

Artigo

# Soil Health Check-Up of Conservation Agriculture Farming Systems in Brazil

## Check-Up da Saúde do Solo em Sistemas Agrícolas sob Agricultura Conservacionista no Brasil

Jardel H. Passinato <sup>1</sup>, Telmo J. C. Amado <sup>1,\*</sup>, Amir Kassam <sup>2,\*</sup>, José A. A. Acosta <sup>3</sup> e Lúcio de P. Amaral <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal Santa Maria, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil; jardel.passinato@gmail.com

<sup>2</sup> School of Agriculture, Policy and Development, University of Reading, Whiteknights, P.O. Box 217, Reading RG6 6AH, UK

<sup>3</sup> Drakkar Solos Consultoria, Santa Maria, 97105-330, RS, Brasil; alan@drakkar.com.br

<sup>4</sup> Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil; amaralufsm@gmail.com

\* Correspondência: proftelmoamado@gmail.com (T.J.C.A.); amirkassam786@googlemail.com (A.K.)

**Resumo:** A agricultura conservacionista constitui-se como a principal estratégia para regenerar a vida no solo, mas o efeito sobre a atividade enzimática no solo ainda é pouco documentado. Este estudo investigou as enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase como ferramentas para avaliar a saúde do solo a nível de campo. Campos de produção em quatro estados do Brasil foram selecionados para este estudo. Em cada campo de produção, três ambientes (alta produtividade (HYE), média produtividade (MYE) e baixa produtividade (LYE)) foram delimitados para a amostragem de solo para determinar a atividade enzimática e atributos químicos. Em um destes campos com um vasto banco de dados temporais, a caracterização do DNA do solo foi realizada. As duas enzimas no solo investigadas foram afetadas pela relação dos atributos do solo e os mais importantes deles foram identificados. Cerca de 40% dos pontos amostrados tinham baixos teores de matéria orgânica do solo; estes associados à baixa atividade enzimática. Além disso, no HYE houve maior biodiversidade e uma maior presença de organismos promotores de crescimento às plantas, enquanto no LYE houve maior ocorrência de organismos patogênicos.

**Palavras-chave:** Agro-ecorregiões brasileiras; biodiversidade do solo; enzimas do solo; matéria orgânica

**Citação:** Passinato, J.H.; Amado, T.J.C.; Kassam, A.; Acosta, J.A.A.; Amaral, L.d.P. Soil Health Check-Up of Conservation Agriculture Farming Systems in Brazil. *Agronomy* **2021**, *11*, 2410. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122410>

Editor Acadêmico: Yash Dang

Recebido: 29 Setembro 2021

Aceito: 22 Novembro 2021

Publicado: 26 Novembro 2021

**Nota do editor** A MDPI permanece neutro em relação a reivindicações jurisdicionais em mapas publicados e afiliações institucionais.



**Direito autorial:** ©2021 pelos autores. Licenciado MDPI, Basel, Suíça. Este artigo é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos e condições da licença Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### 1. Introdução

O crescimento populacional global projetado para as próximas décadas aumentará a demanda por alimentos, fibras, biocombustíveis, energia, água e outros produtos agrícolas. Como consequência disso, haverá uma pressão crescente sobre os ecossistemas naturais e os agro-ecossistemas, que já enfrentam desafios de sustentabilidade devido às mudanças climáticas e à degradação do solo, atrelada à perda da biodiversidade, comprometendo seus serviços ambientais e a produção agrícola em diferentes escalas [1]. Esse cenário evidencia uma grande necessidade do desenvolvimento de sistemas agrícolas mais sustentáveis. Uma produção agrícola convencional com atitudes baseadas em custo-benefício na maioria das regiões do mundo falhará em fornecer intensificação

sustentável da produção para atender às necessidades futuras [1,2]. Portanto, há uma necessidade urgente de redesenho dos sistemas de produção agrícola, a fim de diminuir os custos ambientais, econômicos e sociais associados aos atuais sistemas de produção baseados em monocultivo e revolvimento intensivo que criam solos descobertos e implicam altas aplicações agroquímicas [3-5].

A Agricultura Conservacionista (AC) é praticada há mais de quatro décadas nas regiões pioneiras da América do Norte e do Sul [1,6]. Baseada nos resultados positivos obtidos, esta vem se expandindo gradualmente pelo mundo afim de preencher as importantes lacunas da agricultura convencional em atender às necessidades da sociedade e aos desafios ambientais. Os três princípios interligados que definem a AC são: (a) minimizar ou abandonar a perturbação mecânica pelo revolvimento do solo de todas as formas, incluindo a não inversão das camadas do solo, reduzindo a taxa de decomposição dos resíduos das culturas, evitando incorporá-los ao solo, assim prevenindo picos de atividade biológica de curto prazo associados a fluxos de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo e a ruptura física de agregados do solo; (b) manutenção de uma cobertura vegetal com biomassa diversa ao longo do ano todo, incluindo material vegetal vivo e morto sobre o solo para proteger a superfície do solo e servir como uma fonte contínua e diversificada de substrato para uma comunidade diversificada de microrganismos do solo; e (c) aumentar a diversificação de espécies de plantas no sistema de cultivo por meio de rotações e associações de culturas, incluindo culturas de cobertura que poderiam ser inseridas em qualquer janela de tempo livre entre o cultivo de culturas comerciais, incluindo leguminosas fixadoras de N que resultam em uma entrada de biomassa de alta qualidade no solo, estimulando bactérias e fungos promotores de crescimento às plantas [1,3,6,7].

Atualmente, o Brasil possui cerca de 43 M ha de áreas agrícolas manejadas sob AC com distintos níveis de implementação situadas em diferentes agro-ecorregiões, refletindo a dimensão continental do país (quinto maior país do mundo em termos de área) e diversas tradições de cultivo agrícola [6]. Em consequência, há uma interação complexa de condições climáticas, de solo e humanas (experiência de manejo com a AC) criando um mosaico de sistemas de manejo. Estes variam de sistemas de AC situados nos primeiros anos de transição em relação a agricultura convencional, até sistemas de AC maduros que foram transformados por agricultores pioneiros do plantio direto há várias décadas. As consequências para a saúde do solo, resultantes desta gama de sistemas de AC de duração variável, ainda não estão muito bem documentadas. Esta é uma importante lacuna de conhecimento que precisa ser preenchida, para evitar conclusões erradas ou enganosas sobre a qualidade do solo e a eficácia da AC. Nesse sentido, bioindicadores, como a atividade enzimática do solo, são sensíveis ao manejo e estão fortemente associados à porção viva do solo [8]. Assim, a atividade enzimática do solo pode servir como um indicador integrado de vários atributos-chave do solo, apoiando sua mensuração como parte de uma avaliação holística e completa da AC.

A saúde do solo pode ser definida como a capacidade de funcionamento específica de um tipo de solo, com limites naturais ou manejáveis, a fim de sustentar a capacidade de produtividade vegetal e animal, manter/melhorar a qualidade da água e do ar, promovendo a saúde humana e a diversidade biológica [4,9,10]. O conceito de "eficácia da conservação" abrange não apenas a conservação do solo e da água, mas também o aprimoramento do componente biológico do solo que é a base da sustentabilidade [1]. De forma análoga, a 'eficácia da produção agrícola' abrange não apenas a manutenção dos níveis de nutrientes químicos do solo superficial acima de certos níveis críticos, mas também a provisão de um habitat acolhedor para diversos microbiomas do solo que estimularão a ciclagem de nutrientes, agregação do solo, infiltração e retenção de água e aumentar a absorção de água e nutrientes das plantas pelas raízes.

