
- Oliveira, D. M. S., Cherubin, M. R., Franco, A. L. C., Santos, A. S., Gelain, J. G., Dias, N. M. S., ... Cerri, C. E. P. (2019). Is the expansion of sugarcane over pasturelands a sustainable strategy for Brazil's bioenergy industry? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.012>
- Petersen, H., & Luxton, M. (1982). A Comparative Analysis of Soil Fauna Populations and Their Role in Decomposition Processes. *Oikos*, 39(3), 288. <https://doi.org/10.2307/3544689>
- Phillips, H. R. P., Guerra, C. A., Bartz, M. L. C., Briones, M. J. I., Brown, G., Crowther, T. W., ... Eisenhauer, N. (2019). Global distribution of earthworm diversity. *Science*, 366(6464), 480–485. <https://doi.org/10.1126/science.aax4851>
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., & Sarkar, D. (2014). nlme: linear and nonlinear mixed effects models. *R Package Version*, 3, 1–117. Retrieved from [http://www.academia.edu/download/34909952/5-Modelos\\_lineales\\_mixtos\\_en\\_R.pdf](http://www.academia.edu/download/34909952/5-Modelos_lineales_mixtos_en_R.pdf)
- Pompeo, P. N., de Oliveira Filho, L. C. I., Filho, O. K., Mafra, Á. L., & Baretta, D. (2020). Coleoptera diversity and soil properties in land use systems. *Floresta e Ambiente*, 27(3), 1–10. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.006818>
- Portilho, I. I. R., Borges, C. D., Costa, A. R., Salton, J. C., & Mercante, F. M. (2011). Resíduos da cultura da cana-de-açúcar e seus efeitos sobre a fauna invertebrada epigeica. *Semina: Ciências Agrárias*, 32(3), 959–970. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2011v32n3p959>
- R. Core, T. (2013). *R: A language and environment for statistical computing*. Retrieved from <http://cran.univ-paris1.fr/web/packages/dplR/vignettes/intro-dplR.pdf>
- Samson, F. B., Knopf, F. L., Jones, C. G., Lawton, J. H., & Shachak, M. (1994a). Organisms as Ecosystem Engineers. In *Ecosystem Management* (pp. 130–147). [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4018-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4018-1_14)
- Samson, F. B., Knopf, F. L., Jones, C. G., Lawton, J. H., & Shachak, M. (1994b). Organisms as Ecosystem Engineers. In *Ecosystem Management* (pp. 130–147). [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4018-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4018-1_14)
- Satiro, L. S., Cherubin, M. R., Safanelli, J. L., Lisboa, I. P., Rocha Junior, P. R. da, Cerri, C. E. P., & Cerri, C. C. (2017). Sugarcane straw removal effects on Ultisols and Oxisols in south-central Brazil. *Geoderma Regional*, 11, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.10.005>
- Schon, N. L., Mackay, A. D., Gray, R. A., Dodd, M. B., & van Koten, C. (2015). Quantifying dung carbon incorporation by earthworms in pasture soils. *European Journal of Soil Science*, 66(2), 348–358. <https://doi.org/10.1111/ejss.12217>
- Silva, L. N., & Alves, A. (2013). 2013Amostragem da mesofauna e macrofauna de solo com armadilha de queda. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 8(5), 108–115.
- Silva, R., Aquino, A., Mercante, F., & Guimarães, M. (2008). Macrofauna invertebrada do solo em sistema integrado de produção agropecuária no Cerrado. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 30(5), 725–731. <https://doi.org/10.1590/S1807-86212008000500018>
- Sindipeças e Abipeças. (2019). Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores – SINDIPEÇAS / Associação Brasileira da Indústria de Autopeças – ABIPEÇAS (2019) Relatório da Frota Circulante 2019.

- Sofo, A., Mininni, A. N., & Ricciuti, P. (2020). Soil Macrofauna: A key Factor for Increasing Soil Fertility and Promoting Sustainable Soil Use in Fruit Orchard Agrosystems. *Agronomy*, 10(4), 456. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040456>
- Sparling, G. P., & West, A. W. (1988). A direct extraction method to estimate soil microbial C: calibration in situ using microbial respiration and <sup>14</sup>C labelled cells. *Soil Biology and Biochemistry*, 20(3), 337–343. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(88\)90014-4](https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90014-4)
- Strassburg, B. B. N., Latawiec, A. E., Barioni, L. G., Nobre, C. A., da Silva, V. P., Valentim, J. F., ... Assad, E. D. (2014). When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. *Global Environmental Change*, 28(1), 84–97. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001>
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(6), 703–707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)
- Vasconcelos, W. L. F. de, Rodrigues, D. de M., Silva, R. O. C., & Alfaia, S. S. (2020). Diversity and abundance of soil macrofauna in three land use systems in eastern Amazonia. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 44. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20190136>
- Vazquez, E., Teutscherova, N., Lojka, B., Arango, J., & Pulleman, M. (2020). Pasture diversification affects soil macrofauna and soil biophysical properties in tropical (silvo)pastoral systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 302, 107083. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107083>
- Velásquez, E., Fonte, S. J., Barot, S., Grimaldi, M., Desjardins, T., & Lavelle, P. (2012). Soil macrofauna-mediated impacts of plant species composition on soil functioning in Amazonian pastures. *Applied Soil Ecology*, 56, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.01.008>
- Wickham, H. (2009). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Retrieved November 30, 2020, from Springer-Verlag, New York website: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=XgFkDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR8&ots=spY5cQ618U&sig=2oGejMgLBIfZHNlxy-gjSWgQ788&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=XgFkDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR8&ots=spY5cQ618U&sig=2oGejMgLBIfZHNlxy-gjSWgQ788&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)