

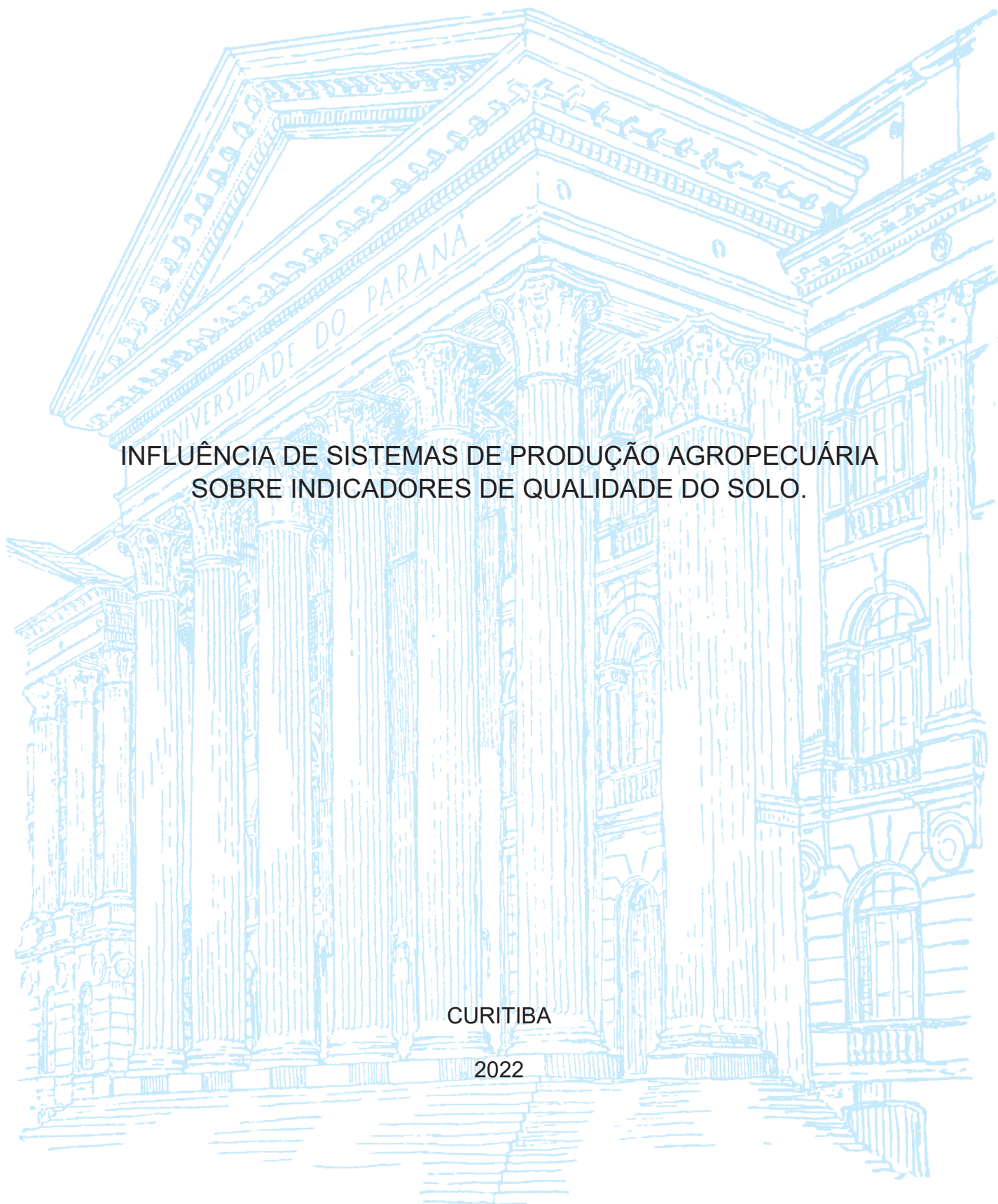
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CHARLES LEONEL GALVÃO SANCHÊS

INFLUÊNCIA DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA
SOBRE INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO.

CURITIBA

2022



CHARLES LEONEL GALVÃO SANCHÊS

INFLUÊNCIA DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA SOBRE
INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO.

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia - Produção Vegetal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como pré-requisito para a obtenção do título de doutor em ciências.

Orientador: Prof. Dr. Anibal de Moraes

CURITIBA

2022

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

Sanchês, Charles Leonel Galvão

Influência de sistemas de produção agropecuária sobre
indicadores de qualidade do solo / Charles Leonel Galvão
Sanchês. – Curitiba, 2022.

1 recurso online: PDF.

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

Orientador: Prof. Dr. Anibal de Moraes

1. Agropecuária. 2. Solos - Qualidade. 3. Bioindicadores. I.
Moraes, Anibal de. II. Universidade Federal do Paraná. Programa
de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal). III. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO AGRONOMIA
(PRODUÇÃO VEGETAL) - 40001016031P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL) da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **CHARLES LEONEL GALVÃO SANCHÊS** intitulada: **INFLUÊNCIA DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA SOBRE INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO**, sob orientação do Prof. Dr. ANIBAL DE MORAES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

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

CURITIBA, 16 de Dezembro de 2022.

Assinatura Eletrônica
16/12/2022 14:40:42.0
ANIBAL DE MORAES
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
16/12/2022 15:17:09.0
LUIZ ROBERTO MARTINS PINTO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ)

Assinatura Eletrônica
21/12/2022 10:42:28.0
LEANDRO BITTENCOURT DE OLIVEIRA
Coorientador(a)

Assinatura Eletrônica
20/12/2022 14:36:10.0
GEORGE GARDNER BROWN
Coorientador(a)

Dedico essa tese à minha esposa Rita
Sanchês e ao meu filho Pedro Leonel.
Vocês pagaram um alto preço para que tudo
isso pudesse acontecer.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus - o Deus de Abraão, de Isaac e Jacó. O Deus criador; soberano, justo e fiel; *“Porque Dele, por Ele e para Ele são **todas** as coisas.” (Romanos 11:36)*. Toda ciência vem de Ti Senhor! Toda sabedoria começa em Ti. E não há nada que eu possa fazer para retribuir o que fizeste e fazes por mim. Este Doutorado é para a Tua Glória! Se não for assim... de NADA servirá!

Minha Esposa Rita Sanchês - você é a prova de que o amor tudo suporta. O seu cuidado, sua cumplicidade, companheirismo, fidelidade, o seu amor... não tem como escrever aqui. Você foi essencial para que este desafio se completasse. Deus é incrível... casamos no dia que entreguei a Dissertação do Mestrado e defendo o Doutorado no dia que completamos 16 anos de casamento. Mas o nosso amor é muito maior do que qualquer título. Ele está escrito no Livro da Vida; infinitamente mais valoroso do que qualquer Tese. Muito obrigado! TE AMO!!!

Filho. Meu filho! Pedro Leonel. Você é o meu companheiro de jornada. Meu xará... Deus me concedeu a graça de ser teu pai. E você me concede a alegria de ouvir sua voz chamando “pai!”. Interrompi as suas amizades, suas brincadeiras, sua convivência com pessoas próximas, para sairmos da nossa terra para uma terra distante, com tudo novo, tudo diferente, muito frio e muitas barreiras. Você é forte! Se readaptou, adquiriu novas amizades, novas brincadeiras, novos sotaques, nova rotina... Passou por tudo... mudou bastante... aprendeu muito... e aí está! Um rapaz! Muito obrigado filho! Deus te abençoe! Valeu cada minhoca catada...

À minha mãe! Dinalva Galvão Sanchês. A sua bênção é a minha inspiração a enfrentar a jornada da vida. Seu cuidado me constrange... sua fidelidade ao Deus Criador me impressiona. Sua história me encoraja. Quero te mostrar a minha Tese de Doutorado, assim como eu te mostrava meus cadernos da escola. E espero que eu receba um “visto” e um “Parabéns!” Professora Dinalva, você transformou e transforma muitas vidas! Especialmente a minha! Beijo minha mãe!

Ao meu pai! David Corrêa Sanchês (*In memoriam*). Tenho certeza que seríamos ótimos parceiros na caminhada da vida. Mas não foi possível... aprovou a Deus o recolher ainda bem cedo. Mas serei sempre o “seu garoto”... e guardarei para sempre a imagem da foto que fizemos entre o “Baiano” e o “Mineiro”, a junta de bois de canga lá da roça. E o bicho de porco que ele queria que eu pegasse no pé - peguei!

Aos meus familiares - tios, tias, primos e primas, vocês todos têm uma porção de contribuição para com a minha vida. Aqui não foi diferente. As mensagens, as ligações, os áudios de ânimo, as contribuições de diversas formas, o acolhimento, a celebração pelas minhas conquistas, sempre compartilharei com vocês. Tios Vainho (*In memoriam*), Vivi (*In memoriam*), Loro e Vazim; tias Nite (*In memoriam*), Nil e Zene. Tia Lea (*In memoriam*), tios Pedro (*In memoriam*), João (*In memoriam*), Benjamim (*In memoriam*), Zé (*In memoriam*), Manoel e Elias. Os primos eu não dou conta de colocar... até a quarta geração são muitos e nos divertimos assim, como irmãos. O fato é que para um órfão de pai, fui generosamente agraciado com a acolhida de vocês. E isso certamente me deu garra e determinação para prosseguir.

Aos meus familiares por parte da esposa - sogro (Zito), sogra (Mary), meus cunhados e cunhadas - Júnior, Renata, Raphaella e Omar (*In memoriam*). Me juntei a vocês e vocês a mim e Deus tem feito com que sejamos uma família. Muito obrigado pelo apoio de sempre nas idas... vindas... longe ou perto nos defendemos com garra!

Ao meu orientador - Anibal de Moraes. Apostou em mim sem me conhecer... me deu oportunidade de conviver de perto com a ciência “limpa” das impurezas do sistema e sem perder a humanidade. Carrego muitos aprendizados que tive com você e espero honrar, ao menos algumas gotas do que me ensinou. Esta Tese é pequena para escrever o que aprendi através da oportunidade que me deste! Que Deus lhe abençoe!

Ao meu coorientador Luiz Roberto - Nem sei como lhe chamar. Orientador, professor, amigo, irmão, parceiro de trabalho! Sem dúvida é impossível parar, pois a consideração que tenho por você e pela sua família é imensa. Mais uma vez você me acolheu em meio ao trabalho científico e me abriu os olhos para notar os detalhes e a beleza do que estava por trás dos meus números. Registro aqui também meus agradecimentos à sua querida esposa

Nice, que sempre me recebe na casa de vocês com tanto zelo e atenção. Vocês são instrumentos de Deus em minha vida. Muito obrigado!

Aos professores e coorientadores da UFPR - todos que fiz disciplinas no doutorado; que aulas fantásticas!!! Em especial aos que acompanharam mais de perto, me ouviram, opinaram, corrigiram, auxiliaram ou desafiaram de alguma forma a mim e ao meu trabalho - Adelino, Alda, Ângelo, Arthur, Claudete, Karina, Leandro, Molento, Tangriani, Samir, Walmes. Uma honra tê-los conhecido.

Ao professor George Brown - De uma forma especial se dedicou, quando menos poderia para me direcionar e acompanhar neste trabalho, me aproximou de pessoas certas, na hora certa. Incrível a sua forma de trabalhar e a sua dedicação. Muito obrigado!

Ao professor Leandro Bitencourt - que chegou já no último ano, mas não mediu esforços para me ouvir, dar o olhar inicial ao trabalho, fazer as primeiras leituras e rumos do trabalho. Sua visão estratégica e apurada me abriu os olhos e animou. E agora na coorientação e na banca tem contribuído de forma substancial. Muito obrigado!

Ao professor Sebastião Brasil - que sempre que passava pelo NITA descarregava diversos conhecimentos. Me auxiliou também na qualificação.

Ao professor Jeferson Diekow - que sempre abriu as portas da sua sala e me ouviu atentamente, com perguntas sempre muito inteligentes e sugestões muito importantes para o andamento do projeto.

Aos colegas de NITA - em especial aos contemporâneos de turma na “jornada doutoral” - Dani, Renata e Silvano. Entramos juntos nessa caminhada, plantamos, adubamos, tratamos, medimos, limpamos, pesamos, assamos, comemos, amarramos, cavamos, esticamos, molhamos, congelamos, sujamos, lavamos, e colhemos JUNTOS. Também à Barbara, Breno, Camila, Carlos, Carol, Eduardo, Feliciano, Ingrid, João, Jonathan, Gustavo, Luciani, Rafaela, Rúbia e Thalles, que não foram da mesma turma, mas pudemos conviver e trocar saberes. Especialmente ao Thalles, que me impressionou pela dedicação ao que faz, pela competência, humildade e prontidão em ensinar. Muito obrigado! Silvano! Mais que um colega, um amigo família-família. “Braço forte e mão amiga!”

Aos estagiários do NITA - por lá “no meu tempo”, circularam mais de 50 jovens que se dedicaram ao andamento do experimento e dos nossos

trabalhos de pesquisa. Chuva, frio, geada, até sol (raro em Curitiba...) enfrentaram junto conosco para que cada número e cada medição fosse feita no tempo correto. Parabéns! Sigam firme! Aqui registro um agradecimento especial à Ana que não poupou esforços durante as minhas coletas, indo quase que diariamente pra dar aquela mão essencial.

Funcionárias da secretaria da pós-graduação - vocês são nossos socorros; nos salvam sempre... nos orientam, nos cobram, nos lembram... muito obrigado! Especialmente à Lucimara, que além de todo cuidado de sempre, me apoiou de forma singular neste final do doutorado.

Equipe da fazenda - Funcionários que fazem e acontecem ali. Sempre estão atentos aos cuidados que passamos com os experimentos. Na pessoa do professor Ferrari, estendo os agradecimentos a todos na fazenda. Especialmente ao Chiquinho e equipe e ao Leonel e equipe. Fiz bons amigos por lá.

À equipe da Embrapa - que em última hora me receberam tão bem e me auxiliaram com as análises e toda a estrutura. Instituição de excelência. Registro em especial os agradecimentos à Ieda (Embrapa Brasília), pelas análises, o George Brown, a Krisle, a Simone, e à Andréa, (Embrapa Florestas) que abriram o espaço para minha permanência ali, estiveram me apoiando e orientando. Muito obrigado!

À Igreja Batista do Bacacheri - pela acolhida e apoio constante, através de seus líderes e membros como um todo. Como é essencial o apoio espiritual!

Ao laboratório Tec Solo - na pessoa do Edson Resende, pelas análises químicas das amostras de solo.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano - pela concessão do afastamento durante o período do doutorado. Especialmente aos colegas do *Campus* Itapetinga, que sempre acolheram minha necessidade e atenderam minhas demandas.

À CAPES e ao CNPq - pela concessão “temporária” da bolsa.

A todos que de forma direta ou indireta somaram esforços comigo nessa jornada.

1 CORÍNTIOS 1:30

"...qual se nos tornou, da parte de Deus, sabedoria..."

O intelecto do homem busca descanso e, por natureza, o busca à parte do Senhor Jesus Cristo. **Homens cultos** têm a tendência, mesmo quando convertidos, de olhar para a simplicidade da cruz de Cristo com olhos **pouquíssimos reverentes** e ternos. Ficam presos na antiga rede em que os gregos foram pegos, e têm profundo desejo de **mesclar filosofia com revelação**.

A tentação, para um homem de pensamento refinado e **formação superior**, é afastar-se da simples verdade do Cristo crucificado e **forjar uma doutrina mais intelectual**. Isto levou os cristãos primitivos ao **gnosticismo** e os **enfeitou** com todo tipo de **heresias**. Esta é a raiz da **neologia** e de outras coisas elegantes que no passado eram tão populares na Alemanha e estão agora seduzindo certas classes de clérigos. Quem quer que você seja, bom leitor, e qualquer que seja sua formação, se você é do Senhor, tenha certeza de que não encontrará descanso em **filosofar sobre a divindade**.

Você pode receber este dogma de um grande pensador ou o sonho de outro **profundo intelectual**, porém, o que a debulha é para o trigo, assim serão estes ensinamentos comparados à pura Palavra de Deus. Todo esse raciocínio, quando bem direcionado, descobre, no máximo, o **ABC da verdade**, e ainda assim tem **falta de convicção; enquanto que em Jesus Cristo há acúmulo de toda a plenitude de sabedoria e conhecimento**.

Todas as tentativas da parte de cristãos, de contentar-se com sistemas que **pensadores unitaristas** ou anglicanos mais liberais aprovariam, estão **fadadas ao fracasso; os verdadeiros herdeiros do céu devem se voltar para a realidade profundamente simples**, que faz os olhos do jovem do campo cintilar de contentamento e alegra o coração do indigente piedoso - "Cristo Jesus veio ao mundo para salvar os pecadores."

Jesus satisfaz os intelectos mais elevados quando é recebido com fé, mas à parte dele a mente do regenerado não encontra descanso. "O temor do SENHOR é o princípio da sabedoria" "Revelam prudência todos que o praticam."

Charles Haddon Spurgeon (1834-1892)

Publicações Pão Diário - Curitiba-PR

(Permissão concedida pela Publicações Pão Diário)

Extraído de Dia a Dia com Spurgeon - Manhã & Noite, Meditações diárias. Grifos pessoais pela relevante relação com a realidade de execução deste trabalho.

RESUMO

Os sistemas de produção agrícola e pecuário brasileiros passaram por grandes avanços, até se colidirem com os impactos gerados pelos próprios modelos de uma agricultura artificializada, com práticas muitas vezes insustentáveis. Com isso, intensificou-se a busca por sistemas de produção mais estáveis, com alta capacidade produtiva e sustentável, dentre os quais se incluem os sistemas integrados de produção agropecuária - SIPA. Assim, fundamentando-se no pressuposto de que sistemas de produção mais complexos, em arranjo e manejo, causam diferentes efeitos na qualidade dos solos nos quais são estabelecidos, esta pesquisa teve como objetivos: 1) comparar a influência de diferentes sistemas de cultivo, sobre a qualidade do solo com base em indicadores bioquímicos, químicos e biológicos; 2) selecionar variáveis, ou grupos de variáveis, que sejam descritores eficazes da qualidade de solo; 3) agrupar os sistemas avaliados conforme as suas semelhanças e diferenças em influenciar a qualidade do solo; 4) verificar como os grupos de indicadores se relacionam entre si. Para tanto, o trabalho foi desenvolvido no experimento de campo do Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA) - Universidade Federal do Paraná (UFPR). Sete sistemas foram avaliados com três componentes e seus arranjos: Lavoura (L), Pecuária (PEC), Floresta (F), Lavoura X Pecuária (LP), Pecuária X Floresta (PF), Lavoura X Floresta (LF) e Lavoura X Pecuária X Floresta (LPF) além de áreas de vegetação natural vizinhas (N), a fim de comparação. Os métodos estatísticos adotados foram a análise de variância univariada (ANOVA) e testes comparativos de médias (*Tukey*). E, como métodos estatísticos multivariados, a análise de componentes principais (PCA) e análise de fatores (AF). Ao final se propôs um índice de qualidade do solo (IQS) com base nos fatores das dimensões escolhidas para explicar o fenômeno. Por meio da análise multivariada dos dados foi possível identificar tanto as diferenças quanto as semelhanças entre os sistemas de cultivo estudados. As variáveis teor de fósforo (P), Biomassa de *Amyntas* Juvenis (BAJ), Matéria Orgânica (MO), Umidade do solo (Umi), teor de potássio (K), Biomassa de *Pontoscolex* Adultas (BPA), Biomassa de *Pontoscolex* Juvenis (BPJ), Respiração Basal do Solo (RBS), Número de *Amyntas* Juvenis (NAJ), Número de *Pontoscolex* Adultas (NPA) e Número de *Pontoscolex* Juvenis (NPJ), foram eficazes como descritores de qualidade do solo. De maneira geral, o componente Lavoura se destacou positivamente na melhoria da qualidade do solo, independente da combinação de componentes que participou. O componente PEC, de forma integrada ou não, demonstrou equilíbrio suficiente para, às vezes não se diferenciar dos demais se apresentando como melhor em qualidade do solo. Os sistemas com o componente florestal apresentaram tendência para menor qualidade do solo, variando conforme o componente que interagiu. Sinteticamente, o IQS final destacou o PEC e o LP como os de melhor qualidade e F e LF como de pior qualidade do solo.

Palavras-chave: Bioindicadores; SIPA; Saúde do solo.

ABSTRACT

Brazilian agricultural and livestock production systems have gone through great advances, until they collide with the impacts generated by the models of an artificialized agriculture, with practices that are often unsustainable. As a result, the search for more stable production systems, with high productive and sustainable capacity, was intensified, among which are included the Integrated crop-livestock systems - ICLS. Thus, based on the assumption that more complex production systems, in arrangement and management, cause different effects on the quality of the soils in which they are established, this research aimed to: 1) compare the influence of different cultivation systems on soil quality based on biochemical, chemical and biological indicators; 2) select variables, or groups of variables, that are effective descriptors of soil quality; 3) group the evaluated systems according to their similarities and differences in influencing soil quality; 4) check how the groups of indicators relate to each other. For that, the work was developed in the field experiment of the Nucleus of Technological Innovation in Agriculture and Livestock (NITA) - Federal University of Paraná (UFPR). Seven systems were evaluated with three components and their arrangements: Crop (L), Livestock (PEC), Forest (F), Crop X Livestock (LP), Livestock X Forest (PF), Crop X Forest (LF) and Crop X Livestock X Forest (LPF) in addition to neighboring natural vegetation areas (N), for comparison purposes. The statistical methods adopted were univariate analysis of variance (ANOVA) and comparative tests of means (Tukey). And, as multivariate statistical methods, principal component analysis (PCA) and factor analysis (AF). At the end, a soil quality index (SQI) was proposed based on the factors of the dimensions chosen to explain the phenomenon. Through multivariate data analysis, it was possible to identify both differences and similarities between the studied cropping systems. The variables phosphorus content (P), Biomass of *Amyntas* Juveniles (BAJ), Organic Matter (OM), Soil moisture (Umi), potassium content (K), Biomass of *Pontoscolex* Adults (BPA), Biomass of *Pontoscolex* Juveniles (BPJ), Soil Basal Respiration (RBS), Number of Juvenile *Amyntas* (NAJ), Number of Adult *Pontoscolex* (NPA) and Number of Juvenile *Pontoscolex* (NPJ), were effective as descriptors of soil quality. In general, the Crop (L) component stood out positively in improving soil quality, regardless of the combination of components that participated. The PEC component, integrated or not, demonstrated sufficient balance to sometimes not differentiate itself from the others, presenting itself as better in soil quality. The systems with the forest component tended towards lower soil quality, varying according to the component that interacted. In summary, the final IQS highlighted PEC and LP as the best soil quality and F and LF as the worst soil quality.

Keywords: Bioindicators. ICLS. Soil Health.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 EMBASAMENTO TEÓRICO.....	18
2.1 HISTÓRICO DO SIPA.....	18
2.2 PRINCÍPIOS DO SIPA, E SUAS RELAÇÕES COM A QUALIDADE DO SOLO NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO.....	18
2.3 INDICADORES BIOQUÍMICOS, UMIDADE E MATÉRIA ORGÂNICA, E A QUALIDADE DO SOLO.....	24
2.4 MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM A QUALIDADE DOS SISTEMAS PRODUTIVOS.....	25
2.5 ENZIMAS, RESPIRAÇÃO BASAL E UMIDADE NO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM A QUALIDADE DOS SISTEMAS PRODUTIVOS.....	28
2.6 QUALIDADE BIOLÓGICA DO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM A QUALIDADE DOS SISTEMAS PRODUTIVOS.....	30
2.7 QUÍMICA DO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM A QUALIDADE DOS SISTEMAS PRODUTIVOS.....	33
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO EMBASAMENTO TEÓRICO.....	35
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	37
a) Sistema Lavoura (L)	
b) Sistema Lavoura - Pecuária (LP)	
c) Sistema Pecuária (PEC)	
d) Sistema Pecuária - Floresta (PF)	
e) Sistema Lavoura - Floresta (LF)	
f) Sistema Floresta (F)	
g) Área de Revegetação Natural (N)	
3.2 COLETAS DAS AMOSTRAS DE SOLO.....	42
3.3 ESTATÍSTICA.....	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1 GENERALIDADES.....	47
4.2 INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE CULTIVOS SOBRE OS INDICADORES BIOQUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO.....	47

4.3	ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO (IQS) APLICADO COM OS DADOS DOS INDICADORES BIOQUÍMICOS.....	57
4.4	INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE CULTIVOS SOBRE A MACROFAUNA (OLIGOQUETAS).....	58
4.5	ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO (IQS) APLICADO COM OS DADOS DOS INDICADORES DE MACROFAUNA.....	67
4.6	INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE CULTIVOS SOBRE A QUÍMICA DO SOLO.....	69
4.7	ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO (IQS) APLICADO COM OS DADOS DOS INDICADORES DE QUALIDADE QUÍMICA.....	77
4.8	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS COM TODAS AS VARIÁVEIS.....	78
4.9	ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO (IQS) GERAL APLICADO A TODAS AS VARIÁVEIS EM CONJUNTO.....	83
5	CONCLUSÕES GERAIS.....	85
	REFERÊNCIAS.....	87
	ANEXO 1 - FERTILIZAÇÃO ANUAL.....	95
	ANEXO 2 - DADOS REFERENTES AOS INDICADORES BIOQUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO.....	96
	ANEXO 3 - DADOS REFERENTES AOS INDICADORES DE MACROFAUNA DE QUALIDADE DO SOLO.....	98
	ANEXO 4 - DADOS REFERENTES AOS INDICADORES QUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO.....	102
	ANEXO 5 - DADOS REFERENTES AOS INDICADORES GERAIS BIOQUÍMICOS, QUÍMICOS E DE MACROFAUNA, DE QUALIDADE DO SOLO.....	104

1 INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira se desenvolveu amplamente nas últimas décadas e, segundo a Embrapa (2018), o Brasil saiu de importador de alimentos, para a condição de um dos maiores exportadores do mundo. O importante aumento na produtividade e na qualidade dos produtos é decorrente de avanços alcançados a partir da década de 60 por meio de modelos mais especializados de produção, com intenso uso de mecanização e grande dependência de insumos (Anghinoni et al. 2018). Porém, tais avanços podem gerar impactos negativos nos sistemas de produção.

Um destes impactos é a grande alteração do ambiente agrícola e consequente degradação do solo, o que tem causado a inutilização de áreas agrícolas e de pecuária (Anghinoni et al. 2018). Essa perda de capacidade produtiva ao redor do mundo tem levado à abertura de novas áreas como uma alternativa para aumentar a produção visando suprir as demandas do crescimento populacional.

A qualidade do solo é a capacidade em funcionar dentro do ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde das plantas e animais (Doran and Parkin 1994). Ela pode ser avaliada por meio da sua atividade e composição biológica, da sua composição química e dos seus atributos físicos (Araújo and Monteiro 2010). E os sistemas de cultivos adotados para a produção de alimentos influenciam, diretamente, todos estes atributos.

A (FAO 2010), prestigiando a minimização dos impactos negativos no sistema produtivo de alimentos ao redor do mundo, considera os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) como o caminho para a intensificação sustentável na exploração agrícola, ao tempo que promove a melhoria e a manutenção da qualidade do solo.

Estes sistemas consistem na produção de grãos, proteínas, fibras e energia em uma mesma área, com produtividade relevante, melhoria na

ciclagem de nutrientes e manutenção da qualidade ambiental. Assim, deliberadamente tira proveito dos sinergismos e serviços ambientais prestados e ou gerados por um sistema em melhor equilíbrio (Macedo 2009).

Os SIPA são estruturados de diferentes formas. Integram atividades que envolvam os componentes animal, lavoura e floresta. Visam a produção de alimentos com padrões competitivos, economicamente lucrativos e ambientalmente sustentáveis. São baseados em princípios de conservação e uso do solo, produção e conservação de material orgânico sobre o solo (Anghinoni et al. 2018, Moraes 2018). Seu valor está acentuado nas premissas de não revolvimento do solo, cobertura da área o ano inteiro e adubação de sistemas (Anghinoni et al. 2013, Moraes 2018). Tais práticas mantêm boa qualidade ambiental das áreas de produção por muito tempo, sem perder potencial produtivo.

Adotando-se estas premissas, é possível reduzir a expansão de áreas agrícolas ao proporcionar o aumento da produção de alimento por hectare com a redução da degradação do solo no ambiente rural; e, ainda, contribuir para a diversificação das propriedades, aumentando a renda e a segurança do setor produtivo.