A saúde do solo requer que as principais funções do solo, como capacidade produtiva, proteção ambiental e saúde de plantas e animais, sejam bem equilibradas por meio de sábias decisões de manejo [11]. Além disso, a saúde do solo pode ser entendida

como um subcomponente da saúde mais ampla do ecossistema. Um ecossistema saudável depende de uma ciclagem eficiente de nutrientes, uma alta taxa de fotossíntese, fluxo contínuo de energia, estabilidade e resiliência ao estresse [12,13]. Nesse sentido, existe uma forte ligação entre a saúde do ecossistema, a saúde do solo e o vigor das plantas, na qual a atividade microbiana, a biodiversidade e a estabilidade da comunidade desempenham um papel essencial [13]. Portanto, construir a saúde do solo por meio de práticas agrícolas é um caminho primário para garantir uma agricultura sustentável. O microbioma que vive na rizosfera é um 'hot-spot' onde a microbiota pode atuar como promotora de crescimento às plantas e reguladora de crescimento das plantas. Alternativamente, a microbiota pode atuar como patógenos às plantas ou detratores de crescimento de plantas, afetando o crescimento das raízes por meio de efeitos negativos na absorção de nutrientes pelas plantas e na eficiência do uso da água e pela exacerbação de eventos de estresse biótico e abiótico [14,15]. A construção de um microbioma diversificado na rizosfera é necessária para suprimir ou aliviar as pressões de patógenos de plantas e diminuir a incidência de doenças e sua gravidade, resultando em plantas mais vigorosas e com maior resiliência às mudanças climáticas [13,16,17].

Atributos físicos do solo, particularmente textura do solo, estrutura, compactação, densidade do solo, agregação, porosidade e disponibilidade de água, atributos químicos do solo, especialmente potencial de hidrogênio (pH), matéria orgânica do solo (MOS), N, exsudatos de raízes de plantas, salinidade, alumínio ( $Al^{3+}$ ), hidrogênio, capacidade de troca catiônica (CTC), sistemas de cultivo e condições climáticas, impulsionam a atividade microbiana do solo e sua diversidade funcional [13]. A atividade e diversidade microbiana são bioindicadores sensíveis da qualidade do manejo do solo [3,15]. Portanto, a avaliação da atividade enzimática e do microbioma do solo podem fornecer informações iniciais sobre a qualidade do manejo do solo em termos de melhorar a saúde do solo ou prevenir a degradação antes que se alcance um estado muito avançado [13].

Entre várias enzimas do solo que desempenham papéis importantes na saúde do solo e das plantas, Mendes et al. [8] propuseram a atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase como indicadores-chave para a compreensão da função da ciclagem de nutrientes do solo, atribuindo pesos semelhantes a essas enzimas em relação à sua importância para essa função específica. Essas duas enzimas do solo estão gradualmente sendo incluídas nas análises de rotina do solo no Brasil [8] pois se mostraram bioindicadores eficientes nos solos do Cerrado (Centro-Oeste) brasileiro, atuando como indicadores de alerta de mudanças na qualidade do solo, associadas a práticas de manejo da produção adotadas [15,18]. Além disso, Mendes et al. destacaram que essas enzimas estão fortemente associadas a produtividade das culturas e ao conteúdo de MOS [19], encaixando-se bem na necessidade de definir limites críticos destes bioindicadores-chave [18-20]. A enzima  $\beta$ -glicosidase desempenha um papel importante no ciclo de C do solo e na ciclagem de nutrientes, principalmente de N [8]. A arilsulfatase desempenha um papel no ciclo do enxofre (S) do solo, mediando a transformação do S orgânico em  $SO_4^{2-}$ , a forma em que pode ser absorvido pelas plantas. O S é um nutriente importante na nutrição das culturas de soja e milho e solos tropicais frequentemente são deficientes em sua disponibilidade para as plantas [8,21].

A principal hipótese deste estudo é que o desempenho das culturas em diferentes ambientes produtivos está fortemente associado à atividade biológica do solo, que pode ser afetada positiva ou negativamente de acordo com uma complexa interação envolvendo o sistema de manejo do solo adotado, o tipo de solo e o clima. O conhecimento dessa interação criaria oportunidades para aumentar a vida do solo e o desempenho das culturas.

Neste estudo, buscamos avançar no conhecimento sobre a relação entre distintos ambientes de produtivos (YEs) dentro de campos de produção e atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase. Também procuramos entender os principais atributos do solo que afetam a atividade enzimática nas principais agro-ecorregiões brasileiras. Finalmente, buscamos estudar a presença de organismos promotores de crescimento de plantas e

organismos patogênicos de plantas nos distintos YEs. Essas questões ainda são pouco abordadas na literatura da AC, mas o conhecimento sobre elas, criaria a oportunidade para os agricultores aplicarem o manejo do solo em sítio específico para construir e sustentar a vida do solo e a saúde das plantas.

O objetivo principal deste estudo foi avaliar a saúde do solo, por meio da atividade de duas enzimas como bioindicadores, em áreas de cultivo sob AC de longa duração nas principais agro-ecorregiões brasileiras. Além disso, em um campo de produção para o qual havia um grande conjunto de dados temporais referentes a produtividade das culturas, a caracterização do DNA do solo foi realizada para capturar a relação do microbioma com distintos YEs de culturas dentro do campo.

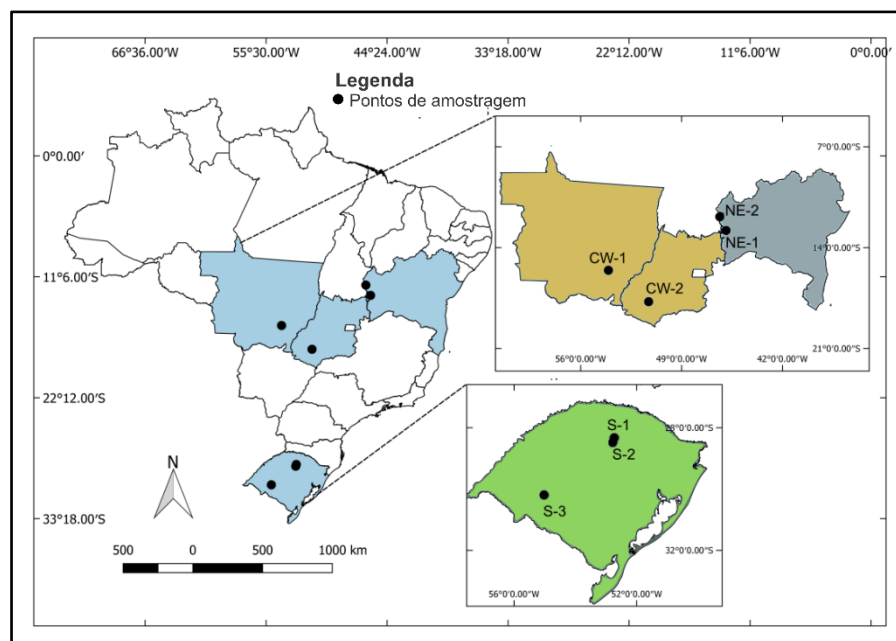
## 2. Material e Métodos

### 2.1. Agro-Ecorregiões, Campos de Produção e Ambientes Produtivos dentro dos campos

Este estudo foi conduzido em sete campos de produção de grãos distribuídos em quatro estados os quais vêm sendo manejados continuamente sob AC nos últimos 10 a 20 anos. Esses campos foram selecionados pois ofereciam registros de produtividade das culturas mantidos pela equipe do Projeto Aquarius (<https://www.facebook.com/projetoaquariusufsm/>, acessado em 20 de outubro de 2021) que eram representativos dos sistemas agrícolas atualmente adotados em sua agro-ecorregião. Em geral, os campos tiveram produtividades de soja acima da média nacional (3.5 Mg ha<sup>-1</sup> em 2020/21), com um campo (S-1) com recorde nacional de produtividade de soja e milho (<https://thefurrow.co.uk/brazilian-farmers-aim-for-sustainability/>, acessado em 24 de outubro de 2021).