Neste sentido, diversas pesquisas têm sido realizadas pelo Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA), criado em 2011 na Universidade Federal do Paraná (UFPR) (Lang et al., 2018). Por meio delas, recentemente, tem sido demonstrado que os SIPA podem, por exemplo, refletir em incremento na produção de capim (Szymczak 2014); alcançar níveis de produtividade de alimentos acima da média brasileira, com substancial recuperação e preservação do solo (Lima 2016); e oportunizar a adoção do componente arbóreo de modo a favorecer a permanência das espécies tropicais de pastejo durante o período de inverno em regiões subtropicais (Martin 2018).

Os SIPA têm permitido, ainda, evidenciar que é possível trabalhar com sistemas produtivos de bovinos a pasto em diferentes sistemas de produção, sem utilização de produtos fitossanitários e alcançar valores produtivos

superiores à média do estado (Campos 2019); que os são capazes de reduzir as emissões de N_2O a partir do solo (Amadori 2019); que a pecuária a pasto e em sistemas integrados têm relevante papel em mitigar os gases de efeito estufa (Portugal 2020); que produz troncos no componente arbóreo (*Eucalyptus benthamii*) com maior diâmetro à altura do peito e maior produção de fibra de madeira por árvore (Kruchelski et al. 2021).

No experimento do NITA há sete sistemas de cultivo: Lavoura (L), Pecuária (PEC), Floresta (F), Lavoura x Pecuária (LP), Pecuária x Floresta (PF), Lavoura x Floresta (LF) e Lavoura x Pecuária x Floresta (LPF). Contudo, eles ainda não foram estudados em conjunto em respeito às suas influências sobre a qualidade do solo. As pesquisas visando conhecer a interação entre os sistemas de cultivo e a qualidade do solo normalmente têm focado em algum componente especialmente, ou em algumas das suas ‘combinações’ com outros, como nos trabalhos citados acima. Além disso, é mais comum a avaliação, por meio de menor número de atributos; como biomassa microbiana e carbono mineralizável (Kleina 2017) e a estrutura do solo e sua relação com parâmetros radiculares (Marcolino 2021), e não uma gama mais ampla de possíveis indicadores de qualidade.

No entanto, para demonstrar o potencial efetivo de conservação do sistema e as condições para aplicar as mudanças e obter maiores ganhos pelos produtores por meio dos SIPA, são necessários estudos que avaliem a influência destes complexos sistemas de produção sobre a qualidade do solo usando uma variedade de descritores, ou grupos de descritores, que sejam suficientes para tais avaliações.

Os descritores são suficientes como indicadores de qualidade do solo quando: (i) evidenciam diferenças entre as influências causadas pelos sistemas de cultivo e, (ii) possibilitam a formação de grupos de sistemas com máxima semelhança entre as suas influências dentro dos grupos e máxima divergência entre eles. Assim, esta pesquisa se fundamenta no pressuposto de que diferentes sistemas de manejo causam diferentes efeitos na qualidade dos solos nos quais são estabelecidos, e que sistemas de produção mais complexos, em

arranjo e manejo, causam diferentes efeitos na qualidade dos solos nos quais são estabelecidos.

Portanto, os objetivos do presente estudo foram: (i) comparar a influência de sete sistemas agrícolas do NITA, e de área com vegetação natural (referência de sistema pouco modificado), sobre a qualidade do solo usando a atividade enzimática, indicadores bioquímicos, e atributos químicos e biológicos, tanto *per se* quanto em grupo de indicadores, de forma a (ii) selecionar variáveis, ou grupos de variáveis, que sejam descritores eficazes da qualidade de solo; (iii) agrupar os sistemas de cultivo conforme as suas semelhanças e diferenças em influenciar a qualidade do solo; e (iv) se estes grupos de indicadores se relacionam entre si.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 HISTÓRICO DOS SIPA

A história dos Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) no Brasil teve início no final do século XIX com a rotação da atividade da pecuária em áreas de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (Moraes et al. 2018). Produtores rurais, que buscavam alternativas para uso do solo no inverno, motivaram os primeiros estudos no subtropico brasileiro, em 1995. Assim, foram iniciadas as pesquisas conduzidas pela parceria da Universidade Federal do Paraná - UFPR com a Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária - FAPA, da Cooperativa Agrária, no município de Guarapuava/Paraná (Moraes, 2018; informação pessoal). Posteriormente os SIPA chegaram ao Centro Oeste do Brasil no início do século XX, promovendo a integração de lavouras com pastagens, quando da abertura de novas áreas agrícolas na região central do Brasil (Moraes et al. 2018).

A integração de árvores com pastagem e ou lavoura é algo recente, mas em grande ascensão (Souza et al. 2017). Conforme EMBRAPA (2015), algumas metodologias de valoração dos serviços ambientais que estes sistemas promovem, já vêm sendo desenvolvidas, com estudos de casos em andamento.

2.2 PRINCÍPIOS DOS SIPA, E SUAS RELAÇÕES COM A QUALIDADE DO SOLO NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Um solo com boa qualidade pode ser definido como aquele com biodiversidade (Anghinoni et al. 2013, Moreira et al. 2013); que apresente condições de acesso das plantas aos nutrientes no solo (Assmann et al. 2017); que apresente quantidade de matéria orgânica alta e presença e atuação de fauna do solo, especialmente os besouros coprófagos e minhocas equilíbrio dos ciclos biogeoquímicos, e que mimetizem ecossistemas naturais (Anghinoni et al. 2013, Moraes et al. 2014).

Por meio dos SIPA é possível adotar sistemas produtivos que mantenham ou melhorem a qualidade do solo promovendo o equilíbrio dos ciclos biogeoquímicos, e que mimetizem ecossistemas naturais (Anghinoni et al. 2013, Moraes et al. 2014).

Em SIPA se destacam quatro componentes que têm papéis fundamentais no sistema agrícola: o componente animal, o componente lavoura, o componente arbóreo e o componente solo.

O solo é o componente central dos processos em sistemas integrados de produção agropecuária, considerado como um indicador da qualidade do sistema de produção (Carvalho et al. 2010). É o mediador dos processos que ocorrem nos sistemas de produção e o principal compartimento que acolhe os vários processos sinérgicos; e mais da metade dos serviços ecossistêmicos globais são desempenhados sob grande responsabilidade do solo (Anghinoni et al. 2013, Weil and Brady 2017).

O componente lavoura, além de ser fonte de renda, oferece as condições necessárias para manutenção/melhoria da qualidade do solo e promover a equilibrada manutenção e ciclagem dos nutrientes no sistema (Anghinoni et al. 2017).

Os dejetos animais fornecem nutrientes e exercem grande influência na ciclagem de nutrientes no sistema (Carvalho et al. 2010, 2011). Favorecem a presença e atuação de fauna do solo, especialmente os besouros coprófagos e minhocas, que além de cooperarem para a decomposição da matéria orgânica no solo promovem a abertura de canais preferenciais no solo, e, por consequência, melhor acesso das plantas aos nutrientes pouco móveis no solo (Assmann et al. 2017). Assim, os animais, por meio da produção e deposição de seus excrementos, são relevantes para a manutenção/melhoria da qualidade do solo, e ainda podem causar aumentos expressivos na produtividade.

As árvores podem ser inseridas nos SIPA com diferentes objetivos: (i) como fator de equilíbrio térmico para o bem-estar animal, (ii) como fator de

conservação do solo, (iii) como redutor dos efeitos dos ventos sobre cultivos e sobre animais, (iv) como agente de agregação de renda a médio ou longo prazo, ou até (v) como uma fonte constante de renda, como no caso de frutíferas (Porfírio-da-Silva 2018).

A depender da espécie de árvore utilizada, poderá também contribuir para o estabelecimento de fauna avícola, roedores e até mamíferos de pequeno porte, o que eleva a qualidade ambiental do sistema e permite ainda mais serviços ambientais prestados (Porfírio-da-Silva 2018).

No SIPA, o conceito de integração no sistema produtivo não se restringe às combinações de diferentes modelos, ou tão somente à reunião dos componentes solo, planta e animal. É uma proposta com intenção deliberada de explorar o sinergismo entre os componentes que o integram - importantes pilares para o bom e correto estabelecimento e funcionamento de um sistema de produção (Carvalho et al. 2014). Este sinergismo pode ser entendido como o conjunto de modificações alcançadas objetivando melhor resultado e menor impacto no sistema produtivo (Anghinoni et al. 2013).

Portanto, os componentes de um sistema integrado participam tanto em conformidade com suas atribuições específicas quanto por meio de suas interações; o que potencializa os efeitos de estabilização-equalização dos fatores atuantes, reduzindo os impactos negativos ao sistema de produção (Anghinoni et al. 2013).

Além disto, as equilibradas relações em um sistema integrado proporcionam respostas diferenciadas em comparação com os métodos tradicionais de cultivo. Tanto do ponto de vista da degradação do sistema - quando as práticas promovem algum impacto negativo - como do ponto de vista de resposta equilibrada a essas intervenções para melhoria da produção (Anghinoni et al. 2013).

Ou seja, o sistema produtivo de cultivo precisa funcionar de forma integrada para que os resultados de excelência ocorram. Isto é, no SIPA nada

pode ser analisado de forma isolada ou por meio de conceitos isolados (Anghinoni et al. 2013).

Os SIPA adotam, também, práticas de cultivo orientadas por sólidos fundamentos teóricos que preconizam produções em alto nível, com fundamentos na sustentabilidade, levando em consideração os serviços ecossistêmicos prestados pelos componentes e sistema (Moraes et al. 2018).

Essas melhorias ambientais e das condições de produção dos sistemas agrícolas são descritas por (Martins et al. 2018), trazendo inclusive uma análise da contribuição desses sistemas para a otimização dos recursos naturais, já que aproveitam melhor os corretivos e fertilizantes, reduzem a utilização de agroquímicos de controle de pragas, doenças e plantas daninhas e favorecem o estoque de carbono atmosférico.

Em função disso os sistemas de produção têm evoluído visando sustentabilidade da atividade agropecuária (Vieira 1988). Entre esses avanços, o plantio direto e a integração lavoura pecuária, têm se mostrado eficientes na melhor conservação de parâmetros de fertilidade de solo, quando auxiliam na ciclagem de nutrientes (Anghinoni et al. 2011).

Assim, em SIPA sempre se considera as premissas do plantio direto e da adubação de sistemas, em favor da maior aproximação das condições naturais (Moraes et al. 2018). Nos ambientes naturais a harmonia entre os componentes é fator estabelecido conforme a evolução dos mesmos e isso ocorre de forma concomitante no tempo (Lemaire 2017). O que se conhece hoje sobre esses ambientes é o resultado dessa coevolução, que não é algo estático. Por mais preservado que seja, o ambiente está em constante modificação ajustando seus componentes às intempéries. Ainda que passem, naturalmente, por perturbações, as adaptações dos seus componentes possibilitam uma relação equilibrada.

Outra prática de cultivo importante a ser adotada nos SIPA é a rotação de cultivos com o objetivo de proporcionar a cobertura do solo no maior tempo

possível, em diferentes estações. As plantas, vegetando constantemente, com adequado estado de desenvolvimento, promovem a melhor manutenção da macroporosidade do solo (Assmann and RevisarCitacao 2008), uma vez que as raízes, ao crescerem e posteriormente morrerem, deixam espaços no solo como canais preferenciais à infiltração da água. Isto contribui para a redução da erosão do solo, aumenta a capacidade de armazenamento de água, e ainda contribui para o incremento no estoque de carbono atmosférico no solo (Porfírio-da-Silva 2018). Assim, proporciona melhor exploração do perfil do solo pelas gramíneas - ou qualquer outra cultura vindoura - potencializando sua resistência em períodos de estiagem e a absorção de nutrientes.

Como todo cultivo visando ganhos elevados de produtividade, os SIPA têm potencial de uso elevado de nutrientes em decorrência das altas taxas de exportação. Portanto, o fornecimento de nutrientes é essencial para a boa manutenção do sistema de produção e para a intensificação sustentável. Notadamente no que se refere a quantidades e fontes de nutrientes, bem como a época e as condições para a aplicação (Anghinoni et al. 2017, Assmann et al. 2018).

Neste sentido, Assmann et al. (2018) observam que historicamente a adubação foi estudada de forma específica para cada cultura, e com base nas produtividades desejadas. E salientam que as formas de fornecer os nutrientes às plantas precisam ser revistas. Como nos SIPA o sistema é integrado, a adubação também deve ser feita de forma integrada, preconizando o “pousio zero” e considerando a grande atividade biológica no solo que favorece a ciclagem de nutrientes. O solo em SIPA tem uma dinâmica que permite a intensificação de adubação, já que tem planta em crescimento vegetativo o ano inteiro, solo coberto com alta população de plantas por área e com isso um grande número de raízes por área, não há revolvimento do solo, a quantidade de matéria orgânica é alta, a época ideal de aplicação é propícia a menores perdas, as condições do momento de aplicação são respeitadas - como a boa umidade do solo e época de chuvas e as fontes utilizadas também são as de menores perdas (Assmann et al. 2018).

A produção primária líquida está diretamente relacionada à atividade vegetativa no solo, que resvala diretamente sobre a produção de matéria orgânica do solo. Para tanto, a adubação das áreas agrícolas, inclusive das pastagens, se torna primordial.

Além disto, todos os cuidados para se manter maior diversidade e atividade biológica no solo são importantes para a manutenção da ciclagem e, por consequência, a manutenção/recuperação da qualidade do solo.

Conforme o exposto, os SIPA visam adotar sistemas que equilibrem ciclos biogeoquímicos (e.g. o ciclo da água, do carbono, do nitrogênio, do fósforo e do enxofre), e que mimetizem ecossistemas naturais (Anghinoni et al. 2013, Moraes et al. 2014).

(Lemaire 2017) ainda analisa que esses fatores são ordenados pelos ciclos biogeoquímicos; que mantém a capacidade produtiva dos sistemas de produção. Esses ciclos precisam de condições de manutenção de suas etapas para atuarem de forma equilibrada. Levando em conta a importância do bom funcionamento desses ciclos nos sistemas naturais, os cultivos em SIPA visam maior aproximação das condições necessárias para que esses ocorram e de forma equilibrada por meio da ciclagem de nutrientes, conforme analisam (Anghinoni et al. 2017) quanto fazem uma abordagem sobre a ciclagem de nutrientes em sistemas integrados. Para tanto, todos os aspectos de condução de uma lavoura devem ser realizados com ponderações claras para o respeito a essa condição.

Os indicadores de qualidade do solo aqui discutidos são agrupados em: indicadores bioquímicos, biológicos, químicos e físicos. Isto, considerando que os fundamentos dos SIPA são (i) proporcionar as condições para a boa deposição e manutenção de material orgânico no solo, (ii) proporcionar as condições para a boa cobertura e proteção do solo, para a adequada ciclagem da matéria orgânica, para a captação e estocagem de carbono, e para a manutenção das condições das atividades biológicas; (iii) promover o aumento

acumulativo da fertilidade e (iv) adotar sistemas que equilibrem ciclos biogeoquímicos, e que mimetizem ecossistemas naturais.

2.3 INDICADORES BIOQUÍMICOS, UMIDADE E MATÉRIA ORGÂNICA, E A QUALIDADE DO SOLO

A atividade enzimática e a respiração basal do solo (RBS) são intimamente influenciadas pela MO e pela umidade relativa do solo. Assim, ainda que a MO e a umidade do solo não sejam indicadores bioquímicos, os seus efeitos podem ser estudados em conjunto como fontes de variação na influência dos sistemas produtivos na qualidade do solo.

Por meio dos SIPA é possível proporcionar as condições para a boa deposição e manutenção de material orgânico no solo, aumentando as taxas de Produção Primária Líquida (PPL) (Assmann et al. 2018). Assim, se proporciona boa cobertura e proteção do solo, melhorando a ciclagem da matéria orgânica e a captação e estocagem de carbono (Baldock and Broos 2012).

Numa compilação de diversos trabalhos (Weil and Brady 2017) listam 10 indicadores biológicos de qualidade do solo correlacionando-os com determinadas funções no mesmo. Os indicadores são: MI - índice de maturidade dos níveis tróficos de nematoides; MFD - diversidade da meso-fauna edáfica; AD - abundância de minhocas; qCO_2 - quociente de respiração do solo (por unidade de biomassa microbiana); MBC - carbono de biomassa microbiana; MBP - fósforo de biomassa microbiana; PMN - nitrogênio potencialmente mineralizável; EZ - atividade enzimática (desidrogenase, etc.); MFD - diversidade funcional microbiana; e MGD - diversidade genômica microbiana.

Esses autores determinaram as relações desses indicadores com a ciclagem de nutrientes, funções hídricas no solo, capacidade tampão, resistência, e resiliência, e *habitat* para biodiversidade. A contagem de minhocas foi o único indicador que se relacionou com todas as funções citadas. A diversidade da mesofauna, diversidade funcional microbiana e diversidade genômica microbiana, apenas não se relacionaram com as funções hídricas e

com a estabilidade. Os demais se relacionaram com uma ou duas das funções edáficas citadas, o que não os torna menos confiáveis, mas que restringe suas aplicações mais amplas.

2.4 MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM A QUALIDADE DOS SISTEMAS PRODUTIVOS

A matéria orgânica é o único componente sólido do solo que pode ser alterado pelo manejo (Silva and Mendonça 2007).

O termo húmus era usado na época dos romanos para se referir ao solo como um todo (Jimenez 1988). O estudo da matéria orgânica do solo vem dos primeiros relatos de Achard em 1796, que isolou um precipitado amorfo escuro após processo de acidificação de um extrato alcalino de turfa, que hoje se conhece como ácido húmico (Jimenez 1988).

O conceito de matéria orgânica mais amplo é apresentado por (Baldock and Broos 2012) e considera de forma mais estrita – metodológica, como sendo todo material orgânico dentro do solo, excluindo-se os resíduos superficiais, de tamanho menor que 2 mm. Nesse espectro englobam-se componentes vivos como a fitomassa, a biomassa microbiana e a biomassa da fauna edáfica, e componentes não vivos como os resíduos superficiais e enterrados de plantas, a matéria orgânica dissolvida, a particulada, a humificada (humus) e a resistente, como o material orgânico carbonizado (Silva and Mendonça 2007, Baldock and Broos 2012).

Baldock and Broos (2012) apresentam um modelo conceitual de algumas funções da matéria orgânica do solo. Ali dividem em funções biológicas (como a reserva energética e carbono para os organismos e reserva de macronutrientes - CHONPS), físicas (como estabilização dos agregados, retenção de água e friabilidade - elasticidade); químicas (como a capacidade de troca catiônica – CTC; matéria orgânica - MO principal contribuinte; poder tampão - pela mistura de diversos ácidos fracos que tem implicações na taxa de acidificação e calagem) e a complexação de cátions inorgânicos.

Os solos são o maior reservatório de carbono (C) do ecossistema terrestre. Eles armazenam pelo menos três vezes mais carbono na matéria orgânica do solo (MOS), do que o encontrado na atmosfera ou nas plantas vivas (Silva and Mendonça 2007, Schmidt et al. 2011). As mudanças nos estoques de C no solo podem levar a alterações significativas nos teores de C-CO₂ na atmosfera, na biosfera e na hidrosfera (Silva and Mendonça 2007).

A maior parte do C do solo é oriunda dos produtos da fotossíntese (Silva and Mendonça 2007). A entrada de C no solo se dá em grande parte pelo aporte de resíduos da biomassa aérea e radicular das plantas (Fujisaka et al. 1998, Lal 2002), notadamente por meio da matéria orgânica dissolvida (exsudados radiculares), das partículas transportadas da superfície (e.g. lavagem das plantas pela água da chuva) e da transformação dos materiais carbonados pelos macro e microrganismos do solo (Silva and Mendonça 2007, Schmidt et al. 2011). O carbono retido mais profundamente no solo tem origem quase que totalmente nas raízes (Schmidt et al. 2011). Além desses mecanismos é importante salientar que diferentes culturas, com aportes diferentes de C, também promovem diferenças no estoque de C no solo (Diekow 2003, Diekow et al. 2005).

Por exemplo, os solos de pastagem têm maior capacidade de estocar carbono orgânico do que os solos de cultivo, devido à menor perturbação do solo, o não revolvimento, a maior biomassa de raízes e resíduos devolvidos ao solo, e o retorno dos excrementos dos animais (Lal 2002). No caso de gramíneas sob pastejo, a biomassa radicular é mais representativa do que a biomassa aérea, em decorrência do sistema radicular bastante agressivo e volumoso (Fujisaka et al. 1998, Lal 2002). Neste sentido, Desjardins et al. (2005) relatam que a conversão de terras agrícolas em produção de forragem perene pode resultar em um aumento substancial no sequestro de C do solo.

Assim, a manutenção dos resíduos vegetais sobre a superfície do solo e a redução do seu revolvimento são os meios mais eficazes para aumentar o armazenamento de carbono no solo (Salton et al. 2011). Estudo realizado por Leite et al. (2010) revela que, em solos de cerrado, o sistema de preparo

convencional do solo, em comparação com o plantio direto, causa redução nos estoques de matéria orgânica do solo. Isto sustenta mais um pilar dos sistemas integrados que é a adoção de “pousio zero” (Assmann et al. 2017), e reafirma a importância de práticas que podem auxiliar na manutenção desse carbono no solo, tais como os SIPA lavoura-pecuária.

O teor de argila é um importante fator que influencia a disponibilidade de C no solo, permitindo maior proteção física de carbono no solo e dificultando a ação dos microrganismos e de suas enzimas sobre a matéria orgânica do solo (MOS). Solos mais argilosos, em geral apresentam maiores teores de C. Isso se deve ao fato das partículas de argila e silte terem elevada superfície específica e promoverem proteção coloidal à MOS, notadamente nas camadas mais superiores do solo. Esta proteção física, proporcionada pela oclusão da MOS no interior dos agregados, dificulta a ação dos microrganismos e de suas enzimas. Por outro lado, em solos arenosos as perdas de C orgânico solúvel são maiores, principalmente em regiões de maior intensidade de chuvas (Silva and Mendonça 2007).

Ainda que a argila realize a proteção do C em menores profundidades (Silva and Mendonça 2007) é importante salientar que metade do carbono do solo está localizado em camadas mais profundas, de 30 a 100 cm; embora, em profundidades maiores que 30 cm, a precisão nas medições seja menor, e maior a dificuldade de modelar a dinâmica de C (Balesdent et al. 2018).

O Carbono (C) e o Nitrogênio (N) possuem uma dinâmica intensa e bastante representativa, principalmente em sistemas integrados. Comparando a pastagem com o sistema lavoura-pastagem, Nicoloso (2005) relata um menor aporte de C com o incremento no pastoreio, e maior adição de C quando se incluiu a cultura do milho como sistema de cultura de verão. Diferentemente, Salton et al. (2011) concluíram que em sistemas de integração lavoura-pastagem tem-se menores taxas de acúmulo e estoques de carbono do que em sistemas de pastagem permanente. Nicoloso (2005) também relatou maior estoque de nitrogênio total nos sistemas de monoculturas de milho, quando comparados a sistemas integrados.

Isso evidencia a importância da inclusão de diferentes culturas no sistema lavoura, priorizando os que permitem maior acúmulo de C no solo, maior proteção superficial e maior aporte de resíduos, como a cultura do milho. Também ressalta a importância do sistema de manejo adequado da pastagem, priorizando o pastejo rotativo e espécies de gramíneas adaptadas às condições locais, que apresentam enraizamento abundante e profundo.

2.5 ENZIMAS, RESPIRAÇÃO BASAL E UMIDADE NO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM A QUALIDADE DOS SISTEMAS PRODUTIVOS

A MO influencia diretamente a respiração basal do solo e a atividade enzimática, que são alteradas em face da maior ou menor disponibilidade de matéria orgânica proporcionada pelos diferentes sistemas de cultivo (Mendes et al. 2021).

Os microrganismos responsáveis pela decomposição da matéria orgânica produzem enzimas tais como a β -glucosidase, a Arilsulfatase, fosfatase e protease (Reis Junior and Mendes 2007, Prieto et al. 2011). A enzima β -glucosidase (Bgl), importante no ciclo do Carbono, atua nas etapas iniciais da decomposição da matéria orgânica (Reis Junior and Mendes 2007, Mendes et al. 2021). A Arilsulfatase (Ari), relacionada ao ciclo do enxofre, participa em etapas posteriores no processo de decomposição da matéria orgânica (Mendes et al. 2021).

Balota et al. (2004) encontraram uma relação direta entre o aumento da atividade enzimática com o C orgânico total e com a biomassa microbiana, em áreas sem preparo do solo. Os autores analisaram a atividade de cinco enzimas (amilase, celulase, arilsulfatase, fosfatase ácida e alcalina) e indicaram a atividade enzimática como um parâmetro sensível às alterações da qualidade do solo em decorrência do manejo. Eles destacaram, ainda, que a atividade das fosfatases foram mais intensas em solos com baixos níveis de fosfato.

A PPL em áreas de cultivo é maior do que em áreas naturais. Isto porque as áreas de cultivo produzem maior quantidade de matéria orgânica que as áreas

naturais, o que favorece o desenvolvimento dos microrganismos no solo. Aumento da PPL implica em aumento do material orgânico no solo, que aumenta a atividade biológica (microrganismos) que afeta diretamente a respiração basal do solo (RBS), que repercutirá na memória do solo com reflexo no aumento da atividade enzimática.

Assim sendo, os sistemas enzimáticos e a RBS podem se revelar como indicadores suficientes para associar, indiretamente, as diferenças na PPL e na produção de MO entre os sistemas de cultivo estudados. Além disto, estas enzimas podem ser suficientes como indicadores de qualidade do solo se, por meio delas, for possível agrupar os sistemas de cultivos em grupos homogêneos.

Com o intuito de avaliar a qualidade microbiológica do solo de pastagens com diferentes históricos de uso sucessivo de dejetos líquidos de suínos, Silva et al. (2015) avaliaram cinco indicadores microbiológicos de qualidade do solo em áreas de pastagem com uso de dejetos de suínos comparando uma área de mata nativa. Eles concluíram que o C da biomassa microbiana, a respiração microbiana do solo e o quociente metabólico (qCO_2) não foram influenciados pelo uso de dejetos suínos, e que apenas a atividade enzimática sofreu alterações pelos tratamentos em questão, e ainda assim dependendo da enzima analisada. A urease e a hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) foram sensíveis aos tratamentos com diferentes doses de dejetos suínos. Ressalta-se para esse trabalho é que a atividade da β -glucosidase não teve eficiência como bioindicador para esse tipo de avaliação.

Prieto et al. (2011), estudando o efeito do pastejo nas atividades enzimáticas de microrganismos do solo em um ecossistema de pastagem na Patagônia encontraram que o aumento do pastejo afetou negativamente as atividades enzimáticas e microbianas do solo uma vez que causou declínio nas atividades de β -glucosidase, fosfatase e protease. Não obstante, o pastejo moderado como alternativa para a rotação em áreas de lavoura causou melhoria na física do solo (agregação), na atividade microbiana e nos atributos químicos (Carvalho et al. 2010). Assim, os aspectos negativos da presença dos animais são positivamente compensados.

Há evidências de redução da umidade superficial do solo em áreas com inserção do componente arbóreo, influenciando negativamente na produtividade das culturas agrícolas (Lima 2018). Esta redução na umidade superficial também pode refletir diretamente na redução da quantidade e da biomassa de minhocas, já que estes organismos possuem direta relação com os parâmetros de conservação do solo, especialmente com a condição do solo em manter a umidade (Paoletti 1999).

Marchioro (2019), identificou locais onde a produtividade do milho decaiu a partir do segundo ano de cultivo e a produtividade da soja foi menor, no sistema lavoura-pecuária-floresta (LPF), devido à redução na quantidade de água na área entre renques onde houve inclusão do componente florestal em sistemas LPF.

2.6 QUALIDADE BIOLÓGICA DO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM A QUALIDADE DOS SISTEMAS PRODUTIVOS

Por meio dos SIPA é possível proporcionar as condições adequadas para as atividades biológicas do solo, com a manutenção de sua diversidade (Brown and Domínguez 2010, Carvalho et al. 2011, Baldock and Broos 2012, Anghinoni et al. 2013, Moreira et al. 2013, Jamhour and Assmann 2017, Lemaire 2017, Silva et al. 2017, Porfírio-da-Silva 2018).

A biodiversidade do solo é um dos melhores indicadores de sua qualidade (Anghinoni et al. 2013, Moreira et al. 2013), pois evidencia a presença de vida que intermedia os processos e as transformações que ali ocorrem. A maior diversidade aumenta o grau de interações sinérgicas e distribui responsabilidades sobre cada processo que ocorre no sistema de produção, o que aumenta a sua resiliência (Carvalho et al. 2011).