Os campos selecionados estão localizados nas principais agro-ecorregiões do Brasil que são: Sul, Centro-Oeste ('Cerrado') e Nordeste (Figura 1 e Tabela 1) os quais possuem uma variedade de texturas de solo. O tipo de solo é Hapludox, exceto no campo S-3 que é Paleudalf de acordo com a classificação da Soil Taxonomy. Em cada campo, três YEs dentro do campo foram delineados com base em registros de produtividade de culturas e imagens de satélite (NDVI), de acordo com os dados disponíveis da fazenda. O HYE foi classificado como >110% do rendimento médio da cultura no campo, o MYE como 80-110% e o LYE como <80%. Os critérios para definir YEs no estudo têm sido amplamente utilizados na literatura de agricultura de precisão [22-25]. Em nosso estudo, todos os dados de produtividade de safras anteriores dentro de cada campo foram relativizados para que o ano e a cultura cultivada fossem levados em consideração no estudo. Por exemplo, a produtividade de milho foi relativizada em relação à maior produtividade de milho obtida no campo naquele ano específico, levando em consideração a variabilidade espacial capturada através do sensor de produtividade de grãos instalado na colhedora.

O mesmo foi realizado para a soja a fim de capturar a variabilidade espacial no desempenho da cultura. Estudos anteriores da equipe do Projeto Aquarius mostraram que o mapa de produtividade de milho tem relações mais próximas com os atributos do solo do que o mapa de produtividade de soja, justificando seu uso no delineamento de YEs quando disponível. O LYE em cada campo serviu como um nível de manejo de referência que precisa ser melhorado. O HYE em cada campo e em todo o conjunto de campos serviu como um nível de referência de manejo eficiente que precisa ser entendido em termos de atributos do solo que minimizam os fatores limitantes da produtividade da cultura.



**Figura 1.** Distribuição geográfica dos campos amostrados nas principais agro-ecorregiões do Brasil. Agro-ecorregiões estão em diferentes cores: verde = Sul (campos S-1 = Carazinho, S-2 = Não-Me-Toque e S-3 = Rosário do Sul, no estado do Rio Grande do Sul); laranja = Centro-Oeste (campos CW-1 = Primavera do Leste, no estado do Mato Grosso e CW-2 = Rio Verde, no estado de Goiás); cinza = Nordeste (campos NE-1 = Luís Eduardo Magalhães e NE-2 = Luís Eduardo Magalhães, no estado da Bahia).

**Tabela 1.** Localização dos campos, áreas, temperatura média anual (T), precipitação anual acumulada (P), altitude média (E) e textura do solo.

Campo	Localização (Cidade-Estado)	Área (ha)	T (°C)	P (mm a <sup>-1</sup> )	E (m)	Textura do Solo <sup>1</sup>
S-1	Carazinho-RS	60.1	18.3	1483	565	Franco-argiloso
S-2	Não-Me-Toque-RS	136.0	19.0	1771	500	Franco-argiloso
S-3	Rosário do Sul-RS	25.0	19.5	1493	155	Franco-arenoso
CW-1	Primavera do Leste-MT	348.8	24.0	1471	650	Franco-argilo-arenoso
CW-2	Rio Verde-GO	509.8	23.1	1294	875	Franco-argiloso
NE-1	Luís Eduardo Magalhães-BA	1376.1	23.6	881	830	Franco-argilo-arenoso
NE-2	Luís Eduardo Magalhães-BA	690.9	25.0	1089	880	Franco-argilo-arenoso

<sup>1</sup> Textura do solo classificada de acordo com Soil Survey Staff (2014) [26]; Dados meteorológicos extraídos das estações automáticas do INMET mais próximas, correspondentes aos anos de 2018, 2019 e 2020. RS = Rio Grande do Sul; MT = Mato Grosso; GO = Goiás; BA = Bahia. S = Sul; CW = Centro-Oeste; NE = Nordeste.

## 2.2. Estratégias de Amostragem para Análises das Enzimas, Atributos Físico-Químicos, Caracterização do DNA do Solo e Produtividade das Culturas

Em cada um dos três YEs, foram coletadas três amostras aleatórias nos sete campos selecionados, totalizando 63 pontos amostrais georreferenciados. O solo foi coletado na profundidade de 0 a 0.10 m. Amostras de solo para análise da atividade enzimática foram coletadas 40 dias após a emergência da cultura (soja em floração) com cavadeiras manuais. Sete subamostras foram coletadas para obter uma amostra composta de solo seguindo o esquema: uma no centro da linha de cultivo e três em cada lado da linha. Após peneiramento (<2 mm) e remoção de restos culturais, as amostras de solo foram secas ao ar seguindo a metodologia proposta por Mendes et al. [8,18]. A análise laboratorial da atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase seguiu a metodologia de Tabatabai [27].

As análises químicas foram pH do solo em água (1:1), potássio ( $K^+$ ) e fósforo (P) extraídos com solução de Mehlich-I. O teor de  $K^+$  foi determinado por fotometria de chama e o teor de P por colorimetria, utilizando azul de molibdênio [28]. Cálcio ( $Ca^{2+}$ ), magnésio ( $Mg^{2+}$ ), manganês ( $Mn^{2+}$ ) e  $Al^{3+}$  foram extraídos usando solução de KCl 1.0 mol  $L^{-1}$  [29]. Cobre ( $Cu^{2+}$ ) e zinco ( $Zn^{2+}$ ) foram extraídos com HCl 0.1 mol  $L^{-1}$  [29].  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $Mn^{2+}$  foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. O  $Al^{3+}$  foi titulado com NaOH 0.025 mol  $L^{-1}$ . S foi extraído por solução de fosfato de Ca e determinado em solução de gelatina BaCl<sub>2</sub>. O boro (B) foi extraído por digestão e determinado por colorimetria. A CTC em pH 7 foi determinada pela soma das bases trocáveis ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ , e  $Mg^{2+}$ ) mais a acidez potencial ( $H + Al^{3+}$ ) seguindo Tedesco et al. [29]. A textura do solo foi determinada pelo método da pipeta de acordo com Teixeira et al. [30].

O teor de MOS foi determinado através de adaptações do método Walkley-Black com oxidação por solução sulfocrômica com calor externo e teor de  $Cr^{3+}$  determinado por espectrofotometria [29]. As concentrações de C orgânico e N total do solo (COT e NT) foram determinadas por combustão seca por meio de análise elementar (Thermo Fisher Scientific—FlashEA® 1112, Waltham, MA, EUA, limite de detecção = 0,01%). Para isso, aproximadamente 50 mg de solo, seco em estufa (60 °C, 72 h) e finamente macerado, foi pesado em balança com precisão de 0.001 mg e preparado para combustão a seco a 975 °C. Os estoques de COT e NT foram calculados levando-se em conta a densidade aparente de cada tipo de solo.

Os campos de produção selecionados para este estudo possuíam registros de produtividades de soja e milho de safras anteriores que permitiram o delineamento de YEs. Durante a safra 2020/21 a produtividade de grãos foi determinada pela colheita manual de 1 m<sup>2</sup> em três repetições. Os dados meteorológicos foram obtidos da estação meteorológica mais próxima, pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) para a soja, foi determinada mantendo-se a amostragem de enzimas do solo como pontos centrais, utilizando-se a plataforma Atfarm® (Yara Ltda, Oslo, Noruega). As imagens de satélite foram selecionadas no estágio de floração da soja e classificadas por meio de um índice de acordo com uma escala que variava de 0.0 a 1.0.

Um dos campos do Projeto Aquarius (S-2) que possuía um grande conjunto de dados disponíveis, obtidos em um período de 20 anos, foi selecionado para caracterização do DNA do solo. A textura do solo era argilosa, caulínica e classificada como Rhodic Hapludox [26] (Latosolo Vermelho conforme a classificação brasileira - SBCS). Este campo de cultivo tem sido manejado sob AC desde 2002; mais detalhes podem ser encontrados em Pott et al. [23]. Na safra 2019/2020 amostras compostas de solo, seguindo a mesma metodologia descrita anteriormente, foram coletadas no HYE, MYE e LYE a 0–0.10 m de profundidade, e enviadas para o laboratório da Biome Markers® (<https://biomemakers.com>, acessado em 20 de outubro de 2021), nos Estados Unidos (EUA) para análise molecular da microbiota.

A extração de DNA foi realizada com o kit DNeasy 420 PowerLyzer PowerSoil da Qiagen [31]. Para caracterizar as comunidades microbianas bacterianas e fúngicas associadas às amostras de solo, foram selecionadas as regiões marcadoras de rRNA 16S e ITS. As bibliotecas foram preparadas seguindo o protocolo de PCR Illumina em duas etapas usando primers personalizados que amplificam a região 16S rRNA V4 e a região ITS1, conforme descrito anteriormente [31]. O sequenciamento de DNA foi realizado em um instrumento Illumina MiSeq usando sequenciamento de extremidade de par (2 × 300 bp). A plataforma BeCrop® (West Sacramento, CA, EUA) foi utilizada neste estudo, e mais detalhes podem ser encontrados em Imam et al. [31].

Neste campo, a resistência à penetração do solo na profundidade de 0–0.40 m foi determinada usando um penetrômetro digital PLG PenetroLOG 2040 (Falker®, Porto Alegre, Brasil) com precisão de 0.01 m de profundidade. As leituras do penetrômetro foram realizadas no estágio de floração da soja quando o solo estava próximo da capacidade de campo com amostragem gravimétrica de umidade do solo em 0-0.10, 0.10-

0.20, 0.20-0.30 e 0.30-0.40 m [30]. A condutividade elétrica aparente do solo (CE) foi determinada próximo aos pontos de amostragem do solo em 0–0.30 m com VERIS CE® (VERIS Technologies, Salina, KS, EUA). Os dados de macroporosidade do solo da camada superficial do solo foram obtidos de Pott et al. [23].

### 2.3. Análise Estatística

A atividade enzimática e a análise química do solo foram submetidas à análise de variância ( $p < 0.01$  e  $p < 0.05$ ) e correlação de Pearson. Nos campos que tiveram soja cultivada na safra 2020/21 (54 pontos de amostragem de solo), foi realizada uma análise de componentes principais (ACP) para determinar os direcionadores (drivers) da produtividade da soja e da atividade enzimática e a análise fatorial foi utilizada para melhor definir as variáveis originais que mais contribuíram para a formação dos componentes principais e fatores, utilizando a rotação normalizada varimax. Além disso, a análise de agrupamento (clusters) foi realizada para determinar as diferenças e semelhanças entre agro-ecoregiões, campos e seus YEs, usando o método de Ward como regra de amalgamação (ligação) e distâncias Euclidianas quadradas como medida de semelhança. Para agrupar variáveis e casos (cases) em dendrogramas e correlacioná-los com o gráfico de dispersão das variáveis produzidas na análise fatorial [32,33], foi utilizado o software Statistica 12®. As relações da atividade enzimática com os atributos do solo e a diversidade da biota (número de espécies identificadas nas amostras) foram investigadas por meio de ajustes lineares e quadráticos. A atividade enzimática e teores de MOS em cada YE dentro de campo foi comparada pelo teste de Tukey ( $p < 0.05$ ). O teste de Tukey e todos os relacionamentos utilizaram o pacote estatístico R Studio®.

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1. Caracterização dos Atributos de Solo, Produtividade das Culturas e Atividade Enzimática nos Ambientes de Produção nos Campos Seleccionados

A análise química do solo de sete campos seleccionados para este estudo é apresentada nas Tabelas 2 e 3. Os atributos químicos refletem o manejo dos agricultores e dos consultores em cada agro-ecoregião. Foram observadas diferenças marcantes na textura do solo, variando de 14.0% a 39.7% de teor de argila e 16.7% a 78.1% de teor de areia (Tabela 3).

**Tabela 2.** Conteúdo de fósforo (P), potássio ( $K^+$ ), enxofre (S), alumínio ( $Al^{3+}$ ), cálcio ( $Ca^{2+}$ ) magnésio ( $Mg^{2+}$ ), capacidade de troca catiônica (CTC), relação  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  e saturação de bases (V) do solo em 0–0.10 m de profundidade em distintos ambientes de potencial produtivos (YE) em sete campos manejados sob agricultura conservacionista nas principais agro-ecoregiões brasileiras.

Campo	YE	P	$K^+$	S	$Al^{3+}$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	CTC	$Ca^{2+}/Mg^{2+}$	V
		(mg dm <sup>-3</sup> )			(cmol. dm <sup>-3</sup> )			(%)		
S-1	H	35.5±8.3	308.3±35.8	28.2±15.4	0.0±0.0	6.9±2.0	3.2±0.8	13.5±2.7	2.2±0.1	79.9±3.3
	M	39.1±8.5	327.3±59.0	14.7±2.8	0.0±0.0	5.7±1.2	2.3±0.4	11.2±1.9	2.5±0.4	79.0±0.5
	L	56.8±13.2	205.3±48.6	11.6±0.4	0.0±0.0	4.7±0.9	1.9±0.5	9.2±1.6	2.4±0.1	78.0±1.5
S-2	H	41.3±5.9	385.3±66.4	6.7±1.4	0.0±0.0	5.8±1.3	1.9±0.3	11.5±1.7	3.0±1.0	75.9±5.5
	M	37.4±4.1	293.3±19.9	8.1±0.7	0.0±0.0	5.5±0.5	1.5±0.2	11.3±0.3	3.6±0.3	69.0±5.5
	L	53.2±37.8	283.7±22.0	9.5±0.4	0.0±0.0	5.4±1.2	1.8±0.4	11.4±0.7	3.0±0.3	69.3±5.0
S-3	H	61.3±5.9	236.3±3.8	7.9±3.1	0.0±0.0	9.9±2.5	3.1±0.6	16.2±3.3	3.2±0.0	83.7±2.3
	M	35.8±0.6	125.7±2.3	5.9±0.8	0.0±0.0	8.0±1.3	2.9±0.4	12.7±1.7	2.8±0.1	88.4±1.2
	L	76.7±3.9	246.3±9.1	17.5±4.5	0.0±0.0	3.6±0.2	1.4±0.1	6.8±0.3	2.5±0.0	82.1±0.5
CW-1	H	24.2±7.5	160.3±30.1	18.6±2.9	0.0±0.0	3.3±0.1	1.4±0.1	8.0±0.4	2.3±0.1	65.4±5.2
	M	22.1±7.9	149.0±12.8	16.2±10.4	0.0±0.0	4.0±0.5	1.7±0.3	8.4±0.4	2.3±0.3	72.0±6.8
	L	18.4±9.6	140.0±12.8	13.1±3.4	0.0±0.0	3.9±0.3	1.8±0.3	8.3±0.6	2.2±0.4	73.2±6.6

Cont. tabela 2.