Por exemplo: em SIPA envolvendo animais, o pastejo impõe heterogeneidade no solo tanto no espaço quanto no tempo, o que pode causar diversidade nos processos e transformações que ocorrem no solo tais como a

atividade da macrofauna e os indicadores de fertilidade do solo (Carvalho et al. 2011).

Os indicadores de qualidade física e química do solo já são bem estabelecidos e, de certa forma, fáceis de se avaliar. No entanto, os indicadores biológicos do solo necessitam de mais estudos, ainda que muitas metodologias sejam bem consolidadas (Moreira et al. 2013). Os principais indicadores biológicos do solo destacados por esses autores são a biomassa e a respiração microbiana, e as atividades de determinadas enzimas relacionadas com a decomposição da matéria orgânica, ao ciclo do C e do S, por exemplo.

Os principais agentes bióticos influenciadores na qualidade do solo são as micorrizas (Porfírio-da-Silva 2018), os besouros coprófagos (Assmann et al. 2017, Jamhour and Assmann 2017), e as minhocas (Paoletti 1999, Brown and James 2007, Brown and Domínguez 2010, Brown et al. 2013, Anghinoni et al. 2017, Jamhour and Assmann 2017). Dentre eles, as minhocas são os mais importantes indicadores ambientais (Paoletti 1999, Brown and Domínguez 2010) representando cerca de 80% da biomassa da macrofauna do solo. Esses organismos atuam como bioindicadores de perturbação do solo (Paoletti 1999) e contribuem tanto para a decomposição da matéria orgânica quanto para a abertura de canais preferenciais que auxiliam no acesso das raízes a nutrientes pouco móveis no solo (Assmann et al. 2017, Jamhour and Assmann 2017).

Especialmente as espécies de Oligoquetas que habitam a camada superficial do solo, bem como a serrapilheira, são importantes para a identificação de transformações e impactos ambientais de ocorrência nos sistemas agroambientais (Paoletti 1999). Paoletti (1999) ainda assegura que existem espécies que servem como bioindicadores tanto ambientes agrícolas, urbanos e até mesmo industrializados, para monitoramento diferentes práticas agrícolas e diferentes estruturas e transformações de ambientes agrários e naturais, através do número de espécies, abundância e biomassa das minhocas.

Os microrganismos (e.g. fungos totais, bactérias aeróbicas e bactérias produtoras de celulase) apresentam um alto potencial de uso na avaliação da

qualidade do solo, por suas características tais como a abundância e atividade bioquímica e metabólica, e por proporcionarem respostas mais rápidas a mudanças no ambiente (Araújo and Monteiro 2007, Bueno et al. 2018).

Em uma área de solos de minas de carvão, com características não convencionais para solos agrícolas, Kumar et al. (2018) notaram forte associação entre densidade de esporos de fungos micorrízicos arbusculares, carbono da biomassa microbiana, carbono orgânico do solo e as proteínas do solo relacionadas à glomalina (PSRG). Também encontraram forte correlação de PSRG e carbono orgânico do solo (COS) com a densidade do solo, potencial hidrogeniônico (pH), nitrogênio (N) total e relação C/N.

Silva et al. (2017) avaliaram um sistema de integração lavoura-pecuária, após três anos de implantação, em solos com textura média a arenosa, distróficos, com baixos teores de matéria orgânica. Utilizaram como parâmetro o carbono e nitrogênio da biomassa microbiana (CBM e NBM), a respiração microbiana (RM), o quociente metabólico (qCO_2), atividade enzimática (celulase, fosfatase ácida, β -glucosidade, arilsulfatase e FDA) e estrutura e diversidade microbiana. Verificaram o aumento da biomassa microbiana e da atividade para todos os tratamentos, e deduziram que a implantação do ILP promoveu o aumento da riqueza taxonômica, com o aparecimento de grupos metabolicamente diversificados para manter a funcionalidade do ecossistema.

Em SIPA, o pastejo moderado, como componente para a rotação em áreas de lavoura, causa a melhoria na atividade microbiana (Carvalho et al. 2010). Os animais maximizam a presença e atuação de fauna do solo, especialmente os besouros coprófagos e minhocas (Jamhour and Assmann 2017). Além disto, a maior intensidade de pastejo reflete diretamente no aumento do C orgânico no solo, da biomassa microbiana e da diversidade de microrganismos heterotróficos (Prieto et al. 2011).

O componente arbóreo em SIPA se destaca pelo aporte de C, a grande associação com micorrizas, a redução de perdas do solo e a melhoria de condições para a manutenção da atividade biológica (Porfírio-da-Silva 2018).

Silva et al. (2017) avaliaram a produção de glomalina por fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) no sistema de cultivo com integração de lavoura com pecuária e floresta (LPF). Encontraram tanto elevadas taxas de colonização micorrízica quanto elevado número de propágulos infectivos. Concluíram que os LPFs são sistemas favoráveis para o estabelecimento dos FMAs.

Paoletti (1999), após acompanhar áreas com diferentes características e manejos, concluiu que as práticas de cultivo que estão geralmente relacionadas com a agricultura de baixa intensidade, melhoram a abundância e diversidade de minhocas nas paisagens rurais.

Trabalhos como esse mostram a eficiência de diversos indicadores biológicos de qualidade do solo em sistemas integrados. Ainda reforçam a necessidade de se avaliar sistemas em longa duração, com comparações ao longo da condução do sistema, tendo a sensibilidade de analisar os parâmetros de produtividade agroambiental do sistema.

2.7 QUÍMICA DO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM A QUALIDADE DOS SISTEMAS PRODUTIVOS

Por meio dos SIPA é possível promover o aumento acumulativo da fertilidade, construindo-se um perfil de solo cada vez mais produtivo, tanto do ponto de vista agrícola, quanto ambiental, bem como promover as melhorias físicas do solo, oferecendo às plantas as melhores condições possíveis para a plena expressão de suas potencialidades de produzir alimentos (Diekow 2003, Anghinoni et al. 2011, Carvalho et al. 2011, Assmann et al. 2018, Martins et al. 2018, Porfírio-da-Silva 2018).

Com exceção da luz, as plantas dependem do solo para obterem todos os outros fatores de crescimento e vida (Potafos 1998). A condição de disponibilidade desses fatores dá-se o nome de fertilidade do solo. Ela varia conforme a origem do solo, as condições ambientais, o uso e intempéries naturais (Kiehl 1979). Agronomicamente, a fertilidade do solo pode ser

construída ao longo do tempo. No entanto, também ao longo do tempo ela pode ser degradada com maior ou menor velocidade em decorrência de usos intensos ou desequilibrados.

O clássico Manual de Edafologia (Kiehl 1979) destaca o papel relevante das plantas na formação da fertilidade do perfil do solo, tanto pela exploração radicular, quanto pelo aspecto de nutrição por meio da decomposição da sua matéria orgânica. A decomposição das raízes pode liberar CO₂ e nutrientes à medida que encerram o seu papel na planta e entram em decomposição (Diekow 2003, Anghinoni et al. 2011, Assmann et al. 2018, Porfírio-da-Silva 2018), o que irá interferir diretamente na fertilidade do solo e no aumento do estoque de carbono nas regiões onde as raízes estiverem.

Em SIPA, os atributos químicos e físicos do solo podem ser melhorados por meio do pastejo moderado como rotação em áreas de lavoura (Carvalho et al. 2010). Os animais são um componente catalisador do sistema de produção em áreas de cultivo de grãos no sistema de plantio direto por promoverem a ciclagem de nutrientes e a melhoria do solo (Carvalho et al. 2010). Existe, por exemplo, uma relação positiva entre a concentração de placas de esterco, a disponibilidade de nutrientes no solo e o rendimento da soja (Carvalho et al. 2011).

O componente arbóreo pode incrementar a fertilidade do solo notadamente por meio da atuação das micorrizas e por meio da ciclagem de nutrientes quando essas plantas depositam suas folhas, ramos, flores e frutos na superfície (Porfírio-da-Silva 2018), além das raízes mais profundas do Eucalyptus por exemplo retirarem água e nutrientes de camadas mais fundas no solo, reciclando assim, os nutrientes nas partes áreas depositadas na superfície.

Em um dos poucos trabalhos realizados relacionados a indicadores de qualidade biológica do solo em áreas de sistema integrado de produção agropecuária, e no Brasil, Souza et al. (2008) avaliaram em diferentes intensidades de pastejo, por seis ciclos, alguns atributos. Notaram que o estoque de C orgânico total não sofreu influência quanto à intensidade do pastejo, mas

que o C orgânico particulado, a biomassa microbiana e o fósforo (P) microbiano foram sensíveis a esse manejo. É interessante destacar que a biomassa microbiana do solo apresentou relação inversa com a intensidade de pastejo e relação direta com a massa de raízes. Já o P microbiano aumentou com a diminuição na intensidade de pastejo. Esses comportamentos diversificados reforçam a necessidade de maiores compreensões do padrão de qualidade do solo em SIPA.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO EMBASAMENTO TEÓRICO

Há uma grande quantidade de artigos sobre indicadores de qualidade do solo. Porém, dificilmente eles analisam sistemas integrados. São mais aplicados a avaliações de recuperação de áreas degradadas ou para avaliação de sistemas tradicionais de cultivo, onde existe preparo de área, pouco cuidado conservacionista no manejo e carência de adequações.

Outros trabalhos são com base em análises gerais de dados e relatam experiências e opiniões com foco em estudos globais, na maioria das vezes voltados ao carbono atmosférico terrestre.

A corrida para resultados amplamente generalizáveis por vezes inibem o aprofundamento em estudos locais. Os próprios trabalhos encontrados relatam alterações nas respostas aos diversos tipos de parâmetros e ainda algumas inconsistências de interpretações. Respostas promovidas por fatores bem localizados e ou interações bem específicas, demonstrando que muitos fatores, locais e de manejo, incidem sobre a dinâmica da qualidade do solo e dos sistemas de produção agropecuária. Porém a maioria traz a diversidade e a interação dos componentes como característica benéfica e importante para a tentativa de compreensão da dinâmica dos sistemas de produção. Tanto para explicar resultados de parâmetros específicos analisados, como para a manutenção da qualidade ao longo do tempo.

Quando os artigos apontam para uma expectativa futura sobre esse assunto, sempre abordam a necessidade de continuar os estudos,

principalmente com os microrganismos, de considerar nas avaliações um número maior de parâmetros e de trabalhos com maior tempo de avaliação.

Pela grande sensibilidade dos parâmetros de avaliação biológicos relatada na literatura, nota-se que faltam trabalhos com avaliações de maior periodicidade e com maiores amplitudes de correlações com um maior número de fatores agroclimatológicos e com as atividades de manejo.

Em sistemas integrados de produção agropecuária, nota-se que grande parte das tendências apontadas como positivas para a melhoria da qualidade solo, pela maioria dos artigos pesquisados, são contempladas. O enfoque no aumento da diversidade de componentes, na intervenção voltada para a maximização da interação dos mesmos e na melhoria das condições de bom funcionamento de todos os fatores, ao invés de intervenções muito específicas voltadas para um ou poucos componentes, prezando pela intensificação sustentável, leva à compreensão de que os SIPA estão um passo à frente na qualidade do sistemas de produção e que a avaliação da qualidade dos mesmos passa pela melhor forma de reunião de parâmetros e não pela busca de um, ou alguns parâmetros que definam a melhor ou pior qualidade desses sistemas.

Não obstante, os experimentos hoje instalados em campo, revelam índices de produtividade e padrões de sustentabilidade altos, sugerindo que seus protocolos podem ser adotados como padrões comparativos para avaliações de outros.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

O trabalho foi realizado na Estação Experimental do Canguiri, pertencente à Universidade Federal do Paraná (UFPR), localizada no município de Pinhais-PR. Ali está instalado o experimento de campo do Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA). Informações detalhadas são apresentadas por Lang et al. (2018).

O experimento (figura 1 em Lang et al., 2018), está localizado na APA do Iraí (Área de Preservação Ambiental da represa do Iraí) em 25°23'30"S e 49°07'30"W, a 935 m de altitude (Alvares et al. 2013). O clima nessa região, conforme Cfb, Koppen, é subtropical úmido mesotérmico, com precipitação média anual de 1483 mm, bem distribuídos ao longo do ano (INMET 2009). Os solos são classificados como Cambissolo Háplico, com textura argilosa na camada 0-0,10 m (Sugamoto 2002).



Figura 1 - Esboço da área experimental do Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA) com as divisões dos tratamentos e dos blocos Lavoura (L), Pecuária (P), Floresta (F), Lavoura X Pecuária (LP), Pecuária X Floresta (PF), Lavoura X Floresta e Lavoura X Pecuária X Floresta (LPF) e ainda áreas de vegetação natural vizinhas (N), localizada na Fazenda Experimental Canguiri da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Fonte: Boletim NITA, 2018: <https://earth.google.com/web/@-25.40136862,-49.12103089,920.41844167a,3496.06940738d,35y,338.60919481h,0t,0r> – com adaptações na imagem (inserção das áreas N).

Trata-se de um experimento de longa duração, implantado em 2012, composto por sete tratamentos com sistemas de produção diferentes: Lavoura (L), Pecuária (PEC), Floresta (F), Lavoura X Pecuária (LP), Pecuária X Floresta (PF), Lavoura X Floresta e Lavoura X Pecuária X Floresta (LPF) e ainda áreas de vegetação natural vizinhas (N), a fim de comparação.

Nos vinte anos anteriores à implantação do experimento a área era utilizada com o cultivo intensivo de milho, conduzido em sistema de preparo convencional do solo, com o seu frequente revolvimento. O solo, que se apresentava degradado, foi amostrado e corrigido com lodo de esgoto tratado pelo processo N VIRO® (blocos 1 e 2 com 8 ton.ha⁻¹; bloco 3 com 12-15 ton.ha⁻¹), seguindo posteriormente a semeadura de aveia preta, adubada na linha com 100 kg.ha⁻¹ de P₂O₅, para cobertura e proteção do solo.

Os tratamentos estabelecidos são:

a. Sistema Lavoura (L)

As áreas (parcelas) com o tratamento, Lavoura (L), são cultivadas exclusivamente com o componente lavoura, desde o início do experimento (2012). Nestas parcelas, é cultivado um ciclo anual de milho (*Zea mays*) no verão, desde 2016. Também se cultiva um ciclo anual de aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) no inverno, para cobertura do solo - espaçamento de 17 cm entre linhas e 90 kg de sementes ha⁻¹. Antes do milho (2013 a 2015), foi cultivado o girassol (*Helianthus annuus*) como cultivo de verão.

A semeadura de inverno é realizada no início da estação e se mantém intacta até meados da primavera, quando se realiza o plantio do milho, direto sobre as plantas de aveia em final de ciclo, ainda vivas, com a utilização de plantadeira de plantio direto. Não ocorre dessecação, nem procedimentos para corte ou incorporação das plantas. É realizada uma adubação de inverno sobre as plantas de aveia, na fase inicial (grão leitoso) de ciclo da mesma.

É feita adubação de verão sobre o cultivo do milho, quando este atinge aproximadamente o estágio V4. A adubação realizada no ciclo 2020-2021 foi

com 200 kg de ureia ha⁻¹ no inverno, ainda sobre a aveia. No verão deste ciclo não foi feita adubação.

Segue a condução, sem controle de daninhas nem de pragas ou doenças, até a fase de colheita de grãos. Após a avaliação de produção de grãos as plantas são incorporadas ao solo. Na safra de 2018-19 as plantas das áreas de L foram colhidas para silagem após avaliação de produtividade grãos.

b. Sistema Lavoura-Pecuária (LP)

As parcelas, com este sistema são mantidas como pasto por três anos consecutivos e no quarto ano recebem a lavoura na época do verão. O pastejo é feito de forma contínua, com três animais, e a taxa de lotação é variável, conforme a altura, com entrada e saída de animais reguladores de altura do pasto. A espécie utilizada para pastejo no verão é o *Megathyrus maximus* cv Aries (anteriormente denominado *Panicum maximus* cv Aries), além de outras espécies espontâneas.

No inverno, é realizada uma roçada baixa e é feita a semeadura da aveia preta, com espaçamento de 17 cm entre linhas e 90 kg de sementes ha⁻¹. No início da primavera a aveia já entra em senescência natural e o Aries retoma sua brotação e continua como pasto principal.

A etapa de lavoura é iniciada na primavera com o plantio do milho após uma roçada baixa no pasto. Neste ano não se ingressa com animais nas áreas após o inverno. Apenas se implanta a lavoura e se conduz até a fase de grão. A Lavoura (L) é de milho com espaçamento de 48 cm entre linhas. Ocorre adubação de verão sobre o cultivo do milho, quando este atinge aproximadamente o estágio V4. Segue a condução, sem controle de daninhas nem de pragas ou doenças, até a fase de colheita de grãos. A adubação realizada no ciclo 2020-2021 foi com 200 kg de ureia ha⁻¹ no inverno, ainda sobre a aveia. No verão deste ciclo não foi feita adubação geral.

c. Sistema Pecuária (PEC)

O sistema Pecuária (PEC) é permanente e exclusivamente com pasto. O pastejo é feito de forma contínua com três animais fixos, e, a taxa de lotação é variável, conforme a altura da forragem, com entrada e saída de animais

reguladores de altura do pasto. A espécie utilizada para pastejo no verão é a *M. maximus* cv Aries, além de outras espécies espontâneas.

No inverno, é realizada uma roçada baixa e é feita a semeadura da aveia preta, com espaçamento de 17 cm entre linhas e 90 kg de sementes ha⁻¹. No início da primavera a aveia já entra em senescência natural e o Aries retoma sua brotação e continua como pasto principal.

Os animais utilizados são da raça Angus. Ingressam na área no inverno, desmamados com aproximadamente 180 kg. Os ciclos de pastejo iniciam entre junho e julho, após o estabelecimento da pastagem de aveia preta e terminam entre abril e maio do ano seguinte, com a roçada do capim Aries para nova implantação de pasto de inverno e recebimento de novo lote.

d. Sistema Pecuária-Floresta (PF)

Este sistema consiste em áreas de pastejo contínuo sob floresta plantada de eucalipto (*Eucalyptus benthamii*), com aproximadamente sete anos, espaçadas inicialmente em 14 x 2 m, fileiras simples. A densidade inicial de 357 árvores ha⁻¹.

O pastejo nessas áreas é feito de forma contínua com três animais fixos, e a taxa de lotação é variável, conforme a altura da pastagem, com entrada e saída de animais reguladores de altura do pasto. A espécie utilizada para pastejo no verão é o capim Aries, além de outras espécies espontâneas.

No inverno, é realizada uma roçada baixa e é feita a semeadura da aveia preta, com espaçamento de 17 cm entre linhas e 90 kg de sementes ha⁻¹. No início da primavera a aveia já entra em senescência natural e o Aries retoma sua brotação e continua como pasto principal.

Os animais utilizados são da raça Angus. Ingressam na área no inverno, desmamados com aproximadamente 180 kg. Os ciclos de pastejo iniciam entre junho e julho, após o estabelecimento da pastagem de aveia preta e terminam entre abril e maio do ano seguinte, com a roçada do capim Aries para nova implantação de pasto de inverno e recebimento de novo lote.

Em 2016 foi realizado o primeiro desbaste de forma seletiva. Já em 2019 novo desbaste foi realizado com remoção integral de fileiras alternadas, de forma

a manter espaçamento de 28,0 m entre linhas. No verão de 2020/21 foi realizado o plantio de mudas de Araucária (*Araucaria angustifolia*) na entrelinha com espaçamento de 10 m entre plantas. Ao final do ano 2020 foi realizado o plantio de mudas de Araucária em substituição à fileira removida.

Nessas áreas as adubações ocorrem também no inverno e no verão. Neste ano, contudo, a adubação foi feita nessas áreas apenas com 500 g do formulado 10:20:20 (N:P₂O₅:K₂O), mais 10 Kg de composto orgânico comercial em cada planta de Araucária.

e. Sistema Lavoura-Floresta

Este sistema possui floresta permanentemente e a lavoura é implantada anualmente. O mesmo critério de implantação da lavoura e de manejo adotado é repetido aqui anualmente. De igual modo, o manejo na parte de floresta; inclusive os desbastes e implantação da Araucária relatados no sistema PF.

f. Sistema Floresta (F)

Este sistema consiste em um maciço florestal (F) plantado com arranjo espacial de 3 m x 2 m, da espécie *Eucalyptus benthamii*. Nestas áreas não há plantio de aveia no inverno, nem de lavoura ou pasto.

O eucalipto foi implantado em 2013 em linhas simples e em curvas de nível. A adubação, e demais práticas de manejo ao componente florestal que se faz em todos os tratamentos, se repete neste sistema. Contudo no maciço não ocorreu desbaste. O sistema F foi totalmente colhido entre agosto/2020 a fevereiro/2021.

g. Área de revegetação natural (N)

Ainda que a Vegetação Natural, aqui identificada como “N”, não seja, exatamente, um sistema de cultivo (mas uma referência de sistema pouco modificado), com o objetivo de simplificar a apresentação dos resultados, e a sua discussão, este tratamento ‘N’ será denominado como tal.

O manejo adotado em cada tratamento, e as práticas realizadas desde a instalação do experimento, foram detalhadamente descritos por Lang et al., (2018). Em adição, o calendário de adubação praticado na área desde o seu

estabelecimento até dezembro/2020 (período das coletas das amostras de solo) é apresentado no Anexo 1.

3.2 COLETAS DAS AMOSTRAS DE SOLO

As amostras de solo foram coletadas no final do ciclo do milho, em duas etapas, e conforme protocolos apresentados por Anderson & Ingram, (1993); Filizola et al., (2003); Mendes et al., (2020); Mendes, Montandon, et al., (2021); Mendes, Sousa, et al., (2021).

1ª Etapa de coletas - Avaliação das minhocas

Em três semanas consecutivas foram coletados, aleatoriamente e em cada parcela, cinco monólitos de solo, com 25 cm x 25 cm x 20 cm, método TSBF (Anderson and Ingram 1993, Azevedo et al. 2010). Em cada monólito foram coletadas as minhocas e casulos, que foram conservadas em álcool a 70%.

A biomassa e o número de indivíduos adultos, juvenis e casulos foram identificados e avaliados para quatro gêneros *Amyntas*, *Pontoscolex*, *Glossoscolex* e *Bimastos* (Brown and James 2007).

2ª Etapa de coletas - Avaliação química, respiração basal e umidade do solo, e atividade enzimática

Foi coletada uma amostra composta por parcela. Considerando-se que os tamanhos das parcelas não são iguais, estas amostras compostas foram formadas adotando-se dez amostras simples para cada hectare. O caminhamento, a determinação do ponto de amostragem, os procedimentos de retirada da amostra e acondicionamento seguiram as normas de amostragem de solo descritas por Filizola et al., (2003).

A amostra foi retirada em uma fatia do perfil de solo, em um dos lados de uma mini trincheira de 10 x 10 cm. Em cada ponto, foram retiradas 3 fatias de 0 – 10 cm. O solo foi homogeneizado, peneirado e embalado em três porções. Aproximadamente, 400g foram encaminhadas para o laboratório AGROTECSOLO-Análises Agronômicas e Consultoria, Campo Largo, Paraná, que realizou a avaliação química. Aproximadamente 400g foi refrigerada e

encaminhada para o laboratório de microbiologia do solo da EMBRAPA Florestas, onde se avaliou a respiração basal e umidade do solo conforme procedimento operacional padrão (POP LMS-02) (Silva et al. 2007). Aproximadamente 200g da amostra, seca ao ar, foi encaminhada para o laboratório de biologia do solo, EMBRAPA Cerrados, que avaliou a concentração de enzimas (Tabatabai 1994, Acosta-Martínez et al. 2021).

3.3 ESTATÍSTICA

O modelo experimental adotado para a instalação do experimento foi blocos casualizados com $j=1, \dots, J=3$ repetições, e $i=1, \dots, I=8$ sistemas (tratamentos), anteriormente descritos ("N", "F", "L", "P", "LP", "PF", "LF", "LPF"), avaliados por meio de $k=1, \dots, K=33$ variáveis respostas Y , tal que

$$y_{kij} = m_k + \text{blocos}_{klj} + \text{sistemas de cultivo}_{k|i} + e_{kij}.$$

As variáveis respostas estudadas, e descritas nas tabelas de médias, foram:

Orgânicas: "BGI" "Ari" "Umi" "RBS" "MO"; químicas: "pH" "P" "K" "Ca" "Mg" "Al" "HAl" "SB" "CTC" "B_V"; Oligoquetas: "BAA" "BAJ" "BAT" "BAC" "NAA" "NAJ" "NAT" "NAC" "BPA" "BPJ" "BPT" "BPC" "NPA" "NPJ" "NPT" "NPC" "BT" "NT".

Conforme previamente informado, existe um princípio norteador para a implementação destes sistemas, que poderíamos qualificar como "efeitos principais": efeito Floresta "F", efeito Pecuária "P", efeito Lavoura "L", e o adicional efeito da Vegetação Natural "N", como referência.

Não obstante o arranjo de 7 tratamentos sugira, em princípio, a análise dos dados experimentais no arranjo fatorial de tratamentos ("efeitos principais" ("F", "P" e "L") e suas interações), estes 7 tratamentos são independentes entre si. De fato, "PF" e "LP", por exemplo, não são interações verdadeiras entre os "efeitos principais". Ao contrário, as supostas interações são complexas interações dos múltiplos sistemas de integração agropecuária. Além disto, as interações complexas interagem, e interagiram, com o ambiente por grande

período de tempo decorrido desde a instalação do experimento, o que também causa independência de comportamento entre os sistemas. Portanto, não é possível estimar, por exemplo, o efeito específico do sistema 'L', nos sistemas 'LP', 'LF' ou 'LPF', pois, neles, os supostos “efeitos principais” estão confundidos.

Assim, estas complexas interações causam efeitos independentes entre si, assim repercutindo na abordagem estatística dos dados obtidos. Não obstante, indicativos de efeitos relevantes dos tratamentos “principais” podem apontados.

Com o objetivo de (i) selecionar variáveis, ou grupos de variáveis, como descritores eficazes da qualidade de solo; visando (ii) evidenciar diferenças entre os sistemas de cultivo e (iii) formar de grupos de tratamentos com máxima semelhança dentro dos grupos e máxima divergência entre eles, culminando com a (iv) avaliação dos efeitos de 8 sistemas agroflorestais sobre a qualidade dos solos onde foram estabelecidos, variáveis supracitadas foram avaliadas, tanto *per se* quanto por meio de combinações múltiplas de variáveis, como descritoras da qualidade do solo.

Os métodos estatísticos adotados para a análise das variáveis *per se* foram: análise de variância univariada (ANOVA) e testes comparativos de médias (Tukey). A homocedasticidade entre os tratamentos e a normalidade dos resíduos também foram avaliadas.

A análise univariada, como o próprio nome indica, trata da utilização de método de análise de uma única variável aleatória com o objetivo de descrever, comparar ou agrupar indivíduos ou populações de interesse. Diferentemente, a análise multivariada dos dados considera várias variáveis relacionadas entre si. Assim, a análise multivariada se refere a utilização de técnicas estatísticas que simultaneamente analisam múltiplas medidas sobre indivíduos ou objetos sob investigação. Seu objetivo, então, é medir, explicar, descrever, comparar ou agrupar indivíduos ou populações de interesse por meio de combinações ponderadas de variáveis.

Então, para avaliar grupos de variáveis por meio de combinações múltiplas com o objetivo de identificar descritores da qualidade do solo sob diversos sistemas de cultivo, os métodos estatísticos multivariados adotados

neste estudo foram a análise de componentes principais (PCA) e a análise de fatores.

Para avaliar, multivariadamente, os efeitos dos sistemas agroflorestais estudados sobre os solos onde foram estabelecidos, as variáveis estudadas foram agrupadas, inicialmente, em quatro grupos: “Indicadores bioquímicos de qualidade do solo”, “Indicadores de Macrofauna” e “Indicadores Químicos”. Em cada um destes grupos foi estabelecido um conjunto de variáveis escolhidas seguindo o princípio da parcimônia estatística¹.

Para a formação destes conjuntos adotou-se, como critérios de inclusão, as variáveis: (i) que evidenciaram significância estatística (ANOVA, teste F para a fonte de variação ‘sistemas de cultivo’); (ii) notoriamente não multicolineares, (iii) mais informativas do grupo de interesse; considerando-se que foram muitos os conjuntos de variáveis analisados (ver anexo 2).

É importante o uso de recursos que permitam identificar direções e sentidos que expliquem os contrastes entre estes grupos. Para atender este objetivo os dados foram submetidos a análise de componentes principais (PCA), realizada a partir da tabela de médias de cada um dos sistemas.

A PCA, uma técnica descritiva, permite capturar, em poucas dimensões, a variação padrão apresentada pelo fenômeno em estudo, excluindo da análise a variação considerada como sem sentido, ou aleatória. Nesta pesquisa foram analisadas as variações retidas nos dois primeiros componentes principais, e os resultados foram apresentados por meio de gráficos (e.g. Biplot).

Porém, a PCA não é baseada em um modelo estatístico particular, enquanto que a análise de fatores o é (MANLY, 2008). Este método tem o objetivo de descrever um conjunto de P variáveis $X_1, X_2, \dots, X_p$ em termos de um número menor de índices de fatores. Assim, como objetivo de se obter uma melhor compreensão do relacionamento destas variáveis, foi realizada a análise de fatores (AF) para cada grupo de variáveis.

¹ O princípio da parcimônia estatística prevê que a explicação mais simples, capaz de abranger o maior número de observações ou achados relacionados a um determinado fenômeno, deve ser assumida como a correta, evitando-se a larga probabilidade de erro associada às explicações mais complexas ou múltiplas (COIMBRA; JUNQUEIRA, 2010). **Modelos parcimoniosos têm parcimônia ideal ou apenas a quantidade certa de variáveis necessárias para explicar bem o modelo.**

Finalmente, foi proposto um Índice de Qualidade do Solo (IQS). Esta proposição é baseada nas cargas fatoriais da AF, considerando-se a ortogonalidade das cargas fatoriais. Esta soma é o IQS que foi representado graficamente para melhor compreensão e visualização dos sistemas conforme a nota de cada um.

As análises multivariadas foram realizadas com variáveis padronizadas para média zero e variância um.

Os testes estatísticos adotados evidenciaram efeitos significativamente diferentes de zero quando $p.\text{valor} < 0.05$.

Todas as análises estatísticas foram realizadas por meio do pacote R (Team 2020) (funções e suas bibliotecas, informadas a seguir):

Funções R utilizadas para realizar as análises dos dados por meio de estatísticas univariadas:

(1) ANOVA: funções 'aov' e 'anova' (biblioteca 'stats'); (2) homocedasticidade entre os tratamentos: (função `bartlett.test`, biblioteca 'stats'); (3) normalidade dos resíduos: teste Kolmogorov-Smirnov com a função `lillie.test`, biblioteca 'nortest'; (4) comparações entre as médias: teste Tukey, com a função `TukeyC`, biblioteca `TukeyC`; (5) transformação dos dados (variáveis que não atenderam aos pressupostos de homocedasticidade e normalidade foram transformadas): função 'boxcox', biblioteca 'MASS'.

Funções R utilizadas para realizar as análises dos dados por meio de estatísticas multivariadas:

(6) padronização das variáveis para média zero e variância um: função 'scale', biblioteca 'stats'; (7) PCA: função 'prcomp', biblioteca 'stats'; (8) análise de fatores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 GENERALIDADES

Os testes realizados para verificar a homocedasticidade entre os sistemas de cultivo e a normalidade dos resíduos revelaram a necessidade da transformação das variáveis BGI, RBS, AI, CTC, BAA, BAT, BAC, NAA, NAC. Assim, foram atendidos os pressupostos para as análises estatísticas adotadas para todas as variáveis estudadas.

Os testes estatísticos adotados evidenciaram efeitos significativamente diferentes de zero quando $p.\text{valor} < 0.05$.

O sistema de cultivo “Vegetação Natural ‘N’” foi adotado como referência de sistema pouco modificado.

4.2 INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE CULTIVOS SOBRE OS INDICADORES BIOQUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO

As variáveis *BGI*, *Ari*, *RBS*, *Umi* e *MO* foram estudadas como indicadores bioquímicos da qualidade do solo. Embora a umidade (*Umi*) seja um parâmetro relacionado à física do solo e a matéria orgânica (*MO*) seja comumente avaliada junto com os parâmetros da química do solo, estes atributos foram estudados junto com os indicadores bioquímicos, pela sua estreita relação entre os mesmos.

A análise de variância (ANOVA) revelou que os efeitos dos sistemas foram significativamente diferentes de zero ($p.\text{valor} < 0.05$) para as duas enzimas estudadas como indicadoras da qualidade do solo (*BGI* = 0,02 e *Ari* = 0,00); e para *Umi* (0,00). Já para *RBS* e *MO* não diferiram significativamente entre os sistemas. Os testes de médias entre os sistemas evidenciaram contrastes significativamente diferentes entre eles (Tabela 1). Médias com conjunto de letras iguais não diferem significativamente entre si.

A *BGI* evidenciou os grupos: G1 {N}; G2 {PEC; LP; PF; LPF; LF} e G3 {L; F}, destacando, portanto, o contraste entre {N} e {L; F}.

Tabela 1 – Médias da atividade das enzimas β -glucosidase (BGI) (mg de p-nitrofenol/kg de solo/h) e Arilsulfatase (Ari) (mg de p-nitrofenol/kg de solo/h); da umidade do solo (%); da Respiração Basal do Solo (RBS) e da Matéria Orgânica (MO) nos solos de sistemas agrários e naturais estudados, profundidade 0 -10cm.

Agroecossistemas	BGI		Ari		Umi		RBS		MO	
N	108,13	b	1184,7	a	7,949	bc	0,810	a	45,533	a
L	267,60	a	869,27	b	9,559	a	1,030	a	47,500	a
PEC	160,19	ab	643,74	bc	8,154	abc	0,561	a	47,767	a
F	215,81	a	663,88	bc	7,108	c	0,910	a	45,667	a
LP	191,30	ab	633,09	bc	8,946	ab	0,526	a	46,133	a
LF	191,40	ab	667,88	bc	7,596	bc	0,718	a	45,600	a
PF	173,96	ab	545,21	c	6,861	c	1,686	a	47,867	a
LPF	186,69	ab	603,52	bc	7,249	c	0,776	a	47,433	a
CV	4,36**		15,74		7,219		74,693		3,572	
p.valor*	0,02		0,00		0,000		0,510		0,38	

*p.valor: Teste F para efeitos de sistemas de cultivo. CV: coeficiente de variação (%), **refere-se à variável transformada. Sistemas de cultivo com letras semelhantes não diferem entre si ($p < 0,05$).

A *Ari* evidenciou os grupos: G1: {N}; G2: {L}; G3: {PEC; F; LP; PF; LPF; LF}, destacando, portanto, contraste entre o {N} e {P; F; LP; PF; LPF; LF}.

A *Umi* evidenciou os grupos: G1: {L}; G2: {LP; PEC; N; LF}; G3: {LPF; F; PF}.

A *RBS* e a *MO* não evidenciaram agrupamentos. Porém, ainda que a Respiração Basal do Solo - RBS e a Matéria Orgânica - M.O. (*MO*), *per se*, não tenham sido influenciadas pelos sistemas de cultivo, na análise conjunta com as enzimas, elas (notadamente a RBS) se revelaram importantes para agrupar os sistemas de cultivo com respostas homogêneas, como apresentado a seguir.

A análise univariada dos dados é especialmente importante porque revela se as enzimas em estudo são realmente úteis para a compreensão do fenômeno que está sendo pesquisado. No entanto, se o fenômeno é descrito por meio de *atividade enzimática* é necessário, e mais importante ainda, avaliar se o conjunto das enzimas estudadas pode ser importante para compreender a influência de sistemas de cultivo sobre indicadores de qualidade do solo. Isto é, estamos interessados em avaliar “Como os indicadores bioquímicos de qualidade do solo, em conjunto, agrupam os sistemas?”

A análise de componentes principais (PCA), uma técnica descritiva, permite aprimorar os agrupamentos entre os sistemas, por meio de dados que expressam a variação padrão apresentada pelo fenômeno em estudo; excluindo-se, portanto, a variabilidade aleatória que causa distorções na formação de grupos homogêneos. Assim, no presente estudo, a PCA aprimora as evidências, ou resulta em melhor clareza, facilitando o entendimento sobre o sentido e a direção destes contrastes.

Os resultados da PCA para o grupo dos indicadores bioquímicos do solo estão graficamente apresentados na figura 2. Informações complementares (autovalores e autovetores) são apresentadas no anexo 2 - Tabela 2.A e 2B.

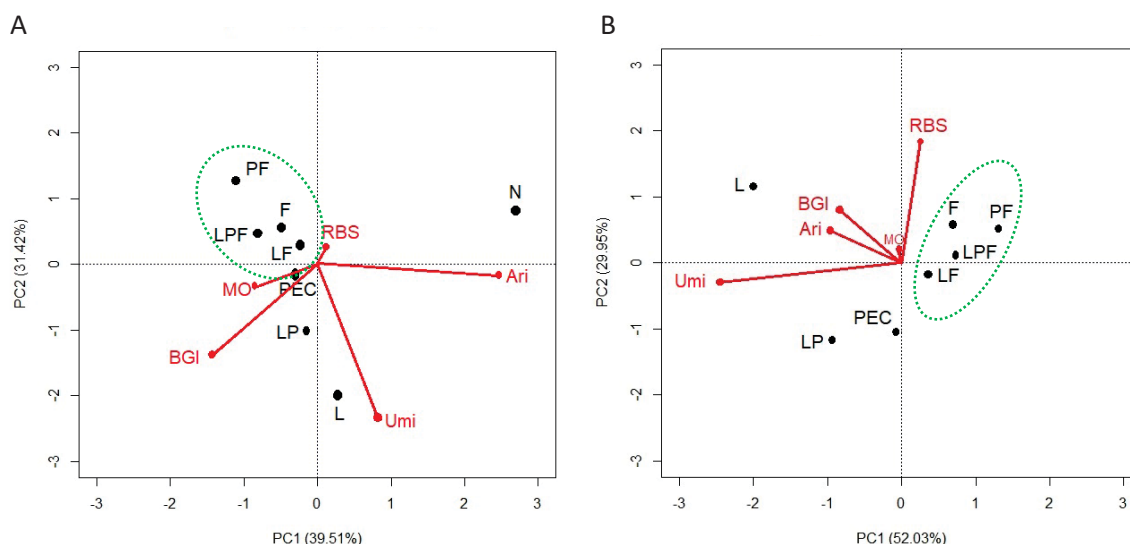


Figura 2 - Influência dos sistemas de cultivo sobre os indicadores bioquímicos e umidade do solo - A = com a área de vegetação natural (N); B = sem a área de vegetação natural (N).

Os gráficos A e B da *figura 2* comparam a influência dos sistemas de cultivo, com e sem os dados da área de vegetação nativa, respectivamente. Esta separação objetivou comparar com mais equidade os sistemas em estudo (já que estes receberam manejos de uso específicos, incluindo adubação), bem como melhores percentuais de explicação dos componentes principais; isso, sem perder de vista a comparação com o ecossistema natural.

O primeiro gráfico (2A) mostra o componente (*PC1*) explicando 39,5% da variação total do sistema “sistemas de cultivos *versus* indicadores bioquímicos”, e o *PC2* explicando 31%; já o gráfico (2B) apresenta *PC1*

explicando 52% e o *PC2* 30% da variação total. Considera-se, portanto, que as variações de *PC2* dos gráficos (31% e 30%) Portanto, as variações não explicadas nas Figuras 2A e 2B, respectivamente 29,5% e 18%, correspondem a variação aleatória, e não descritiva do fenômeno em questão.

É possível também notar que na análise dos dados excluindo-se as áreas de vegetação natural da análise (*Figura 2B*), o percentual de explicação da variação total aumentou, permitindo uma melhor observação das variações entre as áreas de manejo agropecuário.

Assim, o gráfico *Biplot* sem N (*Figura 2B*), evidenciou o contraste entre os sistemas que contêm o componente florestal (F) em seu arranjo {F; LF; PF; LPF} e o sistema de cultivo Lavoura (L). Já os sistemas, Pecuária (PEC) e Lavoura-Pecuária (LP), se agrupam em posição ligeiramente afastada dos demais.

Também ficou evidenciado que, enquanto o indicador MO foi pouco importante para explicar as variações, a atividade das duas enzimas (BGI e Ari) apresentou uma relação direta com a do sistema L; e a umidade do solo (Umi) se contrastou com os sistemas que contém floresta. Já os dois sistemas com pastagem, ou preponderância da pastagem, se posicionaram opostamente à respiração basal do solo (RBS).

Concluimos, então, que os sistemas de cultivo influenciam os indicadores bioquímicos de forma diferente, sendo possível formar, de forma sintética, três grupos com comportamentos homogêneos: G1 {L}; G2 {PEC, LP}; G3 {F; LF; PF; LPF}.

A importância das variáveis na variabilidade contida em “sistemas de cultivos *versus* indicadores bioquímicos e umidade relativa do solo” é apresentada na figura 3A, com a área de vegetação natural (N) e 3B: sem a área de vegetação natural (N)). Esta figura mostra que a concentração da enzima *Arilsulfatase* (36%) foi a mais relevante na explicação da variabilidade e diferenças entre os sistemas de cultivo, quando analisado com N. A Umi (36%)

a segunda mais importante, seguida pela concentração da enzima β -glucosidase (23%), enquanto que MO e RBS, que juntos explicaram 5% da variação total. Quando se retirou o sistema N da avaliação, foi possível notar um aumento significativo de importância da *Umi* e da *RBS*, que juntas somam 80% da variação total.

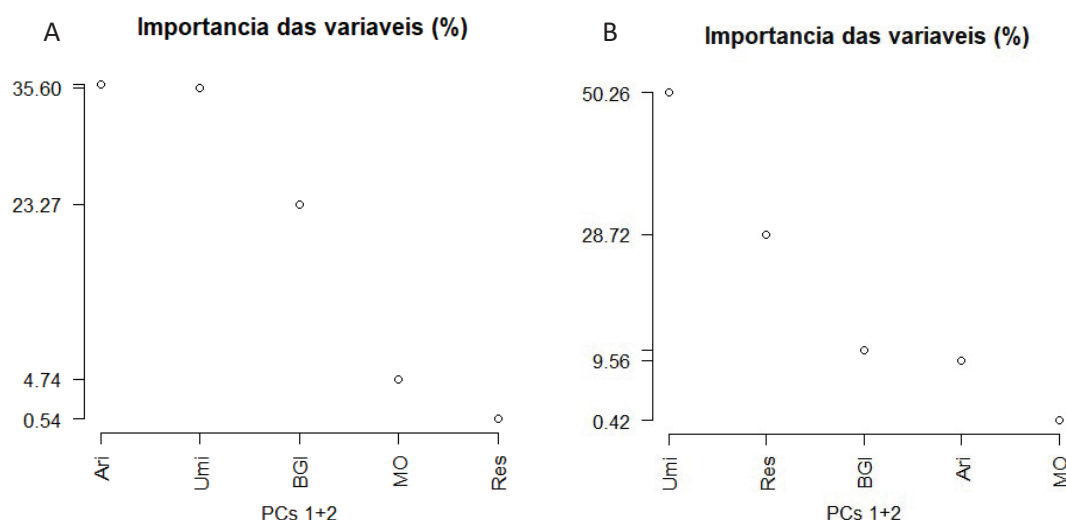


Figura 3 – Importância de indicadores bioquímicos e umidade do solo e matéria orgânica (A = com a área de vegetação natural (N); B = sem a área de vegetação natural (N)); variabilidade explicada por meio da Análise de Componentes Principais (PCA).

Quando se analisou os sistemas juntamente com o *N*, a atividade enzimática (*BGI* e *Ari*) e a umidade (*Umi*) capturaram 95% da variação e foram os mais influentes na formação de grupos homogêneos entre os sistemas de cultivo.

Já quando se considera os sistemas, sem a inclusão da área de vegetação natural é possível, em síntese, deduzir que, dentre as variáveis do grupo de indicadores bioquímicos, a *Umi*, *RBS* e *BGI* capturaram 90% da variação e foram determinantes na formação de grupos homogêneos entre os sistemas de cultivo.

Para se obter uma melhor compreensão do relacionamento destas variáveis, conforme os resultados da PCA, foi realizada a análise de Fatores.

Aqui os resultados foram expressos através de dois gráficos, conforme os dois fatores avaliados (Figura 4).

As cargas fatoriais e os scores (coordenadas) para cada tratamento, estão apresentados no Anexo 2 - Tabela 2C e 2D.

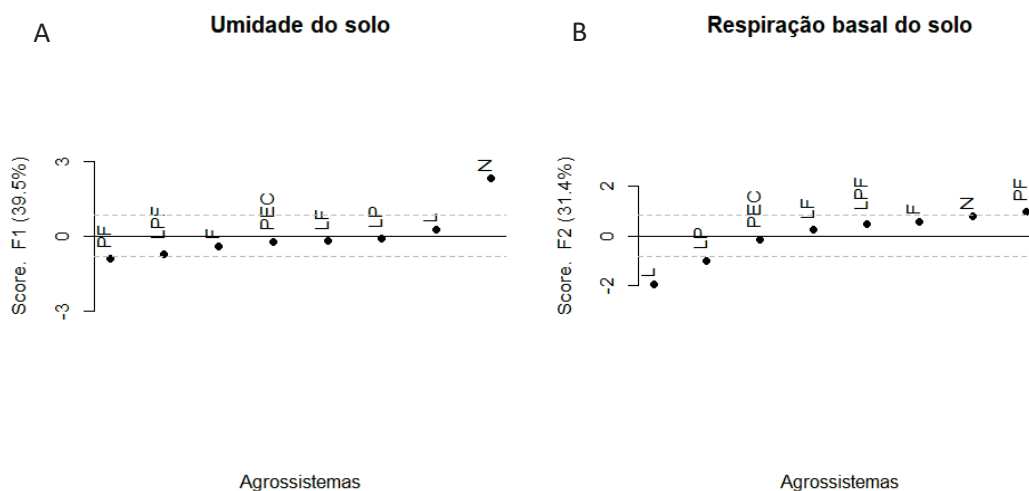


Figura 4 – Análise de fatores (AF) dos indicadores bioquímicos de qualidade do solo. Fator 1 determinado pela Umidade do solo (figura A); fator 2 determinado pela Respiração Basal do Solo (Figura B), em sistemas agrários e naturais estudados; profundidade 0-10cm. A linha pontilhada representa o intervalo de confiança de 95%.

Os gráficos A e B demonstram separadamente o efeito dos tratamentos sobre os indicadores bioquímicos do solo, considerando os dois fatores de análise, já que estas atenderam aos pressupostos necessários que explicam a variação.

O fator 1 (Figura 4A) capturou 52% e representa o efeito dos sistemas de produção sobre a umidade do solo, demonstrando como contraste o PF com o L. Neste caso, o L com maior e o PF com menor eficiência de manutenção de umidade no solo.

Já o fator 2 (Figura 4B) capturou 30% da variação e representa o efeito dos sistemas sobre a respiração basal do solo (RBS) e demonstra o contraste entre L e LP + PEC. Como indica a RBS e observando as médias pela análise univariada (Tabela 1), os sistemas LP e PEC resultaram em menores taxas de respiração e o sistema L com maiores taxas.

Dentre os sistemas de produção de alimentos comumente utilizados, os sistemas integrados possuem maior taxa de produtividade primária líquida (PPL). O aumento da deposição e manutenção de material orgânico no solo implica em aumento da PPL, que aumenta a atividade biológica (microrganismos), que por sua vez afeta a respiração basal do solo (*RBS*) e o aumento da atividade enzimática.

Consequentemente, a atividade enzimática é alterada em face da maior ou menor disponibilidade de material orgânico proporcionada pelos diferentes sistemas de cultivo (Mendes et al. 2021b). De fato, as concentrações das enzimas *β -glucosidade* e *Arisulfatase* variaram em função dos sistemas de cultivo (Tabela 1). Assim sendo, a atividade enzimática estudada se revela como indicador suficiente para associar, indiretamente, as diferenças na PPL entre os sistemas de cultivo estudados. Além disto, estas enzimas foram suficientes como indicadores de qualidade do solo por permitir agrupar os sistemas de cultivos em grupos homogêneos.

Considerando que a área original na qual o experimento foi instalado era degradada, e considerando que as enzimas refletem a memória do solo em resposta ao manejo adotado no sistema de produção, aqui será evidenciado que os SIPA, conferem melhor qualidade do solo por proporcionar maior deposição e acúmulo de *MO* no decorrer dos anos, causando maior atividade biológica e por consequência, maior atividade enzimática.

A qualidade do solo, avaliada por meio dos indicadores bioquímicos (Figura 2A) em áreas do sistema natural 'N' notoriamente contrastam com as áreas de sistemas de cultivo.

O sistema 'N', está em regeneração natural. Está em tendência a equilíbrio ambiental (homeostático), com baixo acúmulo de material orgânico no solo. Portanto, possui um solo com decomposição avançada de material orgânico mais antigo. Assim, este sistema N avaliado, comparado aos sistemas de manejo agropecuário, tem baixa atividade biológica, potencialmente com baixos níveis de *RBS* e baixa atividade da *β -glucosidase* (Tabela 1), a qual se

expressa preponderantemente na fase inicial da decomposição da MO. Por outro lado, este sistema evidencia importante atividade da *Arilsulfatase* (Tabela 1), que se expressa preferencialmente na fase mediana/tardia da decomposição da MO revelando que esta atividade enzimática se efetiva a partir de MO em estágio avançado de degradação.

Diferentemente, os sistemas de cultivo, contam com uma elevada produção anual de biomassa - seja através dos cultivos anuais de verão e de inverno, ou através dos cultivos perenes, as gramíneas de verão e árvores, conforme as características de cada sistema. O elevado acúmulo de material orgânico recente no solo configura um ambiente propício para o aumento da *RBS* e da atividade enzimática, especialmente de β -*glucosidase*. Soma-se a isso, a alta manutenção da MOS no decorrer dos anos, que confere atividade de enzimas que caracterizam etapas mais avançadas de decomposição da MO, especialmente da *Arisulfatase* (tabela 1), revelando-se, assim, como sistemas que favorecem a atividade enzimática como um todo.

Assim, ficou evidente que os dois sistemas - L e N - são bem diferentes em sua composição e manejo. Se por um lado o ambiente natural (em reestabelecimento natural) apresenta baixa atividade relacionada ao uso do solo, o L tem intensa dinâmica no uso do solo, porém, com manejo conservacionista. A quantidade elevada da concentração da β -*glucosidase* no sistema de cultivo L diferencia-se particularmente daquela observada no sistema N, uma vez que o sistema de cultivo L disponibiliza maior incremento de material orgânico em curto prazo.

Note que, no presente estudo, o sistema N ainda está em processo de recomposição natural, implicando, também, em baixo acúmulo de material orgânico (menor PPL), com prevalência da *Arisulfatase* em relação a β -*glucosidase*, enzima especialmente importante para diferenciar sistemas estáveis em relação aos sistemas com maiores atividades de manejo e adubações.

Além do importante contraste entre si, os sistemas “N” e “L” também contrastam com os sistemas nos grupos G3 {P; LP} e G4 {F; LF; PF; LPF} (Figura 4) evidenciando que existem diferenças nas atividades enzimáticas em face do sistema de cultivo. Note, também, que estes {F; P; LF; LP; PF; LPF} são caracterizados pela intensa aplicação de fertilizantes e intenso crescimento de plantas.

Os sistemas {P; LP} são muito parecidos entre si. Enquanto o sistema ‘P’ representa a presença de pecuária permanentemente, o sistema ‘LP’ trata de ciclos de exploração pecuária por três anos seguido de Lavoura no quarto ano, e apenas pelo período de, aproximadamente, 150 dias, no verão. Por isto, estes dois sistemas são muito semelhantes em termos de atividades enzimáticas.

Nestes sistemas, o pastoreio contribui para o acúmulo de carbono no solo, pela grande deposição de material (sobra de capim e dejetos animais). O elevado acúmulo de material orgânico recente no solo configura um ambiente propício para o aumento da RBS e da atividade *β -glucosidase*. Por outro lado, a intensa deposição constante de material orgânico no decorrer dos anos também confere grande atividade da *Arisulfatase* (tabela 1), revelando-se, assim, como um sistema que favorece a atividade enzimática como um todo.

De fato, o que se observa entre os sistemas P e LP, considerando os indicadores orgânicos de qualidade do solo é que eles não se diferem de forma relevante posto que tanto para a *β -glucosidade* quanto para a *Arisulfatase* apresentaram valores semelhantes, o que reflete a semelhança entre as influências destes sistemas sobre a qualidade do solo, com predominância do efeito da pastagem no sistema LP, ainda que este sistema contemple algum efeito da lavoura, notadamente porque a coleta foi realizada no final do período da lavoura.

Por outro lado, os sistemas {F; LF; PF; LPF} evidenciaram comportamento mediano em relação aos demais sistemas de cultivo. Note que no gráfico Biplot (figura 4) eles se posicionaram próximos ao ponto {0,0}, e dentro

do intervalo de confiança de 95% para os dois componentes principais (PC1 e PC2).

O grupo G4 reuniu os sistemas de cultivo que contém o componente florestal. O equilíbrio biogeoquímico destes sistemas é estabelecido conforme a sua evolução no tempo (Zhou et al. 2002, Mohamed et al. 2004, Jamhour and Assmann 2017, Lemaire 2017). Isso pode explicar o agrupamento dos sistemas que possuem a integração de componentes como aqueles de comportamentos intermediários, uma vez eles estão há nove anos em atividade, e, provavelmente, já expressem características que apontam para o equilíbrio.

Estes sistemas também têm maior número de componentes, com melhores condição para aumentar a ciclagem de nutrientes (Anghinoni et al. 2011), o que pode explicar o motivo da atividade enzimática não ser suficiente para distinguir os ambientes integrados entre si. Apresentaram um perfil intermediário quanto à concentração da enzima *β -glucosidase* no solo, provavelmente em decorrência da homeostase no solo em face da estabilidade promovida pela diversificação de fenômenos causados pela interrelação entre estes componentes - os chamados serviços ambientais (Lemaire 2017).

O equilíbrio biogeoquímico dos sistemas, repercutindo a harmonia entre os componentes, pode explicar o agrupamento ou a separação entre os sistemas (Lemaire 2017). O principal contraste associado à concentração de Ari - {N} (G1) *versus* G3 {P; LP} e G4 {F; LF; PF; LPF } (figura 4) pode ser explicado pela atividade desta enzima ser mais alta (tabela 1) em áreas de menor intensidade de manejo.

As enzimas foram evidenciadas como importantes descritores para se conhecer a qualidade do solo, com sensibilidade suficiente para discernir bem os sistemas de manejo com maior e menor intensidade de entrada periódica de material orgânico, ao contrastar significativamente os sistemas 'L' e o 'N', diferentes entre si, e ao mesmo tempo, distingui-los dos demais sistemas de cultivo.

No entanto, também foi possível perceber que ambas as enzimas não foram suficientes para identificar diferenças entre os sistemas de cultivo que envolvem mais de um componente; sinalizando-se como uma característica de equalização dentro destes sistemas, promovido provavelmente pela interação dos seus componentes (Moraes 2018). Notadamente porque os sete sistemas, implantados há nove anos, provavelmente já expressem características que apontam para o equilíbrio.

4.3 ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO (IQS) APLICADO COM OS DADOS DOS INDICADORES BIOQUÍMICOS

Para se obter um resultado mais conclusivo e que sintetize as evidências apresentadas até então para a determinação da qualidade do solo nos sistemas, propõe-se a aplicação do Índice de Qualidade do Solo (IQS) utilizando-se os dados da análise de fatores das variáveis referentes aos indicadores bioquímicos (Figura 5).

Os scores (coordenadas) dos sistemas avaliados e as cargas fatoriais estão apresentados no Anexo 2 - Figuras 2E e 2F.

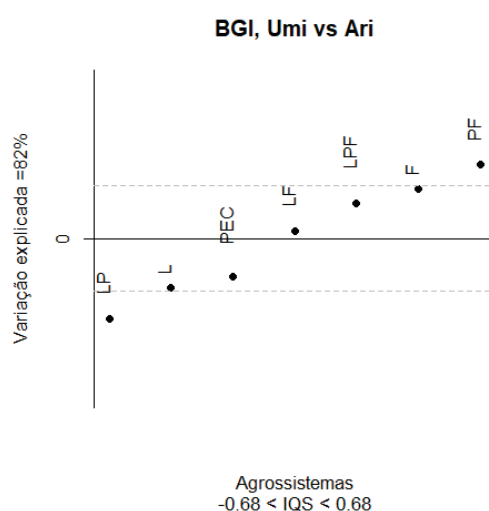


Figura 5 - Índice de Qualidade do Solo (IQS) baseado nos indicadores bioquímicos. IQS reflete o contraste entre BGI e Umi versus Ari. A linha pontilhada representa o intervalo de confiança de 95%. $\text{IQS} = -1,02\text{LP} - 0,63\text{L} - 0,48\text{PEC} + 0,09\text{LF} + 0,46\text{LPF} + 0,63\text{F} + 0,96\text{PF}$.