CW-2	H	21.1±9.6	135.0±48.6	32.4±16.4	0.0±0.0	5.2±1.7	1.2±0.3	9.7±1.9	4.5±0.4	68.6±8.2
	M	19.3±5.7	142.0±18.4	33.2±16.1	0.0±0.0	5.0±1.2	1.2±0.3	9.9±1.6	4.1±0.1	66.4±6.0
	L	16.2±8.2	178.3±55.5	59.1±18.5	0.0±0.0	5.7±1.1	1.4±0.3	10.0±0.9	4.0±0.5	74.9±5.3
NE-1	H	28.7±6.4	88.3±8.3	8.9±0.7	0.0±0.0	2.7±0.8	1.2±0.4	5.2±1.0	2.3±0.1	78.8±6.7
	M	40.4±15.5	60.3±5.1	8.1±0.6	0.0±0.0	3.0±0.7	1.2±0.2	5.5±0.8	2.4±0.2	79.2±2.4
	L	45.4±10.7	87.3±23.7	7.9±1.6	0.0±0.0	2.7±0.5	1.1±0.3	5.1±0.8	2.5±0.2	77.6±5.1
NE-2	H	48.4±8.5	148.0±34.0	36.6±7.6	0.0±0.0	3.2±0.6	0.9±0.3	5.6±0.9	3.7±0.2	79.2±4.6
	M	62.5±16.7	157.3±38.8	65.6±37.8	0.0±0.0	2.8±0.2	0.6±0.2	4.9±0.4	4.7±0.3	77.9±2.1
	L	54.3±25.0	147.3±54.6	39.6±15.7	0.0±0.0	2.4±0.6	0.5±0.2	4.3±1.0	4.7±0.3	74.0±5.1

S = Sul (campos S-1 = Carazinho, S-2 = Não-Me-Toque e S-3 = Rosário do Sul, no estado do Rio Grande do Sul); CW = Centro-Oeste (campos CW-1 = Primavera do Leste, no estado do Mato Grosso e CW-2 = Rio Verde, no estado de Goiás); NE = Nordeste (campos NE-1 = Luis Eduardo Magalhães e NE-2 = Luís Eduardo Magalhães, no estado da Bahia). H = ambiente de alto potencial produtivo; M = ambiente de médio potencial produtivo; L = ambiente de baixo potencial produtivo. ± = corresponde ao desvio padrão.

**Tabela 3.** Textura, pH em água, acidez potencial (H + Al<sup>3+</sup>) e micronutrientes do solo, zinco (Zn<sup>2+</sup>), cobre (Cu<sup>2+</sup>), boro (B) e manganês (Mn<sup>2+</sup>) em 0–0.10 m de profundidade em distintos ambientes de potencial produtivos (YE) em sete campos manejados sob agricultura conservacionista nas principais agro-ecorregiões brasileiras.

Field	YE	pH	H + Al <sup>3+</sup>	Areia	Silte	Argila	Zn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	B	Mn <sup>2+</sup>
			(cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )							
S-1	H	6.1±0.1	2.7±0.2	43.2±5.2	18.5±4.1	38.3±1.2	4.3±0.8	3.4±0.5	0.8±0.1	7.0±1.0
	M	6.3±0.3	2.3±0.4	41.7±1.0	23.3±1.2	35.0±2.0	4.5±0.7	3.1±0.2	0.6±0.1	3.3±2.1
	L	6.5±0.1	2.0±0.3	49.7±15.1	22.3±19.0	28.0±5.0	5.5±1.4	2.4±0.1	0.7±0.0	2.3±0.6
S-2	H	6.2±0.2	2.7±0.6	36.7±4.4	25.7±4.7	37.7±0.6	3.7±0.7	2.5±0.4	0.5±0.1	7.0±3.5
	M	6.0±0.2	3.5±0.7	41.5±4.5	19.2±1.8	39.3±3.5	4.1±1.3	3.0±0.9	0.4±0.0	9.7±2.9
	L	5.9±0.3	3.5±0.5	41.6±11.6	18.7±3.7	39.7±10.2	3.3±0.6	2.5±1.0	0.4±0.1	7.3±2.1
S-3	H	6.0±0.0	2.6±0.1	61.9±1.1	18.1±2.8	20.0±1.7	1.4±0.3	0.3±0.0	0.4±0.1	3.7±1.2
	M	6.6±0.1	1.4±0.1	48.4±1.9	33.3±1.1	18.3±1.2	1.1±0.0	0.6±0.0	0.4±0.1	1.7±0.6
	L	6.4±0.0	1.2±0.0	78.1±0.4	7.9±1.4	14.0±1.0	4.2±0.3	0.8±0.1	0.4±0.0	5.3±0.6
CW-1	H	6.2±0.4	2.8±0.6	51.9±2.4	18.7±3.0	29.3±3.1	3.5±0.7	0.8±0.1	0.6±0.2	1.3±0.6
	M	6.5±0.3	2.3±0.6	53.1±3.6	20.9±1.2	26.0±3.0	3.8±0.8	0.9±0.2	0.7±0.2	1.0±0.0
	L	6.6±0.3	2.2±0.7	50.8±1.6	21.2±1.3	28.0±2.6	3.2±0.6	0.8±0.2	0.5±0.1	1.3±0.6
CW-2	H	6.2±0.3	3.0±0.3	27.0±2.4	45.3±6.2	27.7±3.8	7.5±0.9	1.3±0.2	0.7±0.1	1.3±0.6
	M	6.0±0.2	3.3±0.3	23.8±7.2	48.5±10.1	27.7±3.8	10.1±6.6	1.5±0.6	0.6±0.1	2.0±0.0
	L	6.2±0.3	2.5±0.3	16.7±2.6	50.3±3.1	33.0±3.6	2.7±0.8	0.9±0.2	0.7±0.1	1.0±0.0
NE-1	H	7.0±0.5	1.1±0.2	63.9±0.5	10.1±2.1	26.0±1.7	4.0±0.9	1.2±0.7	0.5±0.1	1.0±0.0
	M	6.9±0.1	1.1±0.1	65.9±3.2	9.1±5.1	25.0±2.0	6.2±3.0	1.6±0.6	0.4±0.1	1.0±0.0
	L	7.0±0.2	1.1±0.1	58.3±4.6	12.4±3.6	29.3±4.0	2.7±1.0	0.7±0.3	0.4±0.0	1.0±0.0
NE-2	H	6.5±0.3	1.1±0.3	69.5±3.0	8.5±3.0	22.0±4.4	8.4±0.2	2.3±0.5	0.4±0.0	2.7±2.9
	M	6.7±0.2	1.1±0.2	71.2±4.0	5.4±1.7	23.3±4.0	8.0±0.8	2.1±0.4	0.4±0.1	1.0±0.0
	L	6.6±0.1	1.1±0.0	70.5±0.4	5.8±0.8	23.7±1.2	8.1±3.5	2.2±0.4	0.4±0.1	1.0±0.0

S = Sul (campos S-1 = Carazinho, S-2 = Não-Me-Toque e S-3 = Rosário do Sul, no estado do Rio Grande do Sul); CW = Centro-Oeste (campos CW-1 = Primavera do Leste, no estado do Mato Grosso e CW-2 = Rio Verde, no estado de Goiás); NE = Nordeste (campos NE-1 = Luis Eduardo Magalhães e NE-2 = Luís Eduardo Magalhães, no estado da Bahia). H = ambiente de alto potencial produtivo; M = ambiente de médio potencial produtivo; L = ambiente de baixo potencial produtivo. ± = corresponde ao desvio padrão.

A produtividade de soja e milho (NE-2), NDVI, atividade das enzimas do solo β-glicosidase e arilsulfatase, TN, COT e MOS são demonstrados na Tabela 4. A MOS teve uma grande variação partindo de 1.4% até 4.2%, assim como COT e NT. Esses resultados foram associados aos sistemas de cultivo, textura do solo e clima de diferentes agro-



ecorreções. A  $\beta$ -glicosidase variou de 90.8 a 256.0 mg de p-nitrofenol  $\text{kg}^{-1}$  solo  $\text{h}^{-1}$  e arilsulfatase de 32.3 a 287.3 mg de p-nitrofenol  $\text{kg}^{-1}$  solo  $\text{h}^{-1}$ . Essa ampla gama nos proporcionou a oportunidade de explorar as relações dos atributos do solo, produtividade das culturas e atividade enzimática (Tabela 4).

**Tabela 4.** Produtividade de grãos de soja e milho\* próxima à amostragem de solo, índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase no solo, matéria orgânica (MOS), carbono orgânico (COT), nitrogênio total do solo (NT) e relação carbono/nitrogênio (C/N) em 0–0.10 m de profundidade em distintos ambientes de potencial produtivos (YE) em sete campos manejados sob agricultura conservacionista nas principais agro-ecorreções brasileiras.

Campo	YE	Produtividade de grãos	NDVI	$\beta$ -glicosidase	Arilsulfatase	MOS <sup>1</sup>	COT <sup>2</sup>	NT <sup>2</sup>	C/N
		( $\text{kg ha}^{-1}$ )							
S-1	H	5532 ± 1210	0.90 ± 0.02	209.8 ± 25.5	287.3 ± 8.1	3.2 ± 0.12	27.6 ± 1.97	2.36 ± 0.15	11.7 ± 0.23
	M	4514 ± 287	0.73 ± 0.05	180.0 ± 23.7	259.5 ± 2.4	2.8 ± 0.38	23.8 ± 1.83	2.06 ± 0.17	11.6 ± 0.17
	L	4582 ± 288	0.43 ± 0.10	205.2 ± 7.8	235.9 ± 2.7	2.7 ± 0.06	19.8 ± 1.15	1.71 ± 0.10	11.5 ± 0.26
S-2	H	6120 ± 106	0.88 ± 0.03	210.5 ± 18.3	253.5 ± 17.1	3.3 ± 0.00	26.5 ± 1.60	2.25 ± 0.16	11.8 ± 0.15
	M	5686 ± 733	0.74 ± 0.04	198.3 ± 27.3	240.4 ± 47.8	3.2 ± 0.32	26.7 ± 1.67	2.27 ± 0.29	11.8 ± 0.73
	L	5144 ± 268	0.31 ± 0.06	215.4 ± 10.8	249.8 ± 53.5	3.1 ± 0.25	25.4 ± 1.65	2.08 ± 0.18	12.2 ± 0.44
S-3	H	4530 ± 570	0.77 ± 0.08	213.0 ± 12.0	255.7 ± 54.8	2.7 ± 0.00	23.5 ± 0.42	2.14 ± 0.08	11.0 ± 0.37
	M	3620 ± 151	0.55 ± 0.05	183.0 ± 4.3	222.5 ± 19.8	2.3 ± 0.06	20.8 ± 0.98	1.73 ± 0.04	12.0 ± 0.27
	L	3600 ± 60	0.38 ± 0.02	119.4 ± 5.9	78.6 ± 8.6	1.7 ± 0.00	15.1 ± 1.88	1.52 ± 0.18	9.9 ± 0.13
CW-1	H	3629 ± 158	0.69 ± 0.12	162.1 ± 16.6	91.8 ± 6.2	3.3 ± 0.06	27.7 ± 1.65	1.90 ± 0.15	14.6 ± 0.28
	M	3627 ± 289	0.59 ± 0.12	136.7 ± 27.5	70.6 ± 6.7	3.1 ± 0.26	24.6 ± 1.96	1.75 ± 0.15	14.1 ± 0.11
	L	3932 ± 159	0.17 ± 0.08	130.0 ± 20.3	68.1 ± 7.8	3.1 ± 0.44	27.2 ± 1.37	1.87 ± 0.13	14.6 ± 0.40
CW-2	H	4711 ± 197	0.79 ± 0.13	207.4 ± 6.2	160.2 ± 12.2	3.9 ± 0.40	36.3 ± 5.13	2.66 ± 0.48	13.7 ± 0.63
	M	4496 ± 360	0.55 ± 0.19	233.0 ± 29.5	199.3 ± 47.6	3.8 ± 0.12	35.3 ± 4.82	2.63 ± 0.39	13.4 ± 0.20
	L	4032 ± 393	0.28 ± 0.08	256.0 ± 12.9	232.7 ± 10.6	4.2 ± 0.47	36.9 ± 4.05	2.74 ± 0.37	13.5 ± 0.33
NE-1	H	5443 ± 193	0.87 ± 0.15	157.1 ± 1.2	49.4 ± 13.1	1.3 ± 0.10	12.1 ± 0.95	1.01 ± 0.14	12.1 ± 0.80
	M	4956 ± 283	0.80 ± 0.18	140.4 ± 36.6	48.3 ± 12.9	1.7 ± 0.21	13.6 ± 2.20	1.10 ± 0.30	12.6 ± 1.56
	L	5042 ± 416	0.41 ± 0.04	112.8 ± 13.5	32.6 ± 6.8	1.5 ± 0.23	13.1 ± 3.83	0.85 ± 0.22	15.3 ± 0.73
NE-2*	H	11,333 ± 885	0.80 ± 0.03	133.3 ± 24.4	28.2 ± 3.3	1.5 ± 0.15	11.7 ± 2.45	0.89 ± 0.20	13.3 ± 0.79
	M	12,442 ± 282	0.74 ± 0.03	121.8 ± 18.5	38.2 ± 12.3	1.4 ± 0.26	11.0 ± 3.27	0.80 ± 0.22	13.6 ± 0.50
	L	12,827 ± 558	0.53 ± 0.06	90.8 ± 11.4	32.3 ± 4.9	1.4 ± 0.29	12.9 ± 2.50	0.94 ± 0.23	13.9 ± 0.78

\* Talhão cultivado com milho. S = Sul (campos S-1 = Carazinho, S-2 = Não-Me-Toque e S-3 = Rosário do Sul, no estado do Rio Grande do Sul); CW = Centro-Oeste (campos CW-1 = Primavera do Leste, no estado do Mato Grosso e CW-2 = Rio Verde, no estado de Goiás); NE = Nordeste (campos NE-1 = Luis Eduardo Magalhães e NE-2 = Luís Eduardo Magalhães, no estado da Bahia). H = ambiente de alto potencial produtivo; M = ambiente de médio potencial produtivo; L = ambiente de baixo potencial produtivo. <sup>1</sup>MOS determinada por combustão úmida através do método Walkley–Black adaptado [29];

<sup>2</sup>COT e NT determinado pelo método de combustão seca.  $\pm$  = corresponde ao desvio padrão.

### 3.2. Atributos de Solo dos Campos em Agro-Ecorreções e a Relação com a Atividade Enzimática do Solo

De acordo com a agro-ecorreção, os atributos do solo apresentaram diferenças relacionadas ao tipo de solo e manejo da fertilidade do solo (Tabela 2). A textura do solo afetou a atividade enzimática do solo nas agro-ecorreções Sul e Centro-Oeste, mas não no Nordeste (Tabela 5). De modo geral, nas agro-ecorreções Sul e Centro-Oeste o aumento do teor de areia esteve associado, como esperado, à diminuição da atividade enzimática. Por outro lado, no Nordeste, onde os solos apresentavam altos teores de areia e havia estreita variação na textura do solo (Tabela 3), isso não foi observado. A textura do solo influenciou na estrutura, CTC, teor de SOM, temperatura do solo e capacidade de retenção de água que afetam a atividade biológica no solo. Normalmente, espera-se que solos argilosos tenham maior biomassa microbiana e atividade enzimática do que solos arenosos sob condições climáticas e de manejo semelhantes.

**Tabela 5.** Correlações de Pearson da  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase com a matéria orgânica (MOS), nitrogênio total (NT), textura, capacidade de troca catiônica (CTC) e teores de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) do solo dos campos nas agro-ecorregiões.