Nitidamente, o IQS para os indicadores bioquímicos destaca o contraste entre o sistema LP, com solos de melhor qualidade, e, os sistemas PF e F, com

solos de menor qualidade. Os demais sistemas, não diferiram entre si em análise destes indicadores.

4.4 INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE CULTIVOS SOBRE A MACROFAUNA (OLIGOQUETAS)

As minhocas são excelentes indicadoras ambientais (Brown and Fragoso 2007, Brown and James 2007, Brown and Domínguez 2010, Brown et al. 2013). A influência dos sistemas de cultivo na qualidade biológica do solo foi avaliada por meio da macrofauna considerando a população de Oligoquetas (Brown and Fragoso 2007, Brown and Domínguez 2010), que representam cerca de 80% da biomassa da macrofauna do solo.

Foram avaliados a biomassa (**B**) e o número (**N**) de indivíduos (adultos (**A**), juvenis (**J**) e casulos (**C**) para os quatro gêneros de Oligoquetas encontrados na área experimental: *Amyntas* (**A**), *Pontoscolex* (**P**), *Glossoscolex* (**G**) e *Bimastos* (**B**). Foram encontrados poucos espécimes dos gêneros *Glossoscolex* e *Bimastos*; e por isto os dados referentes não são mostrados. A biomassa total (**T**) consiste na soma da biomassa referente aos indivíduos adultos, juvenis, e fragmentos de indivíduos. O número total (**T**) consiste na soma do número de indivíduos adultos, juvenis e de caudas encontradas na amostra.

Assim, a variável 'Biomassa do gênero Pontoscolex Aultos' doravante será designada por '**BPA**'. O mesmo critério de identificação é adotado para as demais variáveis.

A ANOVA revelou que os efeitos dos tratamentos NÃO foram significativamente diferentes de zero ($p < 0,05$) para as variáveis **BAC**, **NAJ**, **NAC** (Gênero *Amyntas*) (Tabela 2) e todas as variáveis descritoras do gênero *Pontoscolex* (Tabela 3). Médias com conjunto de letras iguais não diferem significativamente entre si.

Tabela 2 - Médias da biomassa e número de Oligoquetas do gênero *Amyntas* em solo dos sistemas de cultivo.

Agroecossistemas	BAA	BAJ	BAT	BAC	NAA	NAJ	NAT	NAC
N	4,22	d	b	c	a	d	a	c
L	30,08	abc	b	ab	a	ab	a	ab
PEC	8,13	bcd	b	bc	a	bcd	a	bc
F	2,40	d	b	c	a	cd	a	c
LP	31,98	ab	b	ab	a	ab	a	a
LF	35,18	a	a	a	a	a	a	a
PF	4,86	cd	b	c	a	cd	a	c
LPF	27,58	abcd	b	abc	a	abc	a	abc
CV	49,36	45,06	42,96	-	43,41	67,94	37,20	
p_valor*	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,07	0,00	

*p-valor: ANOVA, efeitos de tratamentos. CV: coeficiente de variação (%). Tratamentos com letras semelhantes não diferem entre si (p<0,05).

BAA: Biomassa do gênero *Amyntas* Adultos; BAJ: Biomassa do gênero *Amyntas* Juvenis; BAT: Biomassa do gênero *Amyntas* Total; BAC: Biomassa de Casulos do gênero *Amyntas*; NAA: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Adultos; NAJ: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Juvenis; NAT: Número Total de indivíduos do gênero *Amyntas*; NAC: Número de Casulos do gênero *Amyntas*.

Tabela 3 - Médias da biomassa e número de Oligoquetas do gênero *Pontosclex* em solo dos sistemas de cultivo.

Agroecossistemas	BPA	BPJ	BPT	BPC	NPA	NPJ	NPT	NPC
N	0,18	a	a	a	1,07	a	a	a
L	3,96	a	a	a	9,60	a	a	a
PEC	9,14	a	a	a	25,60	a	a	a
F	0,00	a	a	a	0,00	a	a	a
LP	7,57	a	a	a	23,47	a	a	a
LF	0,00	a	a	a	0,00	a	a	a
PF	0,52	a	a	a	1,07	a	a	a
LPF	0,46	a	a	a	2,13	a	a	a
CV	246,13	203,30	227,83	-	247,10	187,42	194,86	-
p_valor*	0,52	0,36	0,47	-	0,52	0,50	0,49	-

*p-valor: ANOVA, efeitos de tratamentos. CV: coeficiente de variação (%). Tratamentos com letras semelhantes não diferem entre si (p<0,05).

BPA: Biomassa do gênero *Pontosclex* adultos; BPJ: Biomassa do gênero *Pontosclex* juvenis; BPT: Biomassa Total do gênero *Pontosclex*; BPC: Biomassa de Casulos do gênero *Pontosclex*; NPA: Número de indivíduos do gênero *Pontosclex* Adultos; NPJ: Número de indivíduos do gênero *Pontosclex* Juvenis; NPT: Número Total de indivíduos do gênero *Pontosclex*; NPC: Número de Casulos do gênero *Pontosclex*.

A ANOVA permitiu observar uma tendência de agrupamentos conforme as diferenças estatísticas obtidas pelo teste de médias. Observando as variáveis que identificaram diferenças estatísticas, foi possível agrupar os sistemas em:

BAA → G1: {LF}; G2: {N; F} e G3: {LP; L; LPF; PEC; PF}

BAJ → G1: {LF}; G2: {PEC; L; F; LPF; LP; PF; N}

BAT → G1: {LF}; G2: {F; PF; N}; G3: {LP; L; LPF; PEC}

NAA → G1: {LF}; G2: {N}; G3: {L; LP}; G4: {PF; F}; G5: {LPF; PEC}

NAT → G1: {LP}; G2: {F; N; PF}; G3: {LF; L; LPF; PEC}

Considerou-se para esta proposta, o G1 e o G2 os agrupamentos de maior contraste entre si e, os G3 e G4, grupos intermediários, que englobam sistemas com semelhanças a G1 ou a G2.

Estes agrupamentos permitiram identificar que o sistema LF se destacou como principal contraste (G1) com os demais sistemas, para a maioria das variáveis avaliadas. O que pode se justificar pelo fato deste sistema (LF) possuir o componente lavoura, com os princípios do Plantio Direto, como produtor e mantenedor de biomassa, juntamente com o componente arbóreo já estabelecido, o que cria um microclima favorável ao estabelecimento das minhocas.

Já o agrupamento G2 reúne especialmente o sistema Natural, acompanhado em muitas das variáveis analisadas pelo sistema Floresta e ou pelo sistema PF. As semelhanças entre sistemas que contêm o componente florestal e a vegetação natural, podem estar relacionadas à homeostase mais comum aos mesmos, pelas menores intervenções e práticas do que o componente Lavoura, por exemplo, promove. O que, podem contribuir menos para a atividade biológica.

Quanto aos G3 e G4, ressalta-se os agrupamentos que envolvem os componentes Lavoura e Pecuária, como influenciadores intermediários dos indicadores de qualidade que refletem na população de minhocas.

Notadamente, exceto para o número total de Gênero *Amyntas*, o LF se destacou como referência de maiores médias de biomassas e de números de

minhocas nestas variáveis, indicando a sua relevante condição de manter a população de minhocas. E, observando de forma mais geral, os sistemas N, F e PF se destacaram com menores médias, sendo que o N aparece em todos os agrupamentos de principal contraste com o LF.

É necessário, ainda, avaliar se a análise conjunta dos indicadores de macrofauna pode ser importante para avaliar a influência de sistemas de cultivo sobre a qualidade do solo. Isto é, estamos interessados em avaliar “Como estes indicadores, em conjunto, agrupam os sistemas de cultivo?”

A análise de componentes principais (PCA) oferece recursos que permitam identificar direções e sentidos que expliquem os contrastes entre estes grupos.

Os resultados da PCA para o grupo dos indicadores de macrofauna são graficamente apresentados na figura 6. Para informações suplementares (autovalores e autovetores) ver anexo 3 - Tabela 3A e 3B.

Para avaliar a influência dos sistemas de cultivo sobre as Oligoquetas, foi adotado o conjunto de variáveis {BAA; BAJ; BPA; BPJ e NAA; NAJ; NPA; NPJ}, tratando de forma separada - biomassa (Figura 6A) e número (Figura 6B), já que se apresentam notoriamente colineares.

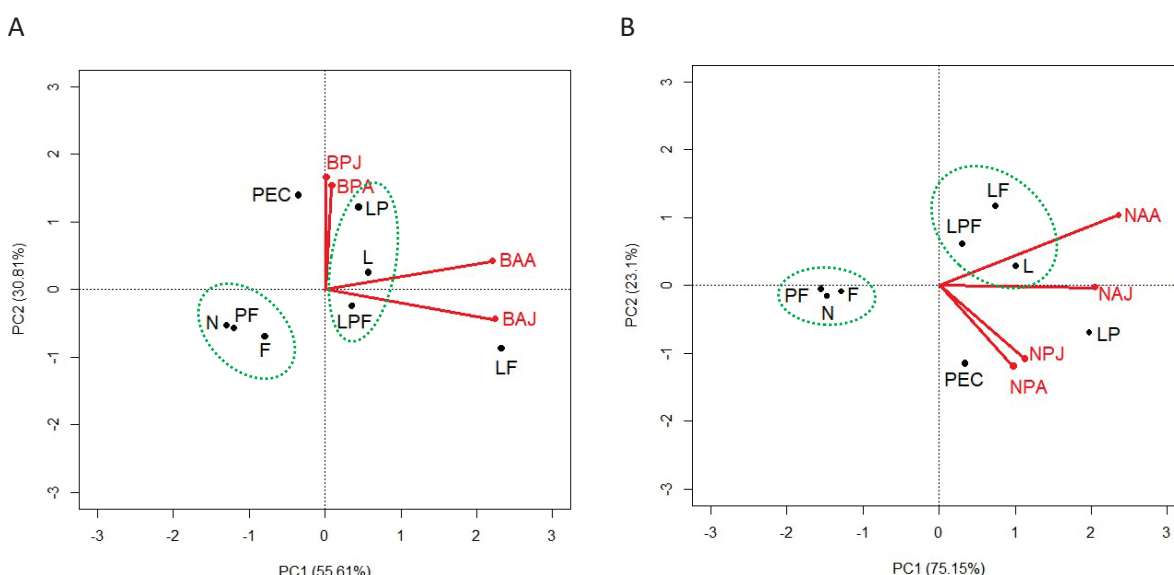


Figura 6 - Influência dos sistemas de produção sobre a Biomassa (A) de adultos e de juvenis; e, sobre o Número (B) de adultos e de juvenis, dos gêneros *Amyntas* e *Pontoscolex*.

A PCA-Biplot (figura 6A), que leva em conta os indicadores de Biomassa de minhocas, evidenciou que os sistemas de cultivo podem ser agrupados, genericamente, em: G1: {LPF; L; LP} em contraste com G2: {N; F; PF}. O sistema LF expressou um destaque, demonstrando forte relação com a biomassa do gênero *Amyntas* e o sistema PEC com a biomassa do gênero *Pontoscolex*.

A PCA que considera o número de indivíduos de minhocas (Figura 6B) agrupou de forma muito semelhante à análise anterior em G1: {LF; LPF; L} em contraste com G2: {N; F; PF}. De igual modo ao resultado da PCA com biomassa, o sistema PEC se expressa com relação maior ao gênero *Pontoscolex* quando se avaliou o número de indivíduos deste gênero. E, nesta análise, o sistema LP se destacou dos demais de forma mediana, porém indicando relação com os dois gêneros analisados.

A importância percentual de cada uma das variáveis na realização dos agrupamentos por meio da PCA é evidenciada por meio da Figura 7, demonstrando que as variáveis BAA; BAJ; BPA; BPJ têm importância equilibrada na expressão da variabilidade, quando comparadas a NAA; NAJ; NPA; NPJ.

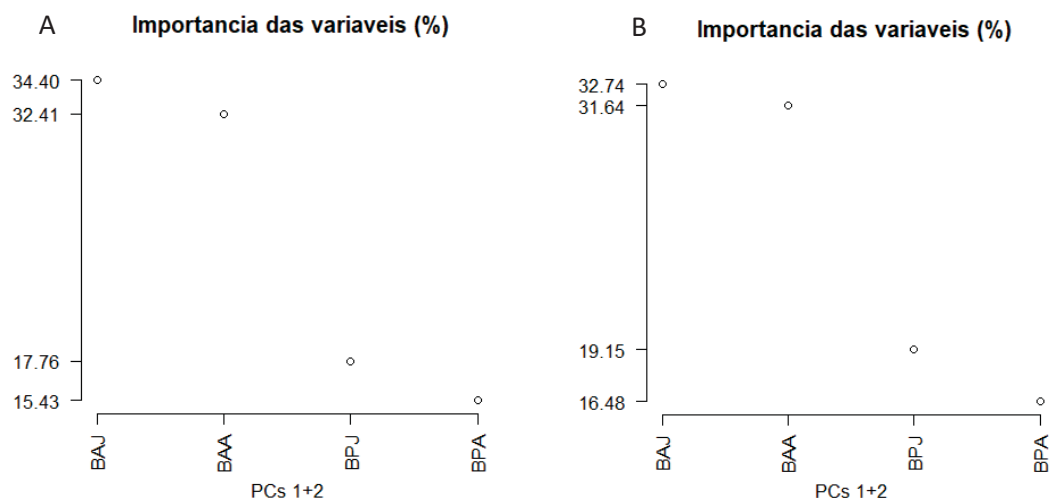


Figura 7 - Importância dos indicadores de macrofauna no agrupamento dos sistemas estudados. A = BAT (Biomassa Total do gênero *Amyntas*) e BPT (Biomassa Total do gênero *Pontoscolex*). B = NAT (Número Total do gênero *Amyntas*) e NPT (Número Total do gênero *Pontoscolex*).

A PCA trouxe maiores elucidações acerca da influência dos sistemas avaliados sobre a população de minhocas. Os agrupamentos observados quando se analisa a dimensão PC1, tanto para a variável de biomassa quanto

de número de indivíduos, reúnem todos os sistemas que contém o componente lavoura, em contraste aos sistemas F, PF e N; notadamente os sistemas que estão sob maior influência, ou são de maior semelhança ao componente floresta. Apenas o sistema PEC demonstra uma influência intermediária nesta dimensão de análise, porém com tendência a se agrupar com os sistemas de lavoura.

Buscando-se uma melhor compreensão do relacionamento destas variáveis, foi realizada a Análise de Fatores, conforme os resultados da PCA. Aqui os resultados foram expressos através de dois gráficos com a biomassa das minhocas (Figura 8A) e dois com o número de indivíduos (Figura 8B), conforme os dois fatores avaliados. As cargas fatoriais e os scores (coordenadas) para cada tratamento, estão apresentados no Anexo 3 - Tabelas 3C, 3D, 3E, 3F, 3G e 3H.

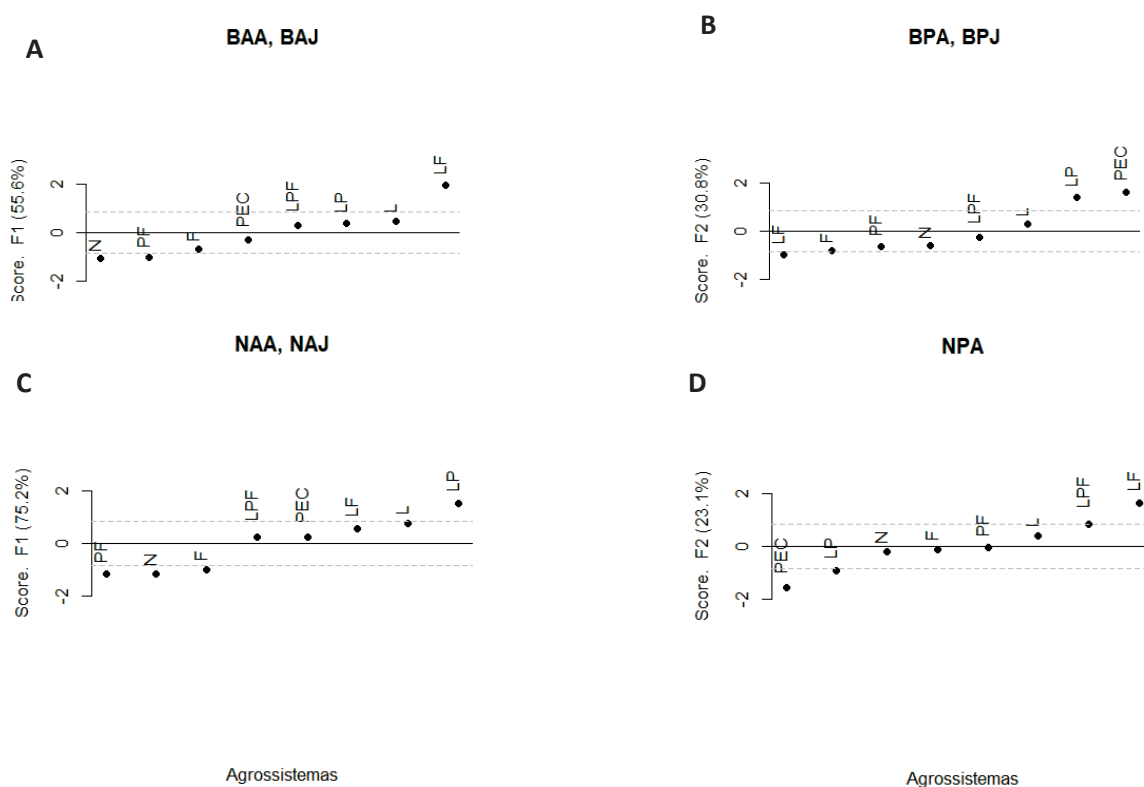


Figura 8 - Análise de fatores (AF) dos indicadores de macrofauna do solo. Biomassa, Figuras A e B; Número de indivíduos, Figuras C e D. A: Fator 1 determinado pela Biomassa do gênero *Amyntas* (Adultos BAA, e Juvenis BAJ); B: Fator 2 determinado pela Biomassa do gênero *Pontoscolex* (Adultos BPA, e Juvenis BPJ); C: Fator 1 determinado pela Número de indivíduos do gênero *Amyntas* (Adultos NAA, e Juvenis NAJ); D: Fator 2 determinado pela Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Adultos NAA), nos solos dos sistemas agrários e naturais estudados, profundidade 0-20cm. A linha pontilhada representa o intervalo de confiança de 95%.

O fator 1 da análise com a biomassa de minhocas (8A) capturou 55,6% da variação e evidencia o contraste entre LF e {N; PF) identificado pelos adultos e juvenis do gênero *Amyntas*. Já o fator 2 (8B), capturou 30,8% da variação e destaca o contraste entre LF e {LP; PEC}, determinado pela avaliação da biomassa do gênero *Pontoscolex* nestes sistemas.

Já para o número de indivíduos, o fator 1 (8A) mostra o contraste entre o sistema LP e {PF; N; F} quando se avaliou o número de adultos e juvenis da *Amyntas*; enquanto o fator 2 (8B) revela o contraste entre {LF; LPF} e {PEC; LP}, quando se avaliou o número de adultos do *Pontoscolex*.

Tanto para a biomassa como para o número de minhocas, o fator 1 destaca o efeito dos sistemas sobre a população de *Amyntas* e o fator 2 sobre a população de *Pontoscolex*.

De forma sintética pode-se sugerir que os sistemas que contém o componente lavoura apresentaram maior população, enquanto que os sistemas F, PF e N foram os que apresentaram menores população de minhocas.

Para compreender o que pode acontecer em sistemas integrados com componente floresta, é importante a atenção com o espaçamento e a fase com que se encontram as árvores, pois podem refletir na conjuntura dos outros componentes, seja lavoura ou pasto. Trabalhos como o realizado por (Porfírio-da-Silva 2018), têm mostrado a importância da adequada instalação do componente arbóreo, propriamente para se evitar efeitos negativos do sombreamento excessivo e potencialização de competições por nutrientes e água sobre o sistema.

A avaliação geral do componente arbóreo destaca o efeito das árvores no solo. A análise feita por (Porfírio-da-Silva 2018) em seu capítulo sobre o componente arbóreo em SIPA, destaca que o fator de aporte de C, a grande associação com micorrizas, a redução de perdas do solo e a melhoria de condições para a manutenção da atividade biológica, são papéis bem estabelecidos pelas árvores.

Contudo, há evidências de redução da umidade superficial do solo em áreas com inserção do componente arbóreo (Lima 2018). O que pode refletir diretamente na redução da quantidade e da biomassa de minhocas, já que estes organismos possuem direta relação com os parâmetros de conservação do solo, especialmente com a condição do solo em manter a umidade (Paoletti 1999).

(Lima 2018) verificou a influência negativa na umidade do solo e na produtividade das culturas agrícolas em função da proximidade das árvores. Marchioro, identificou locais onde a produtividade do milho decaiu a partir do segundo ano de cultivo e a produtividade da soja foi menor, em ambos os sistemas ILPF. E quantificou a água no solo e concluiu que o componente florestal em sistemas ILPF diminui a quantidade de água na área entre renques.

Ressalta-se que esta influência da floresta não é ruim. Apenas se demonstra que, comparativamente, o sistema lavoura (com manejo de intensificação sustentável) pode proporcionar melhores condições para o desenvolvimento da macrofauna. Especialmente em locais que atendam às regulamentações de uma Área de Proteção Ambiental (APA). Sendo uma lavoura em padrões convencionais, especialmente quando se utiliza preparo mecanizado do solo, não se espera tais resultados.

Existe um fator importante a ser ressaltado, como fenômeno secundário em sistemas que contém o componente florestal. Áreas com menor intensidade na entrada de biomassa pela produção primária líquida (PPL), e ou, homeostase, contribuíram menos para a atividade biológica no solo. É necessário destacar que os sistemas N; F e PF não possuem lavoura e são influenciados especialmente pela formação florestal, natural ou implantada.

O sistema Lavoura neste experimento adota critérios que o destaca como depositário e mantenedor de grandes cargas de material orgânico sobre o solo. Ao longo do tempo os sistemas que possuem o componente lavoura, vêm sendo nitidamente marcados por melhoria de condições favoráveis à promoção da macrofauna; como o acúmulo de massa seca (MS), que, no último ciclo de avaliação, mostra valores de destaque para um sistema agropecuário (Figura 8).

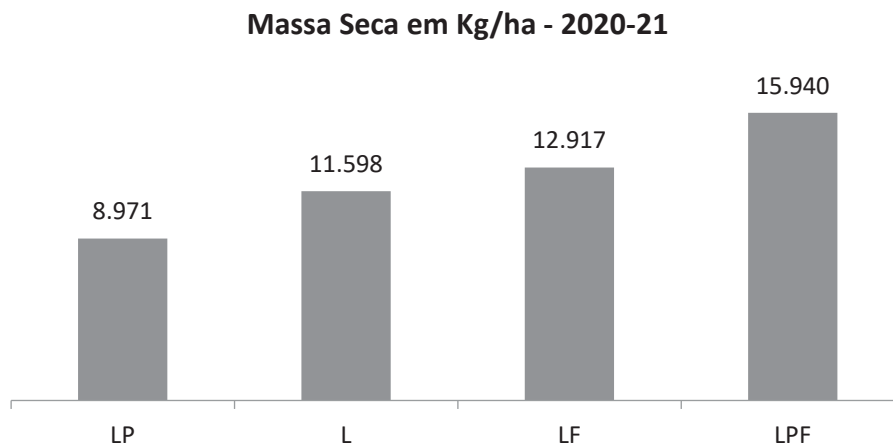


Figura 9 - Média da produção de massa seca (kg/ha) no ciclo de milho 2020/21 dos tratamentos com componente Lavoura do experimento do Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária (NITA). (Dados do protocolo de avaliação do experimento de campo do NITA, 2020-2021).

Observando este gráfico nota-se que até o sistema com menor taxa de acúmulo de MS (LP) ainda contém substancial contribuição, acima do mínimo necessário para uma boa condição de manutenção do sistema Plantio Direto (PD), como afirma Alvarenga, et. al (2001), que deve ser de no mínimo seis toneladas por hectare.

Quanto aos sistemas que contêm o componente animal (PEC), também demonstraram influência intermediária. A possibilidade de se obter semelhanças entre sistemas de pecuária com sistemas de lavouras bem manejadas é possível. Os animais exercem papel de grande influência na ciclagem de nutrientes no sistema. A produção e deposição de seus excrementos é sabidamente relevante sobre a área e pode refletir em aumentos de produtividade expressivos. (Carvalho et al. 2011) encontraram relação positiva entre a concentração de placas de esterco, a disponibilidade de nutrientes no solo e o rendimento da soja.

(Carvalho et al. 2010) estudaram o manejo de animais em pastejo para alcançar ciclagem de nutrientes e melhoria do solo sistema de plantio direto e concluíram que os animais são um componente catalisador do sistema de produção, que o pastejo sobre áreas de cultivo de grãos e que influencia as

propriedades do sistema, de forma positiva ou negativa, dependendo do manejo de pastagem que se emprega.

Nestes termos, sintetizando os resultados da avaliação da qualidade do solo nestes sistemas de cultivo, confirma-se que é possível categorizar os mesmos com base no grupo de análise multivariada utilizado, em sistemas sob influência do componente lavoura de baixo consumo e sistemas sob influência do componente arbóreo em espaçamento adensado.

A referência das minhocas como bons bioindicadores é bem estabelecida na literatura. Como bem cita (Paoletti 1999) estes organismos atuam como bioindicadores de perturbação, bem como da qualidade do solo.

4.5 ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO (IQS) APLICADO COM OS DADOS DOS INDICADORES DE MACROFAUNA.

Buscando-se um resultado mais conclusivo e que sintetize as evidências apresentadas até então para a determinação da qualidade do solo nos sistemas, propõe-se a aplicação do Índice de Qualidade do Solo (IQS) utilizando-se os dados da análise de fatores das variáveis referentes à macrofauna (Figura 10).

As cargas fatoriais e os scores (coordenadas) dos sistemas avaliados, estão apresentados no Anexo 3 - Tabelas 3I, 3J, 3K e 3L.

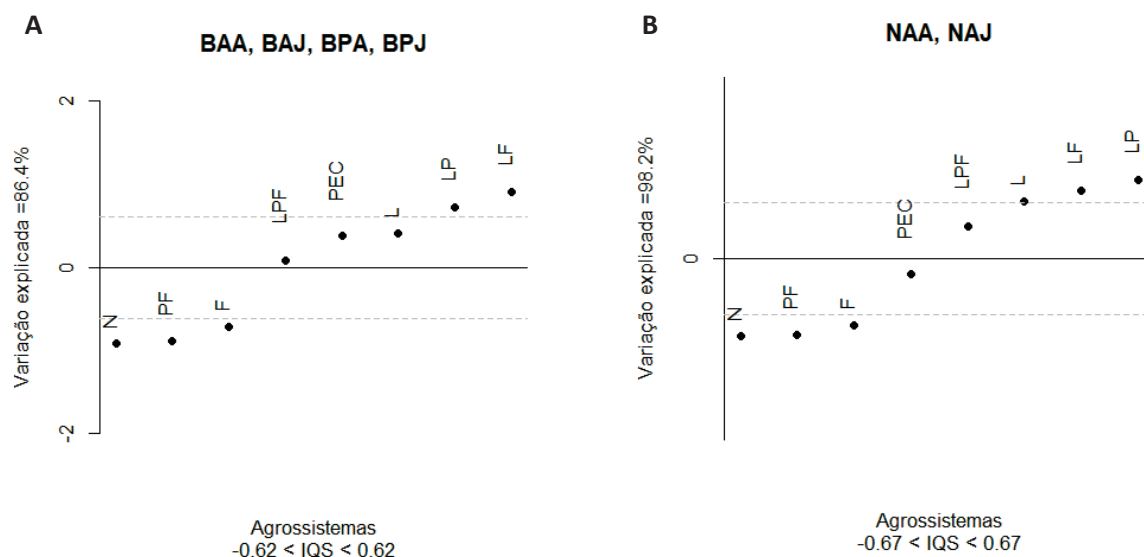


Figura 10 – Índice de Qualidade do Solo (IQS) baseado nos indicadores de macrofauna. A: com biomassa de minhocas, repercutindo a influência dos indivíduos adultos e juvenis dos gêneros *Amyntas* e *Pontoscolex* e B: com número de minhocas, repercutindo a influência dos indivíduos adultos e juvenis apenas do gênero *Amyntas*. Intervalo de confiança de 95% de probabilidade. **IQS (Biomassa) = - 0,91N -0,88PF -0,72F +0,08LPF +0,38PEC +0,42L +0,73LP +0,90LF. IQS (Número) = -0,92N -0,91PF -0,79F -0,18PEC +0,38LPF +0,68L +0,81LF +0,93LP.**

Os gráficos de possibilitaram indicar com mais clareza os sistemas LP e PEC com qualidade superior de solos e os sistemas N; PF e F com qualidade inferior de solo, quando se avalia a biomassa de minhocas. Já a avaliação do número de minhocas resultou em melhor avaliação os sistemas LF e L e com menor qualidade o solo dos sistemas PEC, N, PF e F.

4.6 INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE CULTIVOS SOBRE A QUÍMICA DO SOLO

A ANOVA revelou que os efeitos dos tratamentos foram significativamente diferentes de zero (Teste F, $p < 0,05$) para as variáveis: pH; P; Ca; Al; HAl; SB; BV. Ainda que Mg não tenha revelado significância no teste F (Teste F, $p.\text{valor} = 0,07$), o teste Tukey distinguiu os tratamentos entre si. Médias com conjunto de letras iguais não diferem significativamente entre si (Teste Tukey) (Tabela 4).

As variáveis pH, Al, HAl, Ca e BV tão somente distinguiram entre o que foi observado no solo sob vegetação natural N e sob os demais sistemas de cultivo (contraste {N} versus {L; P; F; LP; LF; PF; LFP}). A CTC não foi significativamente diferente de zero e não distinguiu nenhum dos sistemas de cultivo entre si; e apenas os teores de P; K; Mg e a SB, puderam diferir os sistemas de cultivos entre si, em mais agrupamentos, e distinguir os sistemas de cultivo do sistema natural 'N', como segue: P: {N} *versus* {F;LF;LFP}; K: {PF} *versus* {L}; Mg: {N} *versus* {F}; SB: {N} *versus* {L;P;F;LP;LF} (Tabela 4)

É importante destacar que o sistema 'N' jamais recebeu qualquer adubação ou correção do solo, o que o torna atípico quanto ao objetivo pretendido de encontrar indicadores químicos que revelem o efeito dos sistemas aqui estudados sobre a qualidade do solo. Com isso, foi necessário analisar os sistemas incluindo e não incluindo o sistema N.

Quanto às variáveis estudadas, foram consideradas, para fins de indicadores da influência dos sistemas na qualidade química do solo, as variáveis P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e HAl. As demais variáveis não foram consideradas porque não evidenciaram diferenças significativas entre os sistemas (teste F), ou porque não foram consideradas relevantes nesta fase da pesquisa, atendendo ao princípio da parcimônia.

Tabela 4 - Médias dos valores de atributos químicos do solo nos sistemas de cultivo.

Agroecosistemas	pH	P	K	Ca	Mg	Al	HAI	SB	CTC	BV		
N	4,39	b	0,29	bc	b	0,32	a	4,83	b	a	37,5	b
L	5,16	a	0,58	a	3,15	ab	b	8,9	a	a	68,17	a
PEC	5,06	a	0,46	abc	a	0,00	b	7,87	a	a	68,1	a
F	5,05	a	0,39	abc	a	0,00	b	8,93	a	a	68,7	a
LP	5,02	a	0,57	ab	a	0,00	b	8,03	a	a	66	a
LF	4,98	a	0,42	abc	a	0,00	b	8,23	a	a	68,03	a
PF	5,06	a	0,26	c	a	0,00	b	7,6	ab	a	66,53	a
LPF	5,12	a	0,37	abc	a	0,00	b	7,67	ab	a	67,43	a
CV	3,77	32,16	22,99	12,19	18,7	131,15	17,37	13,44	0,55	10,97		
p valor*	0,01	0,00	0,01	0,00	0,07	0,00	0,00	0,01	0,11	0,00		

*p-valor: ANOVA, efeitos de tratamentos. CV: coeficiente de variação (%). Tratamentos com letras semelhantes não diferem entre si pelo teste Tukey (p<0,05). pH: Potencial Hidrogeniônico; P: teor de fósforo no solo, K: teor de potássio no solo; Ca: teor de cálcio no solo; Mg: teor de magnésio no solo; AI: teor de alumínio no solo; HAI: soma do teor de hidrogênio e de alumínio no solo; SB: soma de bases; CTC: Capacidade de troca de cátions e BV: Saturação de bases.

Enquanto pH; Ca^{2+} ; Al^{3+} ; HAI e BV% apenas diferenciaram as áreas de cultivos do ambiente de vegetação natural, o Fósforo (P), o Potássio (K), a Soma de Bases (SB) e a Porcentagem de Saturação de Bases (BV%) puderam diferenciar os agrossistemas e agrupá-los conforme suas semelhanças (Tabela 4).

Os resultados revelam muito sobre o manejo de adubação que foi adotado no experimento como um todo. Pelo fato de a área experimental ter sido degradada, houve desde a implantação, aplicação anual de fertilizantes. Tais aplicações permitiram que as concentrações destes nutrientes fossem eficazes na diferenciação dos sistemas.

A correção da fertilidade do solo, antes da instalação do experimento (exceto na área de vegetação natural 'N'), por meio da adição de lodo de esgoto tratado e de P_2O_5 causou uma elevação dos níveis de P, K, Ca, Mg. Além disto, exceto nas áreas de vegetação natural 'N', foram aplicados uma ou duas vezes por ano, fontes de Nitrogênio, de Fósforo e de Potássio, em doses, necessária e relativamente altas (ver anexo 1), para a boa suplementação de nutrientes e bom estabelecimento dos sistemas de produção.

Portanto, para a avaliação dos contrastes entre o sistema natural 'N' e os demais sistemas mostrou um confundimento entre os efeitos destes sistemas propriamente dito e as adubações que recebeu. Não obstante, ainda foi possível evidenciar os contrastes entre o sistema natural e os demais sistemas, como segue: P: {N} *versus* {F; LF; LPF}; K: {N} *versus* {L}; Mg: {N} *versus* {F}; SB: {N} *versus* {L; PEC; F; LP; LF} (Tabela 4).

Os resultados da PCA para o grupo dos indicadores químicos do solo são graficamente apresentados na figura 11. Para informações suplementares (autovalores e autovetores) ver anexo 4 - Tabelas 4A e 4B.

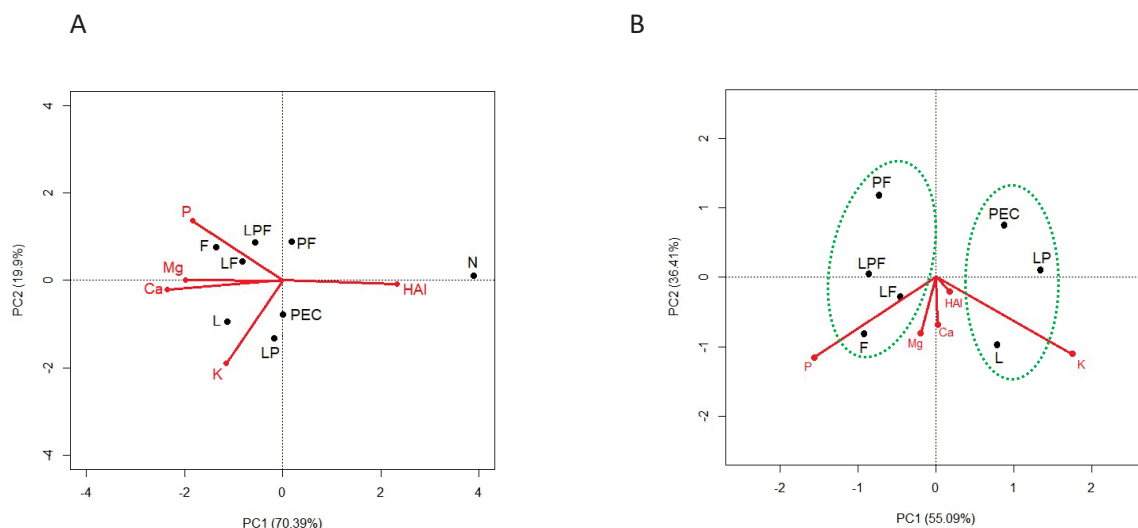


Figura 11 - Influência dos sistemas de cultivo sobre atributos de fertilidade do solo P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e $H+Al^{3+}$. A = com N e B = sem N.

O Biplot com N (Figura 11A), representativo das respostas dos sistemas aos indicadores químicos, explicou 90% da variação total e o Biplot sem N (Figura 11B), explicou 91,5% da variação total contida na matriz multivariada. Portanto, apenas 10% e 8,5% da variação total, respectivamente, foi considerada aleatória, ou sem sentido.

Tendo em vista que o objetivo desta etapa foi avaliar a influência dos sistemas sobre a qualidade química do solo, optou-se por apresentar os dois resultados, a fim de se confirmar a forte tendência analítica promovida quando se analisa conjuntamente o sistema N. Assim, serão considerados apenas os dados das análises feitas na PCA sem o sistema natural.

É interessante notar que os agrupamentos dos sistemas por meio da PCA na dimensão 1 (PC1) destacam, nitidamente, os sistemas que contém o componente floresta (sistemas sombreados) com os sistemas que não o têm (a pleno sol), evidenciando o sentido dos contrastes. Além disso, enquanto um grupo {PEC; LP; L} se relaciona com a concentração de K^+ , com destaque para o sistema L; o outro grupo {PF; LPF; LF; F} apresentou relação com a concentração de P, com destaque para o sistema F. Ambos nutrientes aplicados anualmente em todos os sistemas.

A dimensão dois (PC2) marca o claro agrupamento dos sistemas que contém Pecuária contrastando com os demais. Também cabe destacar que a relação com os nutrientes se dá em oposição aos sistemas com Pecuária.

A importância percentual de cada uma das variáveis na realização dos agrupamentos referidos é evidenciada por meio da Figura 12.

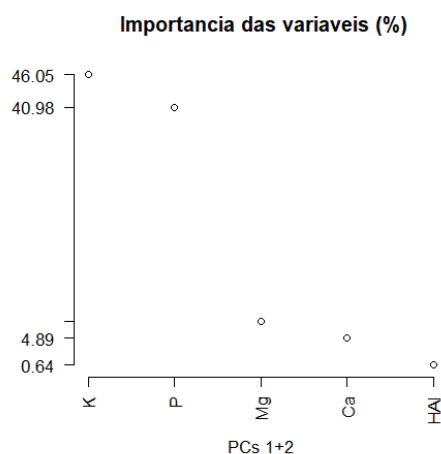


Figura 12 - Importância dos indicadores químicos de qualidade do solo; K⁺, P, Mg²⁺ e Ca²⁺ e H+Al³⁺ para explicação da qualidade química de sistemas de cultivo. A = com N e B = sem N.

As variáveis mais importantes na explicação da matriz multivariada de dados dos indicadores químicos foi o K (46%), seguida do P (41%), enquanto Mg e Ca influenciaram relativamente pouco para a variabilidade total da matriz (7% e 5%, respectivamente) e o HAl com apenas 0,6% (Figura 12). Embora tenham um Coeficiente de Variação (CV) relativamente alto com relação aos demais (Tabela 6), o Potássio e o Fósforo contribuíram para se estabelecer uma relação de maior ou menor diferenciação entre os sistemas de cultivo. Portanto, os agrupamentos oferecidos por meio da PCA devem ser analisados à luz destas variáveis mais importantes.

A maior relação do L e do LP com o teor de K no solo, mostra a maior eficiência destes sistemas na ciclagem deste nutriente. Ao passo que o mesmo (K) assume posição oposta aos sistemas PF e LPF, ressaltando uma maior utilização deste nutriente por estes sistemas. Se o nutriente foi aplicado de igual

modo em todos os sistemas e se possui menores concentrações do nutriente no solo, sugere-se maior demanda para estes sistemas.

Para uma melhor compreensão do relacionamento destas variáveis, foi realizada a Análise de Fatores (AF), conforme os resultados da PCA. Aqui os resultados foram expressos através de dois gráficos com a conforme os dois fatores avaliadas Figura 13. As cargas fatoriais e os scores (coordenadas) para cada tratamento, estão apresentados no Anexo 4 - Tabelas 4C e 4D.

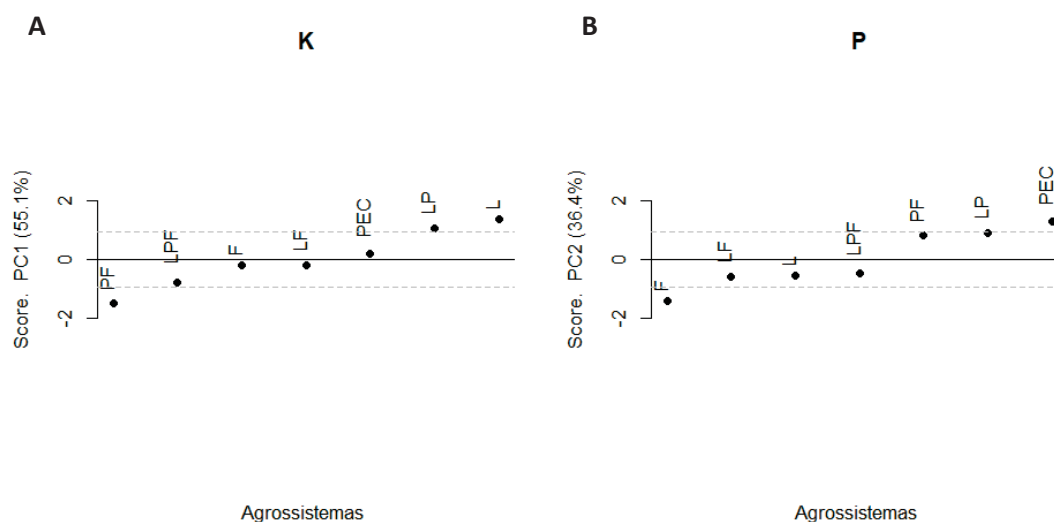


Figura 13 - Análise de fatores (AF) dos indicadores de qualidade baseados na análise química solo. A: Fator 1; B: Fator 2. Análise química do solo de sistemas agrários e naturais estudados, à profundidade 0-10cm. A linha pontilhada representa o intervalo de confiança de 5%.

Notadamente, o fator 1 (Figura 13A) revela o contraste entre a qualidade química do solo dos sistemas L e LP com o sistema PF, influenciado pelo teor de potássio. Já o fator 2 (Figura 13B) destaca a o contraste entre os sistemas PEC e F, influenciado pelo teor de fósforo no solo.

A eficiência do agrossistema em manter nutrientes no solo é uma característica muito importante para a boa qualidade. Neste sentido, os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) são muito eficientes (Anghinoni et al. 2013).

(Anghinoni et al. 2011, Moraes 2018), destacam o papel do plantio direto e da integração lavoura pecuária na conservação da fertilidade de solo e da água e nutrientes, por meio da ciclagem de nutrientes.

No caso do experimento em estudo, mesmo os tratamentos (sistemas agropecuários) que não têm integração de componentes (P; F e L) são manejados com foco na “intensificação sustentável” – os princípios de SIPA – quais sejam: não revolvimento do solo, alta deposição de material orgânico no solo e adubação de sistemas (Moraes 2018).

Cabe ressaltar aqui que, como o experimento é montado em uma área de proteção ambiental (APA do Iraí) não é permitido realizar o controle químico das plantas daninhas. Portanto, as áreas de cultivo, em final de ciclo na época da colheita das amostras, estão bastante infestadas de ervas daninhas, além das plantas de cultivo. Assim, é bem visível a grande cobertura do solo estabelecida por diversas espécies nestes sistemas.

Semelhantemente, o agrupamento evidenciado pela PCA destaca o maior contraste entre a lavoura (L) e o pecuária x floresta (PF). O agrossistema L possui caracteres relevantes de conservação e ciclagem, além de grande deposição e manutenção da biomassa no solo, já que a palhada é integralmente mantida na área, inclusive grãos.

Ainda que o agrossistema PF tenha sido conduzido com manejo conservacionista, é notável a influência da sombra na produção de biomassa da pastagem neste sistema. Os levantamentos de acúmulo de biomassa forrageira no PF mostram que no ano de referência 2020-2021 registraram 10.428 kg de MS ha⁻¹; enquanto que para o sistema PEC foi de 15.146,67 kg de MS ha⁻¹. Notadamente pela influência das árvores que, por estarem em espaçamento adensado e já com grande porte, exerceram sombreamento intenso e podem ter reduzido a biomassa da gramínea.

Uma das bases para os SIPA é a manutenção de condições para a boa deposição e manutenção de material orgânico no solo (Assmann, T. S. 2018),

por meio do aumento das taxas de Produção Primária Líquida (PPL). Além disto, busca manter a boa cobertura de proteção do solo, a fonte de material orgânico como mantenedora da condição para ciclagem da matéria orgânica, bem como fonte de captação e estocagem de carbono (Baldock and Broos 2012).

Com base na avaliação da concentração dos macronutrientes P, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ ficou destacado que os sistemas de cultivos avaliados influenciaram a qualidade dos solos ao modificar a sua fertilidade. Também foi possível perceber que o agrupamento dos agrossistemas com base nestes nutrientes avaliados, foi influenciado pelo potencial de ciclagem de nutrientes de cada um.

Portanto, conforme bem argumentado por (Carvalho et al. 2010, 2011, Anghinoni et al. 2017, Assmann, T. S. 2018), a adoção de eficazes práticas de manejo conservacionistas, em adição à intensificação sustentável, são fundamentais para o aumento e manutenção da fertilidade do solo.

4.7 ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO (IQS) APLICADO COM OS DADOS DOS INDICADORES DE QUALIDADE QUÍMICA

Buscando-se, então, um resultado sinteticamente mais conclusivo a partir das evidências apresentadas até então para a determinação da qualidade do solo nos sistemas, propõe-se a aplicação do Índice de Qualidade do Solo (IQS) utilizando-se os dados da análise de fatores das variáveis referentes química (Figura 14). Os scores (coordenadas) dos sistemas avaliados, estão apresentados no Anexo 4 - Tabelas 4E e 4F.

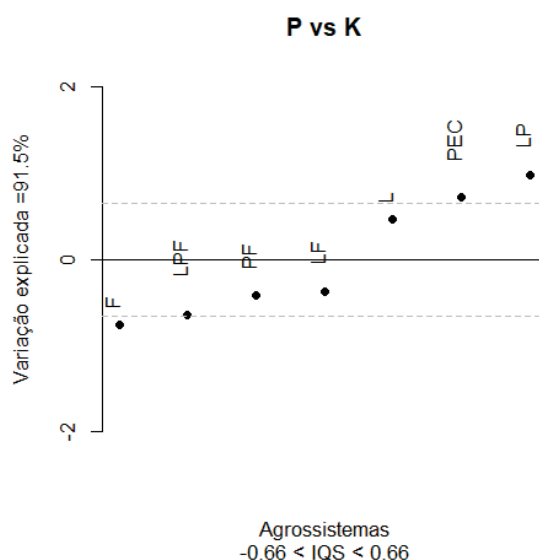


Figura 14 – Índice de Qualidade do Solo (IQS) baseado nos indicadores de análise química. Baseado no contraste entre o teor de fósforo e o teor de potássio no solo. A linha pontilhada representa o intervalo de confiança de 95%. **$\text{IQS} = -0,76\text{F} -0,64\text{LPF} -0,41\text{PF} -0,37\text{LF} +0,47\text{L} +0,72\text{PEC} +0,99\text{LP}$**

O gráfico possibilita destacar, de forma sintética, os sistemas de maior qualidade - PEC e LP - e os de menor qualidade química do solo, o F e o LPF. Os demais sistemas não diferiram entre si. A linha pontilhada representa o intervalo de confiança de 95%.

4.8 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS COM TODAS AS VARIÁVEIS

Para se obter uma visão mais sintética, ampla e representativa dos indicadores de qualidade do solo avaliados, foi realizada uma análise de componentes principais (PCA) com todas as variáveis estudadas até aqui, conforme interesse de pesquisa e os princípios da parcimônia estatística.

Os resultados da PCA para o grupo geral de indicadores de qualidade do solo, são graficamente apresentados na Figura 15. Os indicadores baseados na população de macrofauna foram analisados separadamente, considerando a biomassa de minhocas (Figura 15A) e o número de indivíduos de minhocas (Figura 15B). Para informações suplementares (autovalores e autovetores) ver anexo 5 - Tabelas 5A e 5B.

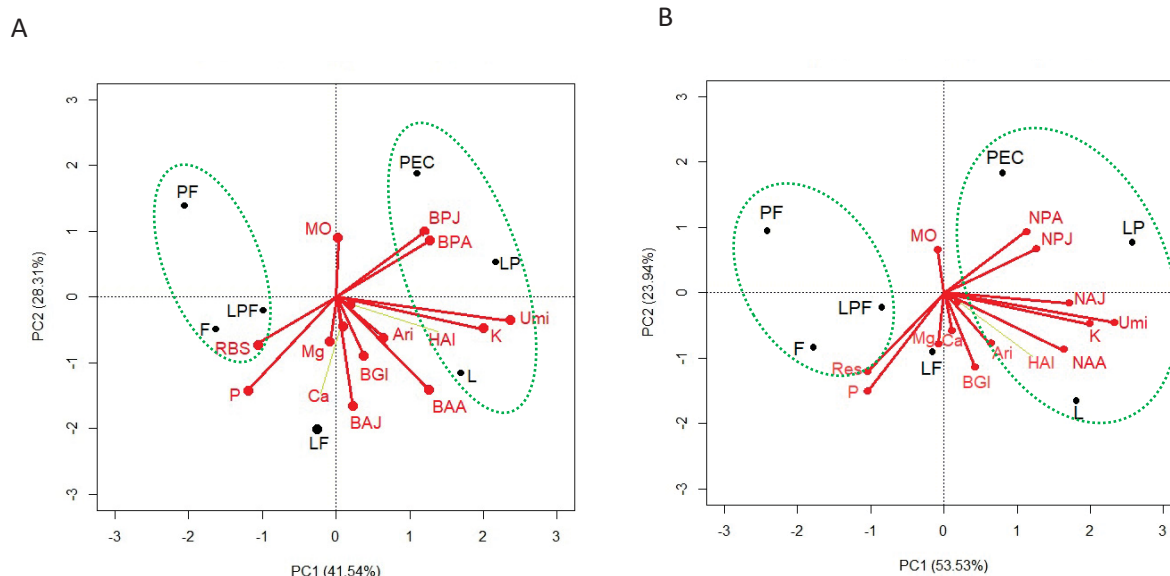


Figura 15 – Influência de sistemas de produção agropecuária sobre indicadores de qualidade do solo - **Indicadores bioquímicos:** β -glucosidase (mg de p-nitrofenol/kg de solo/h) - BGI; Arilsulfatase (mg de p-nitrofenol/kg de solo/h) - Ari e Respiração Basal do Solo ($\text{mg CO}_2\cdot\text{kg}^{-1}$) - RBS; Umidade relativa do solo (%) - Umi; **Indicadores de população de macrofauna do solo:** BAA: Biomassa do gênero *Amyntas* Adultos; BAJ: Biomassa do gênero *Amyntas* Juvenis; NAA: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Adultos; NAJ: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Juvenis. **Indicadores químicos de qualidade do solo:** K⁺, P, Mg²⁺ e Ca²⁺ e H+Al³⁺ para explicação da qualidade química de sistemas de cultivo. A = com Biomassa de minhocas e B = com o número de indivíduos de minhocas.

O Biplot considerando a biomassa de minhocas (Figura 15A), explicou 70% e o Biplot considerando o número de indivíduos (Figura 15B) explicou 76% da variação total contida na matriz multivariada. Assim, 30% e 24% da variação total, respectivamente, foi considerada aleatória, ou sem sentido.

Ambos os grupos de indicadores (com a biomassa ou com o número de minhocas) resultaram em tendências idênticas quanto à possibilidade de agrupamentos. Analisando a dimensão um (PC1) é possível se destacar um grupo de sistemas que contém o componente floresta e o grupo dos sistemas a pleno sol. Analisando-se a dimensão dois (PC2) é possível se identificar o grupo dos sistemas que contém o componente Pecuária em seu arranjo, em contraste ao grupo dos sistemas que contém floresta especialmente.

Os indicadores se posicionaram de forma bem variada. Enquanto Ca, Mg e HAI influenciaram muito pouco na avaliação da qualidade dos sistemas, o número e a biomassa de minhocas, a Umi, o K, a RBS, a MO e a atividade das enzimas se destacaram com forte influência.

A importância percentual de cada uma das variáveis na realização dos agrupamentos referidos é evidenciada por meio da Figura 16.

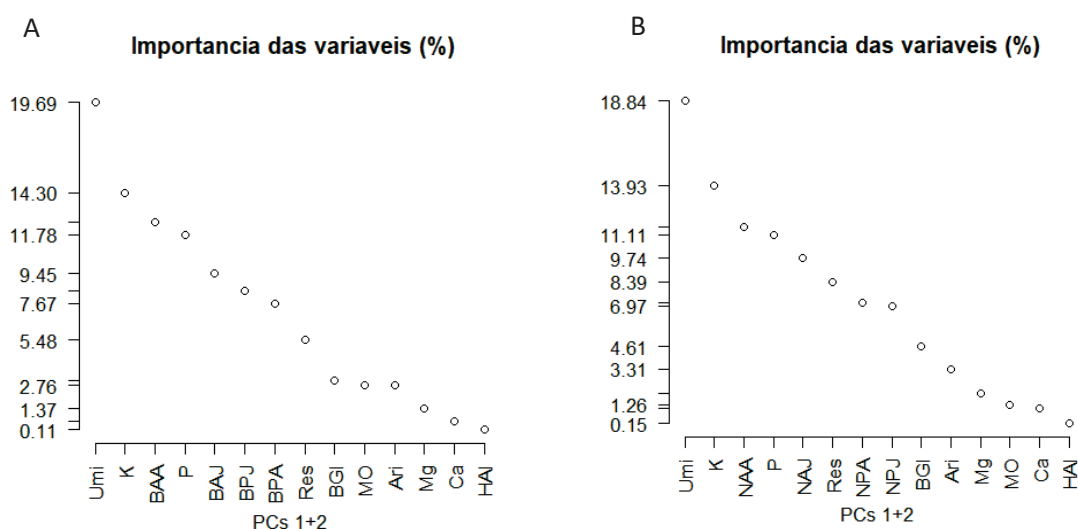


Figura 16 - Importância das variáveis estudadas em explicar as variações entre os sistemas agrários e naturais. A = Variáveis com Biomassa de minhocas e com o sistema natural; B = Variáveis com Biomassa de minhocas e sem o sistema natural; C = Variáveis com Número de indivíduos de minhocas e com o sistema natural; D = Variáveis com Número de Indivíduos de minhocas e sem o sistema natural;

Observando a figura 16 A e B nota-se que as variáveis de maior importância na PCA geral foram Umi, K, NAA, BAA e P. Já as variáveis Ari, Mg, Ca e HAI tiveram bem pouca importância na definição das tendências.

Também como instrumento de melhoria da compreensão das relações entre as variáveis foi realizada a Análise de Fatores (AF), conforme os resultados da PCA. Para tanto, foi necessário analisar separadamente o conjunto das variáveis acompanhadas da biomassa de minhocas e acompanhadas do número de minhocas (Figura 17). As cargas fatoriais e os scores (coordenadas) para cada tratamento, estão apresentados no Anexo 5 - Tabelas 5C, 5D, 5E e 5F.