		Campos nas Agro-Ecorregiões	MOS <sup>1</sup> (%)	NT <sup>2</sup> (Mg ha <sup>-1</sup> )	Areia	Silte (%)	Argila	CTC (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Ca <sup>2+</sup>
$\beta$ -glicosidase (mg p-nitrophenol kg <sup>-1</sup> soil h <sup>-1</sup> )		Sul	0.78 **	0.72 **	-0.61 **	0.39 *	0.48 *	0.49 *	0.35 ns
		Centro-Oeste	0.83 **	0.80 **	-0.91 **	0.85 **	0.43 ns	0.58 *	0.56 *
		Nordeste	0.67 **	0.36 ns	-0.07 ns	0.24 ns	-0.13 ns	0.31 ns	0.20 ns
		Média	0.77 **	0.81 **	-0.76 **	0.70 **	0.41 **	0.67 **	0.59 **
Arilsulfatase (mg p-nitrophenol kg <sup>-1</sup> soil h <sup>-1</sup> )		Sul	0.79 **	0.70 **	-0.72 **	0.35 ns	0.67 **	0.55 **	0.38 ns
		Centro-Oeste	0.80 **	0.74 **	-0.89 **	0.82 **	0.47 *	0.51 *	0.53 *
		Nordeste	-0.13 ns	0.19 ns	-0.08 ns	-0.06 ns	0.18 ns	-0.14 ns	-0.18 ns
		Média	0.65 **	0.73 **	-0.64 **	0.49 **	0.53 **	0.82 **	0.72 **
MOS		Sul	-	0.89 **	-0.78 **	0.24 ns	0.84 **	0.37 ns	0.13 ns
		Centro-Oeste	-	0.92 **	-0.83 **	0.81 **	0.26 ns	0.72 **	0.75 **
		Nordeste	-	0.61 **	-0.29 ns	0.30 ns	0.13 ns	0.54 *	0.38 ns
		Média	-	0.95 **	-0.86 **	0.78 **	0.49 **	0.61 **	0.46 **

<sup>1</sup> MOS determinada por oxidação úmida através do método Walkley–Black adaptado [29]; <sup>2</sup> NT determinado pelo método de combustão seca. Códigos de significância: \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ ; ns = não significante;  $n = 63$ .

Ji et al. [34] relataram que a população de actinomicetos e fungos em solo argiloso foi 151% e 43% maior do que em solo franco. Os autores associaram esse resultado a partículas finas de argila que contêm maior teor de água e MOS em comparação a partículas de areia e silte. Elliot et al. e Alvarez et al. [35,36] destacaram o efeito protetor da argila sobre o microbioma. Em nosso estudo, o teor de argila teve relação com  $\beta$ -glicosidase nos campos Sul, e com arilsulfatase, nos campos do Sul e Centro-Oeste (Tabela 5).

A CTC teve efeito positivo sobre a atividade enzimática nos campos do Sul e Centro-Oeste. Em solos tropicais, a CTC é dependente da mineralogia argilosa e principalmente do teor de SOM. Soares et al. e Bayer et al. [37,38] relataram que os Latossolos, que são altamente intemperizados, tiveram cerca de 80% de sua CTC associada ao teor de SOM. A interação entre a MOS e os minerais argilosos (ou seja, complexos organominerais) aumenta a agregação do solo e protege fisicamente a MOS da degradação microbiana. Ferreira et al. e Xu et al. [39,40] relataram que CTC e saturação por bases (V) foram determinantes do conteúdo de MOS em solos tropicais sob AC. Esses resultados indicam que o manejo de nutrientes desempenha um papel importante na restauração da MOS em Latossolos distróficos tropicais.

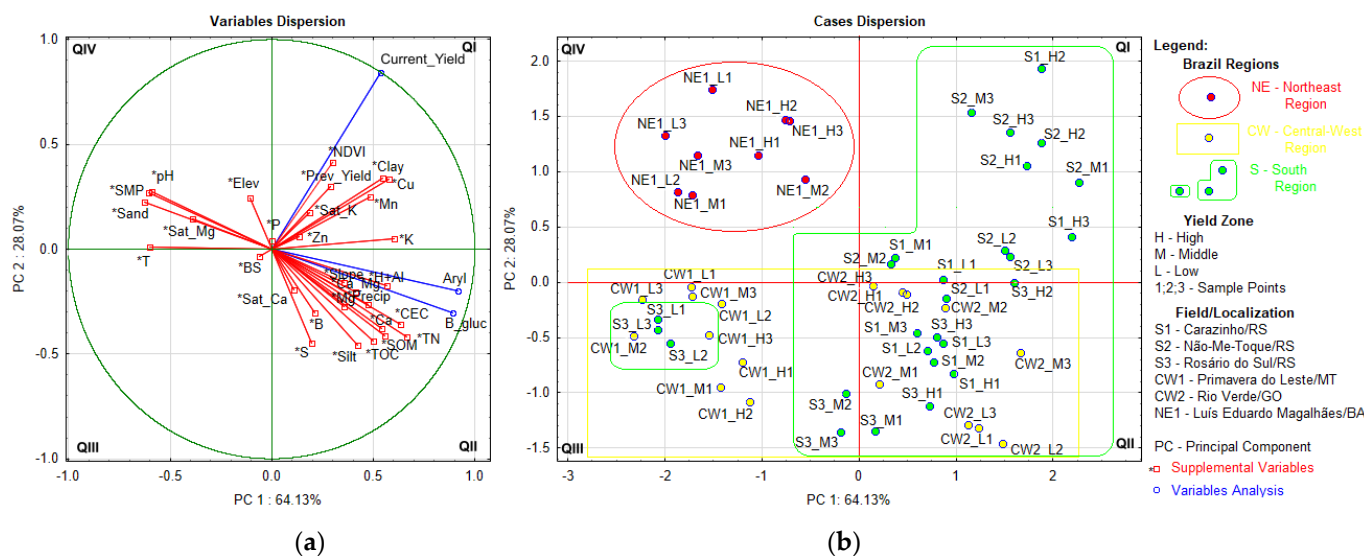
Em nosso estudo, o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  teve relação positiva com a atividade enzimática nos campos do Centro-Oeste (Tabela 5). Além disso, na média de todos os campos, o  $\text{Ca}^{2+}$  teve relações com a atividade da enzima  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase de 0.59 e 0.72 ( $p < 0.01$ ), respectivamente (Tabela 4). Nos campos do Sul, não houve relação significativa com o teor de  $\text{Ca}^{2+}$ . Este resultado pode ser explicado da seguinte forma: Nos campos Centro-Oeste o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  ficou na faixa de 3.3 a 5.7 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. Nesta faixa, o desempenho das culturas tem uma alta probabilidade de aumentar com mais entrada de  $\text{Ca}^{2+}$ . Nos campos do Sul, a maioria dos valores de teor de  $\text{Ca}^{2+}$  já era superior a 5.5 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, de modo que a probabilidade de aumento do rendimento das culturas com mais entrada de  $\text{Ca}^{2+}$  é baixa. Por outro lado, nos campos da região Nordeste, a maioria dos valores de teor de  $\text{Ca}^{2+}$  foram baixos, em uma faixa estreita de 2.4 a 3.2 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, o que poderia explicar a falta de uma relação clara (Tabela 2). Anteriormente, Pires et al. [7] relataram que o  $\text{Ca}^{2+}$  foi um driver da  $\beta$ -glicosidase em um experimento de AC de longo prazo no sul do Brasil. O  $\text{Ca}^{2+}$  serve como constituinte das paredes e membranas celulares das plantas e pode atuar como uma barreira física contra patógenos [41]. Supõe-se que uma planta saudável forneça maiores quantidades de exsudatos para alimentar a biota do solo. Além disso, o  $\text{Ca}^{2+}$