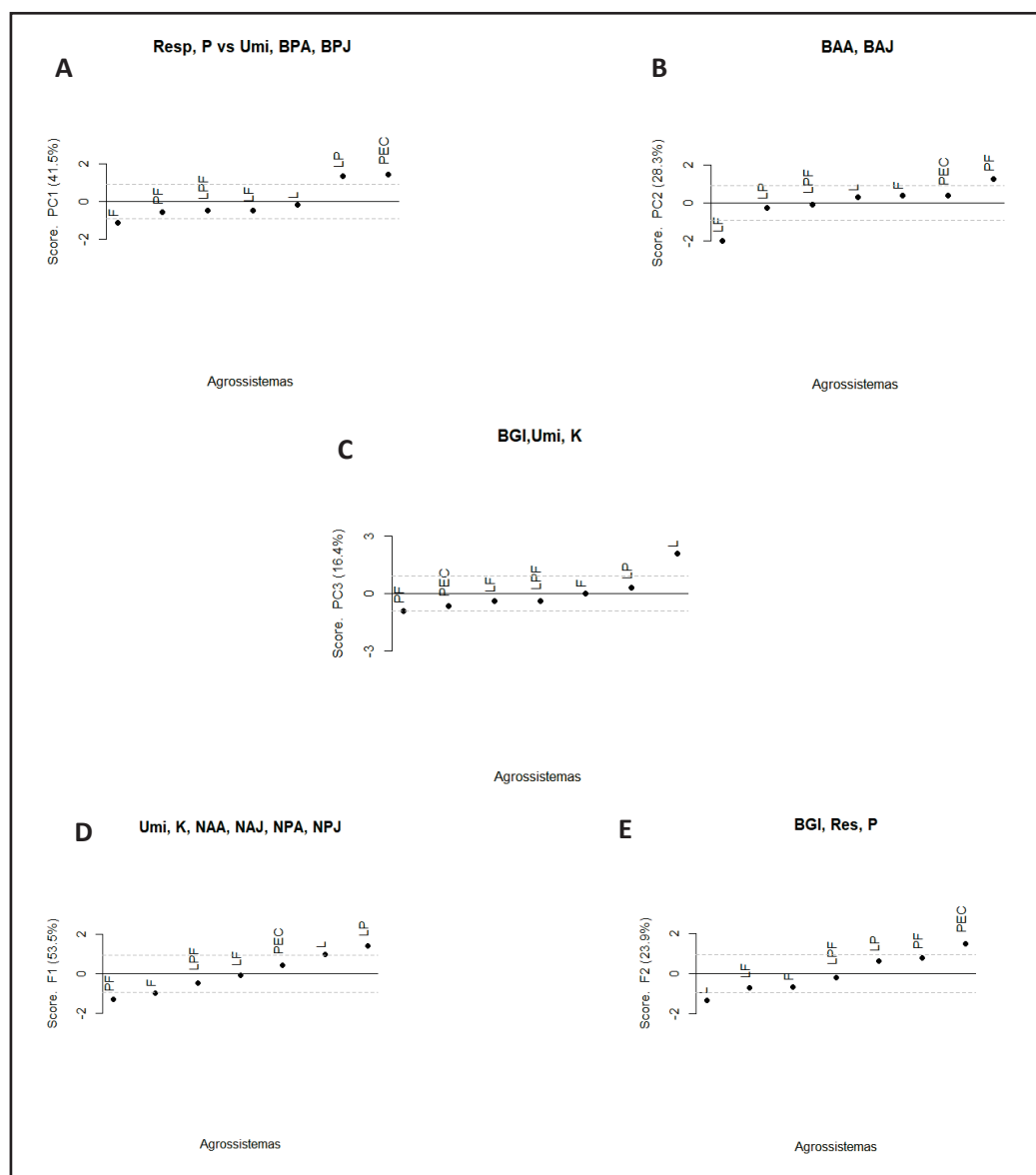


Figura 17 - Expressão gráfica da análise de fatores do conjunto de variáveis de avaliação da qualidade do solo - indicadores bioquímicos; indicadores de população de macrofauna e indicadores químicos de qualidade do solo; A, B e C = com biomassa de minhocas e D e E = com o número de indivíduos de minhocas.

Para análise da figura 17 é necessário se esclarecer que foi necessário a consideração de três fatores, com os dados envolvendo a biomassa de minhocas, já que até o segundo fator o percentual de explicação foi de apenas 68%.

As figuras 17A, 17B e 17C se referem aos três fatores considerados para a AF geral, baseadas na biomassa de minhocas e demais indicadores avaliados.

As figuras 17D e 17E se referem aos dois fatores considerados para AF geral, baseada no número de minhocas e demais indicadores avaliados.

A figura 17A destaca um contraste entre a respiração basal do solo (RBS) junto com o teor de fósforo no solo (P) *versus* a umidade do solo (Umi), BPA e BPJ. Enquanto RBS e P, possuem maiores médias no sistema F e menores nos sistemas LP e PEC, a Umi, a BPA e a BPJ têm maiores médias em LP e PEC.

Enquanto que o sistema F, com maiores taxas de RBS e de P demonstra possivelmente que está em fase de alta liberação de CO₂ pelo solo - o que pode estar relacionado ao fato de ter sido colhido (as árvores) há cerca de 65 dias antes da coleta do solo. O que deixa grande quantidade de material orgânico na superfície, que pode ser o responsável pelas altas taxas da RBS. O maior valor de P pode estar relacionado a baixa absorção deste nutriente por árvores adultas e, portanto, maiores taxas deste nutriente podem estar sendo acumuladas no solo.

Os sistemas que possuem maiores condições de manutenção de umidade no solo podem dar maiores condições para a manutenção da população de minhocas do gênero *Pontoscolex*. O que reforça essa suposição é o fato do fator 2 destacar a influência da biomassa de adultos e juvenis apenas do gênero *Amyntas*, como de importância para o agrupamento dos contrastes entre PF e LF.

O fator 3 já é um destaque ao reflexo dos sistemas sobre a atividade da enzima *BGI*, sobre a *Umi* e sobre o teor de K no solo.

Considerando o número de indivíduos de minhocas o fator 1 (Figura 17D) revela uma importância conjunta dos indicadores *Umi*, K, NAA, NAJ, NPA e NPJ para a formação do contraste entre LP e L com PF e F.

Já o fator 2 (Figura 17E) revela a importância da *BGI*, da RBS e do teor de P no solo, como determinantes para a diferenciação entre PEC e L.

Pequenas variações de contrastes puderam ser notadas conforme a importância dos indicadores. Porém, o que se pode sugerir é sobre a influência de componentes do sistema como importante para expressar alterações sobre diferentes variáveis.

A tendência dos sistemas que contém o componente Floresta, sinaliza relação direta com a Respiração Basal do Solo (RBS) e com o teor de fósforo (P). A RBS, como é conhecida, descreve a atividade microbiana desenvolvida por plantas, animais e microrganismos (MOURA, et al., 2015). Representa a soma total de todas as funções metabólicas que produzem CO₂ (Silva, et. al, 2006). Este parâmetro é bastante influenciado pelas condições abióticas do solo, como a temperatura, umidade e aeração. Assim, pode estar relacionada mais fortemente ao componente florestal pelo equilíbrio que estes sistemas têm dessas condições, especialmente na camada superficial do solo. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo em função de variações ambientais podem restringir a RBS.

Os valores encontrados aqui nas áreas de LPF (0,77), F (0,91) e PF (1,68), foram abaixo dos valores de ambiente nativo de Cerrado (1,76), acima dos valores encontrados em sistema de plantio com preparo convencional (0,73) e próximos, dos valores encontrados para sistemas de plantio direto com dois (0,95) e com cinco (1,83) anos, por Silva, et. al. (2005). Configurando assim, maior semelhança ao ambiente com mais tempo de uso das práticas conservacionistas.

A relação com o fósforo também foi alta para os sistemas com floresta. Sendo o fósforo muito pouco móvel no solo, estes sistemas podem possuir menor uso deste elemento. Até mesmo pela idade das árvores, que respondem pouco a adubação nesta fase.

Os sistemas PEC, LP e L demonstraram alta relação com os indicadores de biomassa e número de minhocas, da umidade do solo, da atividade enzimática e do teor de potássio. Estes três sistemas foram destaques nas avaliações em cada grupo de indicadores e mantém forte relação com os bons indicadores de macrofauna e atividade enzimática. Muito embora os valores de K e P dos sistemas estejam abaixo do recomendado para a cultura do milho, por exemplo, (COELHO, et. al., 2015) as produtividades nestes sistemas de cultivo têm sido acima da média nacional (4,2t/ha).

4.9 ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO (IQS) GERAL APLICADO A TODAS AS VARIÁVEIS EM CONJUNTO

Por fim, como uma síntese geral desta pesquisa, foi calculado o IQS dos sistemas com todas as variáveis consideradas até então, reunidas (Figura 18). As cargas fatoriais e os scores do IQS geral, podem ser consultados no anexo 5 - Tabelas 5G, 5H, 5I e 5J.

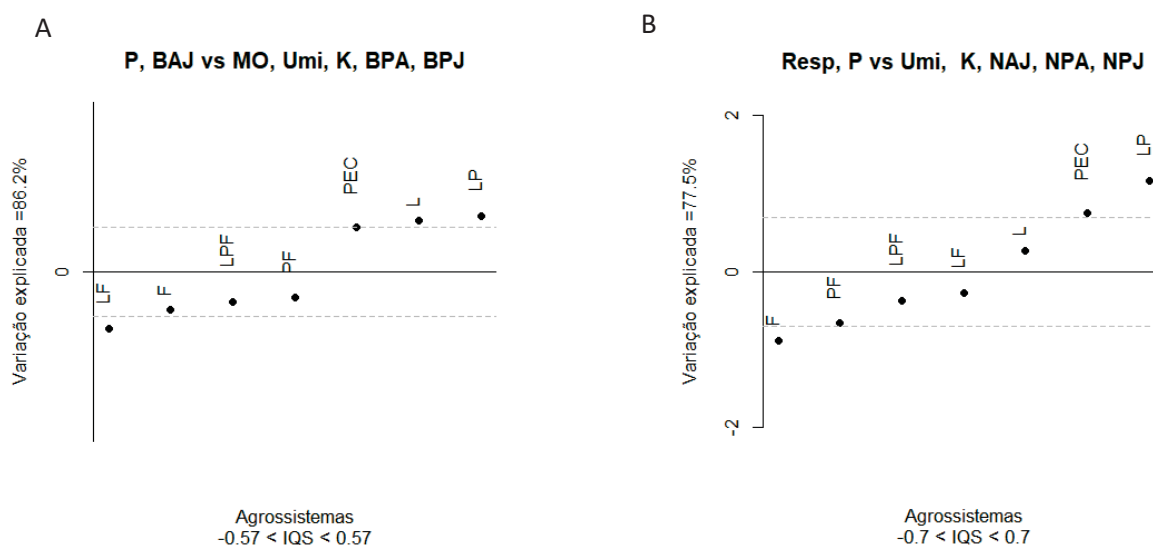


Figura 18 - Expressão gráfica do índice de qualidade do solo, calculado a partir dos Indicadores bioquímicos; indicadores de população de macrofauna do solo e indicadores químicos de qualidade do solo, conjuntamente; A = com biomassa de minhocas e B = com o número de indivíduos de minhocas. **IQS (Biomassa) = -0,73LF -0,49F -0,38LPF -0,33PF +0,57PEC +0,65L +0,71LP; IQS (Número) = -0,89F -0,66PF -0,37LPF -0,27LF +0,27L +0,76PEC, 1,16LP.**

A análise conjunta permitiu discriminar os sistemas conforme os scores de qualidade entre: LF, como de menor qualidade do solo e LP; L; PEC, como os sistemas de melhor qualidade geral do solo, quando se avaliou a biomassa de minhocas. Já quando se avaliou o número de minhocas, os sistemas que apresentaram melhor qualidade do solo foram o PEC e LP, enquanto que o de menor qualidade foi o sistema F.

Essa visão mais geral permitiu destacar o PEC e LP como os melhores em manutenção da qualidade do solo para estes parâmetros avaliados. Sendo possível inclusive citar a lavoura como muito próximo destes.

Já os sistemas que contém o componente F, se apresentaram com maiores tendências para a qualidade inferior do solo.

5 CONCLUSÕES GERAIS

A avaliação da influência dos sete sistemas de cultivo e da área de vegetação natural sobre a qualidade do solo foi realizada e apresentou consistentes respostas de semelhanças entre si, no que diz respeito ao número e o tipo de componentes que possuem. Sistemas com o componente arbóreo quase sempre não diferiram entre si a respeito de sua influência sobre os parâmetros de qualidade de solo avaliados. Assim como os sistemas que possuem a Lavoura como componente, que também se agruparam com semelhanças na maior parte dos indicadores aplicados.

As variáveis, ou grupos de variáveis estudadas tiveram no geral eficazes papéis como descritores de qualidade do solo. Porém, a química do solo se apresentou menos precisa nos agrupamentos propostos pelos outros grupos de descritores aplicados. Ao passo que os parâmetros de macrofauna e de indicadores bioquímicos foram bastante consistentes para indicar sistemas de melhor, dos que possuem menores indícios de qualidade do solo. Destes, os indicadores de atividade enzimática aparentam ser de melhor equilíbrio de sensibilidade, podendo indicar melhor a memória do solo e não apenas as últimas alterações nos mesmos.

Ficou nítido a influência do componente lavoura sobre os indicadores de qualidade aplicados. Sendo a coleta feita após o ciclo de cultivo, foi possível notar aparente indicativo de influência. O conhecimento das áreas e do histórico de trabalhos realizados nas mesmas, bem como a utilização de ferramentas estatísticas ideais, permitiu distinguir algumas nuances dessa influência na interpretação dos resultados e pontuar maior solidez de determinados indicadores em registrar os efeitos dos tratamentos sobre a qualidade do solo.

Os sistemas de cultivo que possuem o componente florestal apresentaram características muito próximas para todos os grupos de indicadores. Assim como a lavoura é um componente que também marcou bastante os sistemas que as possuem em seu arranjo. Já a pecuária foi um componente mais equilibrado nas respostas aos parâmetros utilizados. Dentre os sistemas avaliados, o PF foi o que mais frequentemente se destacou dos outros nos quesitos de menor qualidade e o sistema L de maior qualidade do

solo. Foi possível enxergar a Pecuária e a Lavoura-Pecuária com fortes indícios de semelhanças com o sistema Lavoura.

Se destaca o LP como um sistema que mantém padrões de qualidade superior e capaz de assegurar indicadores de qualidade de pecuária, bem como de lavoura.

Também se destaca os sistemas com Lavoura com potencial de conservação da umidade do solo e da população de minhocas. Pela sua complexidade, ao modo como é manejado, aponta para a resolução da iniciativa desta pesquisa, quando se mostra mais complexo e, portanto, com maior condição de manter a qualidade do solo.

REFERÊNCIAS

- Acosta-Martínez et al. (2021)** V. Acosta-Martínez et al. Metabolic Activity – Enzymes. *Laboratory Methods for soil health analysis (Vol. 2)*. D.L. Karlen et al., eds. SSSA, Madison, WI. 194–250.
- Algina et al. (1989)** James Algina et al. Type I Error Rates and Power Estimates for Selected Two-Sample Tests of Scale. *Journal of Educational Statistics*. 14, 4 (1989), 373–384. doi: 10.2307/1164945.
- Alvares et al. (2013)** C. A. Alvares et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. 22, 6 (2013), 711–728.
- Amadori (2019)** Caroline Amadori. *Emissão de gases de efeito estufa, a partir do solo, em sistemas integrados de produção agropecuária*. Universidade Federal do Paraná.
- Anderson and Ingram (1993)** J. M. Anderson and J. S. I. Ingram. *Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods*. 2.ed.
- Anghinoni et al. (2017)** I. Anghinoni et al. Ciclagem de nutrientes. *Palestras: intensificação com sustentabilidade. Congresso Brasileiro de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária; Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil*. J. Jamhour and T.S. Assmann, eds. UFPR.
- Anghinoni et al. (2018)** I. Anghinoni et al. Agricultura brasileira: dos primórdios aos sistemas integrados de produção agropecuária. *Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil - 1 ed.* E.D. Souza and ..., eds. Copiart.
- Anghinoni et al. (2011)** Ibanor Anghinoni et al. Ciclagem de nutrientes em integração lavoura-pecuária. *Synergismus scyentifica UTFPR, Pato Branco*. 6, 1 (2011).

- Anghinoni et al. (2013)** Ibanor Anghinoni et al. Abordagem Sistêmica Do Solo Em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária. *Tópicos em Ciência do Solo*, 8. 2 (2013), 221–278.
- Araújo and Monteiro (2010)** A. S. F. Araújo and R. T. R. Monteiro. Indicadores biológicos de qualidade do solo. Bioscience Journal [online], vol. 23,. *Bioscience Journal [online]*. (2010).
- Assmann, T. S. (2018)** et al. Assmann, T. S. Adubação de sistemas e ciclagem de nutrientes em sistemas integrados de produção agropecuária. *Sistemas integrados de produção agropecuaria no Brasil - 1 ed.* E.D. et al. Souza, ed. Copiart.
- Azevedo et al. (2010)** P. T. M. Azevedo et al. Populações de minhocas amostradas por diferentes métodos de coleta (Elétrico, químico e manual) em ecossistemas da região de Londrina, Paraná, Brasil. *Acta Zoológica Mexicana*. 26, 2 (2010).
- Baldock and Broos (2012)** J. A. Baldock and K. Broos. Soil organic matter. *Hanbook of Soil Sciences: Properties and Processes*. Y.L.& M.E.S. P. M. Huang, ed. CRC Press, Boca Raton.
- Brown and Domínguez (2010)** G. Brown and J. Domínguez. Uso das minhocas como bioindicadoras ambientais: Princípios e práticas – O 3º Encontro Latino Americano de Ecologia e Taxonomia de Oligoquetas (ELAETAO3). *Acta zoológica Mexicana*. Número Esp, (2010), 1–18.
- Brown and Fragoso (2007)** G. G. Brown and Carlos Fragoso. *Minhocas na América Latina: biodiversidade e ecologia*.
- Brown and James (2007)** G. G. Brown and S. W. James. Ecologia, biodiversidade e biogeografia das minhocas no Brasil. *Minhocas na América Latina: Biodiversidade e Ecologia*. G.G. Brown and C. Fragoso, eds. 297–381.

- Brown et al. (2013)** George G. Brown et al. Terrestrial oligochaete research in Latin America: The importance of the Latin American Meetings on Oligochaete Ecology and Taxonomy. *Applied Soil Ecology*. 69, (2013), 2–12. doi: 10.1016/j.apsoil.2012.12.006.
- Campos (2019)** B. M. Campos. *Produção animal agroecológica em sistemas integrados de produção agropecuária*. Universidade Federal do Paraná.
- Carvalho et al. (2011)** Paulo Cesar De Faccio Carvalho et al. Experiências de integração lavoura-pecuária no Rio Grande do Sul. *Synergismus scyentifica*. 6, 2 (2011).
- Carvalho et al. (2010)** Paulo César F. Carvalho et al. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 88, 2 (2010), 259–273. doi: 10.1007/s10705-010-9360-x.
- Dalmago et al. (2008)** Genei Antonio Dalmago et al. Produtividade primária líquida do ambiente natural – indicador de sustentabilidade de sistemas de produção agrícola. *Documentos online EMBRAPA*. 100, (2008).
- Doran and Parkin (1994)** J. W. Doran and T. B. Parkin. Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*. J.W. Doran et al., eds. Madison: SSSA. 3–21.
- Embrapa (2018)** Embrapa. Visão 2030 - o futuro da agricultura brasileira. *Embrapa*. (2018), 212. Retrieved from <http://www.embrapa.br/futuro>.
- FAO (2010)** FAO. An international consultation on integrated crop-livestock systems for development The Way Forward for Sustainable Production. *An international consultation on integrated crop-livestock systems for development The Way Forward for Sustainable Production Intensificatio*. 13, 1 (2010), 79.

- Field et al. (1995)** Christopher B. Field et al. Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 51, 1 (1995), 74–88. doi: 10.1016/0034-4257(94)00066-V.
- Filizola et al. (2003)** Heloisa Ferreira Filizola et al. *Manual de Procedimentos de Coleta de Amostras em Áreas Agrícolas para Análise da Qualidade Ambiental : Solo , Água e Sedimentos Coleta de Amostras em Áreas Agrícolas para Análise da Qualidade Ambiental : Solo , Água e Sedimentos*.
- Haberl et al. (2004)** Helmut Haberl et al. Ecological footprints and human appropriation of net primary production: A comparison. *Land Use Policy*. 21, 3 (2004), 279–288. doi: 10.1016/j.landusepol.2003.10.008.
- Imhoff et al. (2004)** Marc L. Imhoff et al. Global patterns in human consumption of net primary production. *Nature*. 429, 6994 (2004), 870–873. doi: 10.1038/nature02619.
- INMET (2009)** INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA INMET. *Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990*.
- Jamhour and Assmann (2017)** Jorge Jamhour and Tangriani Simioni Assmann. *Palestras: intensificação com sustentabilidade*.
- Junior and Mendes (2007)** Fábio Bueno Dos Reis Junior and Iêda De Carvalho Mendes. Biomassa Microbiana do Solo. *Embrapa Cerrados*. 1, 1517–5111 (2007), 40.
- Kleina (2017)** G. B. Kleina. *Biomassa microbiana e Carbono mineralizável no solo em sistemas integrados de produção agropecuária*. Universidade Federal do Paraná.
- Kruchelski et al. (2021)** Silvano Kruchelski et al. Eucalyptus benthamii Maiden et Cambage growth and wood density in integrated crop-livestock systems.

Agroforestry Systems. 95, 8 (2021), 1577–1588. doi: 10.1007/s10457-021-00672-0.

Lang et al. (2018) Claudete Reisdorfer Lang et al. *Sistemas integrados de produção agropecuária na promoção da intensificação sustentável: boletim técnico do Núcleo de Inovação Tecnológica em Agropecuária*. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo.

Lemaire (2017) G. Lemaire. Diversification within and among agro-ecosystems for sustainable agriculture production. *Congresso Brasileiro de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária; Encontro de Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil, 4. 2017. Pato Branco: UTFPR Câmpus Pato Branco, 2017* (Pato Branco, Paraná, 2017).

Lima (2018) R. C. Lima. *Adubação de sistemas: volatilização de amônia em área de integração lavoura-pecuária em experimento de longa duração*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco.

Lima (2016) R. L. D. Lima. *Adensamento populacional da cultura do girassol como estratégia de controle de plantas invasoras em um sistema integrado de produção agropecuária*. Universidade Federal do Paraná.

Macedo (2009) Manuel Claudio Motta Macedo. Integração lavoura e pecuária: O estado da arte e inovações tecnológicas. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 38, SUPPL. 1 (2009), 133–146. doi: 10.1590/S1516-35982009001300015.

Marcolino (2021) F. C. Marcolino. *Estrutura do solo em sistemas agropecuários e sua relação em parâmetros radiculares*. Universidade Federal do Paraná.

Martin (2018) D. M. Martin. *Seleção alimentar por bovinos em pastejo em diferentes arranjos de sistemas integrados de produção agropecuária*.

Universidade Federal do Paraná.

- Mendes et al. (2020)** Ieda Carvalho Mendes et al. Bioanálise De Solo: a mais nova aliada para a Sustentabilidade Agrícola. *Informações Agronômicas Npct*. 8 (2020), 1–11.
- Mendes et al. (2021a)** Ieda Carvalho Mendes et al. Soil quality and grain yield: A win–win combination in clayey tropical oxisols. *Geoderma*. 388, November (2021). doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114880.
- Mendes et al. (2021b)** Ieda Carvalho Mendes et al. Tecnologia BioAS: Uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. *Embrapa Cerrados*. Planaltina, DF (2021), 50 p.
- Mohamed et al. (2004)** M. A. A. Mohamed et al. The role of climate variability in the inter-annual variation of terrestrial net primary production (NPP). *Science of the Total Environment*. 332, 1–3 (2004), 123–137. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.03.009.
- Moraes (2018)** A. et. al. Moraes. Sistemas integrados de produção agropecuária: conceitos básicos e histórico no Brasil. *Sistemas integrados de produção agropecuaria no Brasil - 1 ed.* E.D. et al. Souza, ed.
- Murtagh and Legendre (2014)** Fionn Murtagh and Pierre Legendre. Ward's Hierarchical Agglomerative Clustering Method: Which Algorithms Implement Ward's Criterion? *Journal of Classification*. 31, 3 (2014), 274–295. doi: 10.1007/s00357-014-9161-z.
- Nemani et al. (2003)** Ramakrishna R. Nemani et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*. 300, 5625 (2003), 1560–1563. doi: 10.1126/science.1082750.
- Paoletti (1999)** M. Paoletti. The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. *Agric Ecol Environ* 74:137-155.

Posthuma L, Van Straalen NM. 106, (1999), 11–38.

Porfírio-da-Silva (2018) V. Porfírio-da-Silva. O componente arbóreo em sistemas integrados de produção agropecuária. *Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil - 1 ed.* E.D. de et al. Souza, ed. Copiart.

Portugal (2020) T. B. Portugal. *Sistemas integrados de produção agropecuária: desempenho animal, emissão de metano e controle de ectoparasitos em bovinos.* Universidade Federal do Paraná.

Silva et al. (2007) Edmilson Evangelista Silva et al. Determinação do Carbono. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007. 6 p. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado Técnico, 98).

Sugamoto (2002) M. L. Sugamoto. *Uso de técnicas de geoprocessamento para elaboração do mapa de aptidão agrícola e avaliação da adequação de uso do centro de estações experimentais do cangüiri, município de pinhais - paraná.* Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR.

Sun et al. (2004) Rui Sun et al. Spatial distribution of net primary productivity and evapotranspiration in Changbaishan Natural Reserve, China, using Landsat ETM+ data. *Canadian Journal of Remote Sensing.* 30, 5 (2004), 731–742. doi: 10.5589/m04-040.

Szymczak (2014) L. S. Szymczak. *Habilidade competitiva de capim aries com plantas daninhas no estabelecimento: características morfológicas e análise de crescimento.* Universidade Federal do Paraná.

Tabatabai (1994) M. A. Tabatabai. Soil enzymes. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties.* R.W. Weaver et al., ed. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison. 778–833.

Team (2020) R. Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from

<https://www.r-project.org/>.

Zhou et al. (2002) Guangsheng Zhou et al. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: A case study of China's Larix forests. *Forest Ecology and Management*. 169, 1–2 (2002), 149–157. doi: 10.1016/S0378-1127(02)00305-5.

ANEXOS 1 - FERTILIZAÇÃO ANUAL

Quadro 1 - Histórico de fertilização e correção de solo no experimento de campo do Núcleo de inovação tecnológica em agropecuária - NITA, desde a implantação até o verão 2020 - 2021.

NITA LIMING AND FERTILIZATION HISTORIC		
Crop season /Year	Date	Liming and fertilization
Winter 2012	May/2012	Block 1 and 2: 8 Mg ha ⁻¹ - Block 3: 12 until 15 Mg ha ⁻¹ Sewage sludge treated under the process N VIRO®
	Jun/2012	450 kg ha ⁻¹ natural phosphate rock (0-26/37-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Summer 2012/2013	Jan/2013 (in aries planting)	350 kg ha ⁻¹ superphosphate 0-20-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 80 kg ha ⁻¹ ammonium chloride (25-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Winter 2013		No fertilization
Summer 2013/2014	Oct/2013	450 kg ha ⁻¹ natural phosphate rock (0-26/37-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 400 kg ha ⁻¹ formulated 25:0:25 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 200 kg ha ⁻¹ urea (45-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
	Nov/2013 (in eucalyptus planting)	200 g of formulated 08-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) + 1% Ca and 3% S per eucalyptus plant
Winter 2014	May/2014	600 kg ha ⁻¹ natural phosphate rock (0-26/37-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 200 kg ha ⁻¹ potassium chloride - KCl (0:0:60 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 200 kg ha ⁻¹ urea (45-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Summer 2014/2015	Sep/2014	100 kg ha ⁻¹ natural phosphate rock (0-26/37-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 100 kg ha ⁻¹ potassium chloride - KCl (0:0:60 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 200 kg ha ⁻¹ urea (45-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Winter 2015	May/2015	300 kg ha ⁻¹ natural phosphate rock (0-26/37-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 100 kg ha ⁻¹ potassium chloride - KCl (0:0:60 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 300 kg ha ⁻¹ urea (45-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Summer 2015/2016	Oct/2015	200 kg ha ⁻¹ urea (45-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Winter 2016	May/2016	300 kg ha ⁻¹ natural phosphate rock (0-26/37-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 100 kg ha ⁻¹ potassium chloride - KCl (0:0:60 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 300 kg ha ⁻¹ urea (45-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Summer 2016/2017	Sep/2016	300 kg ha ⁻¹ natural phosphate rock (0-26/37-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 200 kg ha ⁻¹ potassium chloride - KCl (0:0:60 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 400 kg ha ⁻¹ urea (45-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Winter 2017	May/2017	200 kg ha ⁻¹ urea (45-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Summer 2017/2018	Sep/2017	300 kg ha ⁻¹ natural phosphate rock (0-26/37-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 200 kg ha ⁻¹ potassium chloride - KCl (0:0:60 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 300 kg ha ⁻¹ urea (45-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Winter 2018	May/2018	100 kg ha ⁻¹ potassium chloride - KCl (0:0:60 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 200 kg ha ⁻¹ urea (45-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 200 kg ha ⁻¹ natural phosphate rock (0-26/37-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Summer 2018/2019		350 kg ha ⁻¹ formulado NPK 8:20:20 415 kg ha ⁻¹ urea (45-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Winter 2019	May/2019	200 kg ha ⁻¹ urea (45-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Summer 2019/2020	Oct/2019	300 kg ha ⁻¹ natural phosphate rock (0-26/37-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 150 kg ha ⁻¹ potassium chloride - KCl (0:0:60 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) 300 kg ha ⁻¹ urea (45-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Winter 2020	Jun/2020	200 kg ha ⁻¹ urea (45-0-0 N-P ₂ O ₅ -K ₂ O)
Summer 2020/2021	Dez/2020	500 g of formulated 10-20-20 (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O) and 10 kg of commercial organic compost. Fertilizer was placed in each pit of the Araucária angustifolia plantation. Average spacing of 28 x 11.2 m.

ANEXO 2 – DADOS REFERENTES AOS INDICADORES BIOQUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO

Tabela 2A - Autovalores e autovetores das análises de componentes principais para o grupo de indicadores bioquímicos de qualidade do solo, em sistemas agrários e naturais estudados.

PCs	Autovalores	BGI	Ari	RBS	MO	Umi
PC1	1,34	-0,47	0,80	0,03	-0,27	0,26
PC2	1,07	-0,50	-0,06	0,10	-0,12	-0,85
PC3	0,63	0,36	0,25	0,88	0,09	-0,14
PC4	0,34	-0,39	0,05	0,07	0,91	0,10
PC5	0,02	0,50	0,54	-0,45	0,27	-0,43

BGI: β -glucosidase; Ari: Arilsulfatase; RBS: Respiração Basal do solo; MO: Matéria Orgânica; Umi: Umidade do solo. Profundidade: 0-10cm.

Tabela 2B - Autovalores e autovetores das análises de componentes principais para o grupo de indicadores bioquímicos de qualidade do solo, em sistemas agrários estudados (**sem área de vegetação natural**).

PCs	Autovalores	BGI	Ari	Res	MO	Umi
PC1	1,28	-0,30	-0,35	0,09	-0,01	-0,88
PC2	0,74	0,38	0,23	0,88	0,11	-0,13
PC3	0,41	-0,27	-0,09	0,04	0,95	0,12
PC4	0,02	0,09	-0,89	0,26	-0,12	0,34
PC5	0,01	0,83	-0,17	-0,39	0,27	-0,26

BGI: β -glucosidase; Ari: Arilsulfatase; RBS: Respiração Basal do solo; MO: Matéria Orgânica; Umi: Umidade do solo. Profundidade: 0-10cm.

Tabela 2C - Cargas fatoriais da análise de fatores para o grupo de indicadores bioquímicos de qualidade do solo, em sistemas agrários e naturais estudados (**sem área de vegetação natural**).

Variáveis	F1	F2
BGI	-0,34	0,33
Ari	-0,39	0,20
Res	0,10	0,76
MO	-0,01	0,09
Umi	-1,00	-0,12

BGI: β -glucosidase; Ari: Arilsulfatase; RBS: Respiração Basal do solo; MO: Matéria Orgânica; Umi: Umidade do solo. Profundidade: 0-10cm. F1: Fator 1; F2: Fator 2.

Tabela 2D - Scores da análise de fatores (AF) para o grupo de indicadores bioquímicos de qualidade do solo, em sistemas agrários e naturais estudados.

Sistemas	Fator 1 Umi	Fator 2 RBS
F	0,61	0,67
L	-1,77	1,34
LF	0,26	-0,20
LP	-0,83	-1,37
LPF	0,64	0,14
N	-0,07	-1,21
PEC	1,15	0,61
PF	0,61	0,67

Fator 1: Umi - Umidade do solo; **Fator 2:** RBS - Respiração Basal do solo; Sistemas - F: Floresta; L: Lavoura; LF: Lavoura x Floresta; LP: Lavoura x Pecuária; LPF: Lavoura x Pecuária x Floresta; N: Área de revegetação natural; PEC: Pecuária; PF: Pecuária x Floresta.

Tabela 2E - Cargas fatoriais do índice de qualidade do solo (IQS), com base na resposta de cada sistema, aos indicadores bioquímicos.

Variáveis	Cargas
BGI	-0,02
Ari	-0,19
Res	0,85
MO	0,08
Umi	-1,12

Tabela 2F - Scores do Índice de Qualidade do Solo (IQS) baseado nos indicadores bioquímicos - reflete o contraste entre BGI e Umi *versus* Ari.

Sistemas	IQS
LP	-1,02
L	-0,63
PEC	-0,48
LF	0,09
LPF	0,46
F	0,63
PF	0,96

Sistemas - L: Lavoura; LP: Lavoura x Pecuária; PEC: Pecuária; LPF: Lavoura x Pecuária x Floresta; PF: Pecuária x Floresta; LF: Lavoura x Floresta; F: Floresta; N: Área de revegetação natural.

ANEXO 3 - DADOS REFERENTES AOS INDICADORES DE MACROFAUNA DE QUALIDADE DO SOLO

Tabela 3A - Autovalores e autovetores das análises de componentes principais (PCA) para biomassa do grupo de indicadores de macrofauna do solo, em sistemas agrários e naturais estudados.

PCs	Autovalores	BAA	BAJ	BPA	BPJ
PC1	1,41	0,70	0,72	0,03	0,00
PC2	0,78	0,18	-0,20	0,66	0,71
PC3	0,34	0,69	-0,67	-0,13	-0,24
PC4	0,01	0,06	-0,03	-0,74	0,67

BAA: Biomassa do gênero *Amyntas* Adultos; BAJ: Biomassa do gênero *Amyntas* Juvenis; BPA: Biomassa do gênero *Pontoscolex* adultos; BPJ: Biomassa do gênero *Pontoscolex* juvenis.

Tabela 3B - Autovalores e autovetores das análises de componentes principais (PCA) para número de indivíduos do grupo de indicadores de macrofauna do solo, em sistemas agrários e naturais estudados.

PCs	Autovalores	NAA	NAJ	NPA	NPJ
PC1	1,69	0,68	0,59	0,28	0,32
PC2	0,52	0,54	-0,01	-0,62	-0,57
PC3	0,03	-0,47	0,74	-0,47	0,05
PC4	0,01	-0,15	0,31	0,56	-0,75

NAA: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Adultos; NAJ: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Juvenis; NPA: Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Adultos; NPJ: Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Juvenis.

Tabela 3C - Cargas fatoriais da análise de fatores para o grupo de indicadores da biomassa de macrofauna do solo, em sistemas agrários e naturais estudados (**com área de vegetação natural**).

Variáveis	F1	F2
BAA	0,83	0,16
BAJ	0,85	-0,18
BPA	0,03	0,58
BPJ	0,00	0,62

BAA: Biomassa do gênero *Amyntas* Adultos; BAJ: Biomassa do gênero *Amyntas* Juvenis; BPA: Biomassa do gênero *Pontoscolex* adultos; BPJ: Biomassa do gênero *Pontoscolex* juvenis.

Tabela 3D - Cargas fatoriais da análise de fatores para o grupo de indicadores da biomassa da macrofauna do solo, em sistemas agrários (**sem área de vegetação natural**).

Variáveis	F1	F2
BAA	0,76	0,34
BAJ	0,84	-0,04
BPA	-0,17	0,58
BPJ	-0,20	0,61

BAA: Biomassa do gênero *Amyntas* Adultos; BAJ: Biomassa do gênero *Amyntas* Juvenis; BPA: Biomassa do gênero *Pontoscolex* adultos; BPJ: Biomassa do gênero *Pontoscolex* juvenis.

Tabela 3E - Cargas fatoriais da análise de fatores para o grupo de indicadores do número de indivíduos da macrofauna do solo, em sistemas agrários e naturais estudados (**com área de vegetação natural**).

Variáveis	F1	F2
NAA	0,89	0,39
NAJ	0,77	-0,01
NPA	0,37	-0,45
NPJ	0,42	-0,41

NAA: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Adultos; NAJ: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Juvenis; NPA: Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Adultos; NPJ: Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Juvenis.

Tabela 3F - Cargas fatoriais da análise de fatores para o grupo de indicadores do número de indivíduos da macrofauna do solo, em sistemas agrários estudados (**sem área de vegetação natural**).

Variáveis	F1	F2
NAA	0,82	0,44
NAJ	0,74	0,01
NPA	0,38	-0,47
NPJ	0,43	-0,43

NAA: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Adultos; NAJ: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Juvenis; NPA: Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Adultos; NPJ: Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Juvenis.

Tabela 3G - Scores da análise de fatores (AF) para o grupo de indicadores de biomassa da macrofauna do solo, em sistemas agrários e naturais estudados.

Sistemas	Fator 1 BAA e BAJ	Fator 2 BPA e BPJ
F	-0,67	-0,81
L	0,48	0,30
LF	1,95	-0,98
LP	0,36	1,38
LPF	0,28	-0,28
N	-1,08	-0,59
PEC	-0,30	1,60
PF	-1,03	-0,62

Fator 1 - BAA: Biomassa do gênero *Amyntas* Adultos; BAJ: Biomassa do gênero *Amyntas* Juvenis; Fator 2 - BPA: Biomassa do gênero *Pontoscolex* adultos; BPJ: Biomassa do gênero *Pontoscolex* juvenis. F: Floresta; L: Lavoura; LF: Lavoura x Floresta; LP: Lavoura x Pecuária; LPF: Lavoura x Pecuária x Floresta; N: Área de revegetação natural; PEC: Pecuária; PF: Pecuária x Floresta.

Tabela 3H - Scores da análise de fatores (AF) para o grupo de indicadores de número de indivíduos da macrofauna do solo, em sistemas agrários e naturais estudados.

Sistemas	Fator 1 NAA e NAJ	Fator 2 NPA
F	-1,00	-0,11
L	0,77	0,40
LF	0,56	1,64
LP	1,51	-0,94
LPF	0,23	0,85
N	-1,15	-0,19
PEC	0,25	-1,58
PF	-1,17	-0,06

Fator 1 - NAA: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Adultos; NAJ: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Juvenis; Fator 2 - NPA: Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Adultos. F: Floresta; L: Lavoura; LF: Lavoura x Floresta; LP: Lavoura x Pecuária; LPF: Lavoura x Pecuária x Floresta; N: Área de revegetação natural; PEC: Pecuária; PF: Pecuária x Floresta.

Figura 3I - Cargas fatoriais do índice de qualidade do solo (IQS), com base na resposta de cada sistema, aos indicadores de biomassa de macrofauna do solo.

Fatores	Cargas
F1	0,98
F2	0,67
F3	0,61
F4	0,63

Figura 3J - Scores do Índice de Qualidade do Solo (IQS) baseado nos indicadores da biomassa de macrofauna do solo - reflete a influência de BAA, BAJ, BPA e BPJ.

Sistemas	IQS
N	-0,91
PF	-0,88
F	-0,72
LPF	0,08
PEC	0,38
L	0,42
LP	0,73
LF	0,90

N: Área de revegetação natural; PF: Pecuária x Floresta; F: Floresta; LPF: Lavoura x Pecuária x Floresta; PEC: Pecuária; L: Lavoura; LP: Lavoura x Pecuária; LF: Lavoura x Floresta.

Figura 3K - Cargas fatoriais do índice de qualidade do solo (IQS), com base na resposta de cada sistema, aos indicadores do número de indivíduos da macrofauna do solo.

Fatores	Cargas
F1	1,28
F2	0,76
F3	-0,08
F4	0,01

Figura 3L - Scores do Índice de Qualidade do Solo (IQS) baseado nos indicadores do número de indivíduos da macrofauna do solo - reflete a influência de NAA e NAJ.

Sistemas	IQS
L	-0,92
LP	-0,91
PEC	-0,79
LPF	-0,18
PF	0,38
LF	0,68
F	0,81
N	0,93

Sistemas - F: Floresta; L: Lavoura; LF: Lavoura x Floresta; LP: Lavoura x Pecuária; LPF: Lavoura x Pecuária x Floresta; PEC: Pecuária; PF: Pecuária x Floresta; N: Área de revegetação natural.

ANEXO 4 - DADOS REFERENTES AOS INDICADORES QUÍMICOS DE QUALIDADE DO SOLO

Tabela 4A - Autovalores e autovetores das análises de componentes principais (PCA) dos atributos de fertilidade do solo {P, K⁺, CA²⁺, Mg²⁺ e H+Al³⁺} em sistemas agrários e naturais estudados (**com área de vegetação natural**).

PCs	Autovalores	P	K	Ca	Mg	HAl
PC1	2,76	-0,41	-0,26	-0,53	-0,45	0,53
PC2	0,78	0,57	-0,81	-0,09	0,00	-0,03
PC3	0,27	-0,62	-0,42	0,09	-0,07	-0,66
PC4	0,08	-0,34	-0,30	0,35	0,65	0,49
PC5	0,03	0,01	-0,09	0,76	-0,61	0,21

Tabela 4B - Autovalores e autovetores das análises de componentes principais (PCA) dos atributos de fertilidade do solo {P, K⁺, CA²⁺, Mg²⁺ e H+Al³⁺} em sistemas agrários estudados (**sem área de vegetação natural**).

PCs	Autovalores	P	K	Ca	Mg	H+Al
PC1	0,92	-0,66	0,74	0,01	-0,08	0,07
PC2	0,61	-0,60	-0,57	-0,35	-0,42	-0,09
PC3	0,11	-0,44	-0,34	0,44	0,70	0,11
PC4	0,03	-0,01	0,11	-0,68	0,55	-0,48
PC5	0,00	0,03	-0,02	-0,47	0,18	0,86

Tabela 4C - Cargas fatoriais da análise de fatores (AF) para o grupo de indicadores da análise química do solo, em sistemas agrários estudados (**sem área de vegetação natural**).

Variáveis	F1 (55%)	F2 (36%)
P	-0,25	-0,75
K	0,84	0,04
Ca	0,17	-0,22
Mg	0,12	-0,31
H+Al	0,10	-0,02

Tabela 4D - Scores da análise de fatores (AF) para o grupo de indicadores da análise química do solo, em sistemas agrários estudados (**sem área de vegetação natural**).

Sistemas	Fator 1 K ⁺	Fator 2 P
F	-0,20	-1,40
L	1,38	-0,56
LF	-0,19	-0,58
LP	1,07	0,90
LPF	-0,78	-0,48
PEC	0,21	1,30
PF	-1,49	0,82

Fator 1 - Teor de Potássio no solo; Fator 2 - Teor de Fósforo no solo; Sistemas - F: Floresta; L: Lavoura; LF: Lavoura x Floresta; LP: Lavoura x Pecuária; LPF: Lavoura x Pecuária x Floresta; PEC: Pecuária; PF: Pecuária x Floresta.

Figura 4E - Cargas fatoriais do índice de qualidade do solo (IQS), com base na resposta de cada sistema, aos indicadores da análise química do solo.

Variáveis	Cargas
P	-1,00
K	0,88
Ca	-0,05
Mg	-0,19
HAl	0,07

Figura 4F - Scores do Índice de Qualidade do Solo (IQS) baseado nos indicadores da análise química à profundidade de 0 a 10cm - Reflete a influência de P e K.

Variáveis	IQS
F	-0,76
LPF	-0,64
PF	-0,41
LF	-0,37
L	0,47
PEC	0,72
LP	0,99

Sistemas - F: Floresta; LPF: Lavoura x Pecuária x Floresta; PF: Pecuária x Floresta; LF: Lavoura x Floresta; L: Lavoura; PEC: Pecuária; LP: Lavoura x Pecuária.

ANEXO 5 - DADOS REFERENTES AOS INDICADORES GERAIS – BIOQUÍMICOS, QUÍMICOS E DE MACROFAUNA, DE QUALIDADE DO SOLO

Tabela 5A - Autovalores e autovetores das análises de componentes principais (PCA) para indicadores bioquímicos, químicos e de biomassa de macrofauna do solo, em sistemas agrários estudados.

PCs	Autovalores	BGI	Ari	Res	MO	Umi	P	K	Ca	Mg	HAI	BAA	BAJ	BPA	BPJ
PC1	2,79	0,09	0,15	-0,25	0,01	0,57	-0,29	0,48	0,02	-0,02	0,04	0,31	0,05	0,30	0,29
PC2	1,90	-0,25	-0,18	-0,21	0,26	-0,10	-0,41	-0,14	-0,12	-0,18	-0,02	-0,41	-0,48	0,24	0,29
PC3	1,10	0,32	0,23	0,51	0,22	0,29	0,09	0,13	0,18	0,15	0,07	-0,22	-0,55	-0,05	-0,11
PC4	0,49	-0,05	-0,12	0,13	0,42	0,04	-0,02	-0,16	-0,27	-0,38	-0,05	0,66	-0,23	-0,14	-0,19
PC5	0,31	-0,08	0,24	0,32	0,54	0,10	-0,30	-0,19	-0,16	0,20	-0,09	-0,16	0,56	0,05	0,04
PC6	0,12	-0,02	-0,13	0,20	-0,39	0,17	-0,67	-0,14	0,16	-0,14	0,20	-0,01	0,04	-0,10	-0,44
PC7	0,00	0,12	-0,32	-0,43	0,12	0,58	0,16	-0,30	-0,15	0,22	-0,08	-0,20	0,01	-0,24	-0,23

BGI - β -glucosidase; Ari - Arilsulfatase; RBS - Respiração Basal do Solo; MO - Matéria Orgânica; Umi - Umidade do solo; K⁺, P, Mg²⁺ e Ca²⁺ e H+A³⁺; BAA: Biomassa do gênero *Amyntas* Adultos; BAJ: Biomassa do gênero *Amyntas* Juvenis; BPA: Biomassa do gênero *Pontoscolex* adultos; BPJ: Biomassa do gênero *Pontoscolex* juvenis.

Tabela 5B - Autovalores e autovetores das análises de componentes principais (PCA) para indicadores bioquímicos, químicos e de número de indivíduos da macrofauna do solo, em sistemas agrários estudados.

PCs	Autovalores	BGI	Ari	Res	MO	Umi	P	K	Ca	Mg	HAI	NAA	NAJ	NPA	NPJ
PC1	3,39	0,09	0,14	-0,23	-0,02	0,51	-0,23	0,44	0,02	-0,02	0,04	0,36	0,37	0,25	0,28
PC2	1,51	-0,36	-0,25	-0,39	0,20	-0,15	-0,49	-0,16	-0,18	-0,25	-0,04	-0,29	-0,05	0,30	0,22
PC3	0,80	0,18	0,22	0,41	0,41	0,35	-0,26	0,11	0,13	0,14	0,05	-0,46	-0,34	0,11	0,11
PC4	0,44	-0,05	-0,01	0,25	0,61	0,07	-0,06	-0,21	-0,31	-0,27	-0,09	0,54	0,00	-0,14	-0,13
PC5	0,10	-0,18	0,16	0,04	-0,35	0,12	-0,64	-0,16	-0,01	0,28	0,03	0,20	-0,12	-0,13	-0,46
PC6	0,09	0,19	-0,36	0,38	-0,29	0,13	-0,24	-0,12	0,18	-0,55	0,26	-0,08	0,19	-0,23	0,13
PC7	0,00	-0,28	-0,20	0,57	-0,24	-0,02	0,04	0,15	-0,48	0,22	-0,25	-0,07	0,20	0,26	0,13

BGI - β -glucosidase; Ari - Arilsulfatase; RBS - Respiração Basal do Solo; MO - Matéria Orgânica; Umi - Umidade do solo; K⁺, P, Mg²⁺ e Ca²⁺ e H+A³⁺; NAA: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Adultos; NAJ: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Juvenis; NPA: Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Adultos; NPJ: Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Juvenis.

Tabela 5C - Cargas fatoriais da análise de fatores (AF) para indicadores bioquímicos, químicos e de biomassa da macrofauna do solo, em sistemas agrários estudados.

Variáveis	F1 (42%)	F2 (28%)	F3 (16%)
BGI	-0,18	-0,05	0,47
Ari	-0,01	-0,07	0,43
Res	-0,65	0,25	0,24
MO	0,13	0,41	-0,01
Umi	0,57	-0,10	0,82
P	-0,71	-0,23	0,05
K	0,47	-0,22	0,65
Ca	-0,12	0,00	0,22
Mg	-0,21	-0,06	0,20
HAI	0,01	0,01	0,10
BAA	0,16	-0,67	0,41
BAJ	-0,11	-0,87	-0,03
BPA	0,59	0,09	0,10
BPJ	0,63	0,10	0,02

BGI - β -glucosidase; Ari - Arilsulfatase; RBS - Respiração Basal do Solo; MO - Matéria Orgânica; Umi - Umidade do solo; K⁺, P, Mg²⁺ e Ca²⁺ e H+Al³⁺; BAA: Biomassa do gênero *Amyntas* Adultos; BAJ: Biomassa do gênero *Amyntas* Juvenis; BPA: Biomassa do gênero *Pontoscolex* adultos; BPJ: Biomassa do gênero *Pontoscolex* juvenis.

Tabela 5D - Cargas fatoriais da análise de fatores para indicadores bioquímicos, químicos e de número de indivíduos da macrofauna do solo, em sistemas agrários estudados.

Variáveis	F1 (54%)	F2 (24%)
BGI	1,7E-01	-4,5E-01
Ari	2,5E-01	-3,1E-01
Res	-4,2E-01	-4,8E-01
MO	-3,2E-02	2,5E-01
Umi	9,4E-01	-1,9E-01
P	-4,2E-01	-6,0E-01
K	8,0E-01	-1,9E-01
Ca	3,8E-02	-2,3E-01
Mg	-3,8E-02	-3,0E-01
HAI	6,8E-02	-5,3E-02
NAA	6,6E-01	-3,5E-01
NAJ	6,9E-01	-6,4E-02
NPA	4,6E-01	3,7E-01
NPJ	5,2E-01	2,7E-01

BGI - β -glucosidase; Ari - Arilsulfatase; RBS - Respiração Basal do Solo; MO - Matéria Orgânica; Umi - Umidade do solo; K⁺, P, Mg²⁺ e Ca²⁺ e H+Al³⁺; NAA: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Adultos; NAJ: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Juvenis; NPA: Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Adultos; NPJ: Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Juvenis.

Tabela 5E - Scores da análise de fatores (AF) para indicadores bioquímicos, químicos e de biomassa da macrofauna do solo, em sistemas agrários estudados.

Sistemas	F 1 (RBS, P vs BPA, BPJ)	F 2 (BAA, BAJ)	F 3 (BGI, Umi, K)
F	-1,13	0,39	-0,02
L	-0,17	0,30	2,08
LF	-0,46	-1,98	-0,41
LP	1,36	-0,27	0,30
LPF	-0,49	-0,10	-0,39
PEC	1,45	0,41	-0,67
PF	-0,55	1,26	-0,90

Fator 1 - Contraste entre RBS, P vs BPA, BPJ (RBS: Respiração Basal do Solo; P: P_2O_5 ; BPA: Biomassa do gênero *Pontoscolex* adultos; BPJ: Biomassa do gênero *Pontoscolex* juvenis).

Fator 2 - Influência da Biomassa de *Amyntas* adultas e juvenis (BAA: Biomassa do gênero *Amyntas* Adultos; BAJ: Biomassa do gênero *Amyntas* Juvenis); **Fator 3** - Influência da atividade da Enzima β -glucosidase no solo (mg de *p-nitrofenol*/kg de solo/h), da Umidade do solo (%) e da concentração de K^{2+} no solo. **Sistemas** - F: Floresta; L: Lavoura; LF: Lavoura x Floresta; LP: Lavoura x Pecuária; LPF: Lavoura x Pecuária x Floresta; PEC: Pecuária; PF: Pecuária x Floresta.

Tabela 5F - Scores da análise de fatores (AF) para indicadores bioquímicos, químicos e de número de indivíduos da macrofauna do solo, em sistemas agrários estudados.

Sistemas	F 1 (Umi, K, NAA, NAJ, NPA, NPJ)	F 2 (BGI, RBS, P)
F	-0,98	-0,67
L	0,98	-1,33
LF	-0,07	-0,71
LP	1,41	0,63
LPF	-0,46	-0,19
PEC	0,43	1,49
PF	-1,31	0,78

Fator 1 - Influência da Umidade do solo (Umi - %); do teor de Potássio (K^{2+}), do Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Adultos (NAA); do Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Juvenis (NAJ); do Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Adultos (NPA) e do Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Juvenis (NPJ). **Fator 2** - Influência da Atividade Enzimática da β -glucosidase no solo (mg de *p-nitrofenol*/kg de solo/h); da Respiração Basa do Solo (RBS) e da concentração de P_2O_5 no solo (P). **Sistemas** - F: Floresta; L: Lavoura; LF: Lavoura x Floresta; LP: Lavoura x Pecuária; LPF: Lavoura x Pecuária x Floresta; PEC: Pecuária; PF: Pecuária x Floresta.

Figura 5G - Cargas fatoriais do índice de qualidade do solo (IQS), com base na resposta de cada sistema, aos indicadores bioquímicos, químicos e de biomassa da macrofauna do solo, em sistemas agrários estudados.

Variáveis	Cargas
BGI	0,24
Ari	0,35
Res	-0,16
MO	0,53
Umi	1,30
P	-0,89
K	0,90
Ca	0,11
Mg	-0,07
HAi	0,12
BAA	-0,10
BAJ	-1,01
BPA	0,78
BPJ	0,75

BGI: β -glucosidase; Ari: Arilsulfatase; RBS: Respiração Basal do Solo; MO: Matéria Orgânica; Umi: Umidade do solo; K⁺, P, Mg²⁺ e Ca²⁺ e H⁺Al³⁺; BAA: Biomassa do gênero *Amyntas* Adultos; BAJ: Biomassa do gênero *Amyntas* Juvenis; BPA: Biomassa do gênero *Pontoscolex* adultos; BPJ: Biomassa do gênero *Pontoscolex* juvenis.

Figura 5H - Scores do Índice de Qualidade do Solo (IQS) com base na resposta de cada sistema, aos indicadores bioquímicos, químicos e de biomassa da macrofauna do solo, em sistemas agrários estudados.

Sistemas	IQS
LF	-0,73
F	-0,49
LPF	-0,38
PF	-0,33
PEC	0,57
L	0,65
LP	0,71

Sistemas: F: Floresta; LPF: Lavoura x Pecuária x Floresta; PF: Pecuária x Floresta; LF: Lavoura x Floresta; L: Lavoura; PEC: Pecuária; LP: Lavoura x Pecuária.

Figura 5I - Cargas fatoriais do índice de qualidade do solo (IQS), com base na resposta de cada sistema, aos indicadores bioquímicos, químicos e de número de indivíduos da macrofauna do solo, em sistemas agrários estudados.

Variáveis	Cargas
BGI	-0,28
Ari	-0,06
Res	-0,90
MO	0,21
Umi	0,76
P	-1,03
K	0,61
Ca	-0,19
Mg	-0,34
HAl	0,01
NAA	0,31
NAJ	0,62
NPA	0,83
NPJ	0,79

BGI: β -glucosidase; Ari: Arilsulfatase; RBS: Respiração Basal do Solo; MO: Matéria Orgânica; Umi: Umidade do solo; K⁺, P, Mg²⁺ e Ca²⁺ e H+Al³⁺; NAA: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Adultos; NAJ: Número de indivíduos do gênero *Amyntas* Juvenis; NPA: Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Adultos; NPJ: Número de indivíduos do gênero *Pontoscolex* Juvenis.

Figura 5J - Scores do Índice de Qualidade do Solo (IQS) com base na resposta de cada sistema, aos indicadores bioquímicos, químicos e de número de indivíduos da macrofauna do solo, em sistemas agrários estudados.

Sistemas	IQS
F	-0,89
PF	-0,66
LPF	-0,37
LF	-0,27
L	0,27
PEC	0,76
LP	1,16

Sistemas: F: Floresta; LPF: Lavoura x Pecuária x Floresta; PF: Pecuária x Floresta; LF: Lavoura x Floresta; L: Lavoura; PEC: Pecuária; LP: Lavoura x Pecuária.