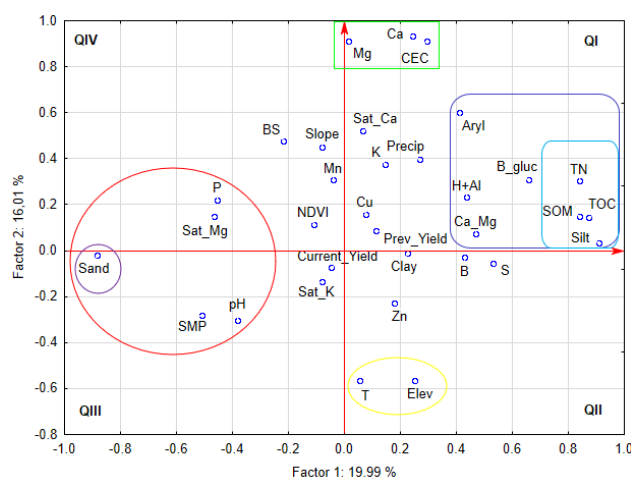
umenta o crescimento radicular, principalmente das raízes mais finas que são muito ativas no fornecimento de exsudatos para a comunidade microbiana da rizosfera. Finalmente, o  $Ca^{2+}$  é importante para a agregação do solo e estabilização da MOS sob AC [39] e o aumento do teor de  $Ca^{2+}$  no subsolo diminui a toxicidade do  $Al^{3+}$  [42] estimulando o crescimento das raízes das plantas e, conseqüentemente, a atividade microbiana.

A MOS apresentou relação mais forte com a atividade enzimática nos campos do Sul e Centro-Oeste com valores de  $r$  de 0.78 a 0.83 ( $p < 0,01$ ) (Tabela 5). Nos campos do Nordeste a MOS teve relação com a  $\beta$ -glicosidase, mas não com a arilsulfatase. Além disso, nesta agro-ecorregião o único atributo do solo que teve relação com a atividade da  $\beta$ -glicosidase foi a MOS. A relação da atividade da enzima  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase com COT foi previamente relatada por Mankolo et al. [43] em campos de algodão do Alabama (EUA), com valores de  $r$  de 0.58 e 0.66, respectivamente, e com TN, com valores de  $r$  de 0.39 e 0.48, respectivamente. Esses autores destacam que as enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase foram bioindicadores eficientes na detecção de alterações nos sistemas de preparo do solo (AC comparado ao preparo convencional). Os solos arenosos do Alabama nesse estudo tinham uma textura de solo semelhante à dos solos dos campos do Centro-Oeste em nosso estudo (Tabela 5).

Em nosso estudo, o NT apresentou relações de 0.94, 0.81 e 0.73 ( $p < 0.01$ ) com a MOS, as enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase, respectivamente (Tabela 5). Esses valores de relação  $r$  são superiores aos relatados por Mankolo et al. [43]. Em nosso estudo, a menor relação entre NT e MOS com a atividade enzimática ocorreu nos campos do Nordeste, onde apenas a  $\beta$ -glicosidase teve relação significativa com a MOS. Esse resultado pode estar associado à menor labilidade da MOS dos campos desta agro-ecorregião, que apresentaram maior relação C/N (12.0 a 15.4) em relação aos campos das outras agro-ecorregiões, como o Sul que teve menor C/N (9.9 a 12.2 ) (Tabela 4).

Na análise de ACP, os dois componentes principais explicaram 92.2% da variância dos dados de atividade enzimática, atributos físicos e químicos do solo, altitude, precipitação, temperatura, NDVI e produtividade da cultura (Figura 2a). Os atributos que se relacionaram positivamente com a atividade enzimática foram MOS, COT, NT, CTC, teor de  $Ca^{2+}$ , relação  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  e  $H + Al^{3+}$ . Por outro lado, no quadrante oposto (QIV), teor de areia, pH do solo em água, índice de pH SMP, temperatura e saturação de  $Mg^{2+}$  foram negativamente relacionados à atividade enzimática (Figura 2a,b). Em relação à produtividade da soja, os principais fatores determinantes foram NDVI, produtividade obtida em safras anteriores, teor de argila e teor de micronutrientes  $Cu^{2+}$  e  $Mn^{2+}$ . De modo geral, foi possível notar que um maior número de atributos esteve associado à atividade enzimática (QII Figura 2a). Este resultado confirma que a atividade enzimática é um bioindicador ambiental sensível.





(c)

**Figura 2.** (a) Projeção da dispersão das variáveis (b) e dos casos pela análise de componentes principais (ACP), entre atributos do solo, altitude, clima e produtividade das culturas em campos sob AC nas principais agro-ecorregiões brasileiras. Atividades das enzimas  $\beta$ -glicosidase (B\_gluc) and arilsulfatase (Aryl) e produtividade de grãos da cultura da soja (Current\_Yield) da safra 2020/21 foram considerados como as variáveis principais na análise. As variáveis suplementares (\*) foram: produtividade relativa dos anos anteriores (Prev\_yield); areia; silte; argila; nitrogênio total (NT); carbono orgânico total (COT); potencial de hidrogênio (pH); índice SMP (SMP); fósforo (P); potássio (K); matéria orgânica do solo (MOS); cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ); magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ); capacidade de troca catiônica (CTC); acidez pontencial (H+Al); saturação por bases (V); enxofre (S); zinco ( $\text{Zn}^{2+}$ ); cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ); boro (B); manganês (Mn); relação cálcio/magnésio (Ca\_Mg); saturação de cálcio (Sat\_Ca); saturação de magnésio (Sat\_Mg); saturação de potássio (Sat\_K); temperatura anual média do ar (T); precipitação anual (Precip); declividade (slope); elevação (Elev); índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI); (c) dispersão das variáveis, de acordo com a sua contribuição para a formação dos Fatores 1 e 2;  $n = 54$ .

A temperatura anual média do ar ficou posicionada no quadrante oposto (QIV Figura 2a) à atividade enzimática (QII Figura 2a). A alta temperatura típica do ambiente tropical aumentou a taxa de oxidação biológica da MOS e reduziu seu estoque, principalmente a fração lábil, que é o principal substrato para a biota do solo. Por outro lado, a precipitação média anual foi posicionada no mesmo quadrante da atividade enzimática (QII Figura 2a). A alta precipitação pode estar associada a uma alta taxa de fotossíntese e alto aporte de resíduos vegetais resultando em maior teor de MOS e atividade enzimática. Além disso, a microbiota está positivamente relacionada ao aumento da umidade do solo até atingir um limite máximo [39].

O case de dispersão é demonstrado na Figura 2b, onde o campo da agro-ecorregião Nordeste foi posicionado no quadrante QIV, estando em posição distinta em relação aos demais campos. Os campos do Nordeste apresentam algumas características específicas que podem explicar esse fato, como maior temperatura do ar, menor precipitação anual (Tabela 1), maior teor de areia, menor teor de MOS, maior pH do solo em água e índice pH SMP e uma menor relação  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  (Tabela 2) em relação aos demais campos. Em geral, os campos do Sul e o campo CW-2 foram posicionados nos mesmos quadrantes (QI e QII). Esses campos possuem características de clima e solo distintas de acordo com as agro-ecorregiões em que estão localizados, porém têm em comum o fato de que os sistemas de AC de alta qualidade têm melhorado gradativamente a qualidade do solo a partir do aumento do aporte de resíduos da cultura pelo uso de culturas de cobertura (ou seja, consórcio de culturas de cobertura no campo da agro-ecorregião do Sul) e pastagens tropicais com sistemas de raízes profundas (por exemplo, *Brachiaria* spp. em uso único ou em combinação com milho na agro-eco-região Centro-Oeste). Além disso, houve melhora na qualidade química do subsolo pelo aumento de  $\text{Ca}^{2+}$  e diminuição de  $\text{Al}^{3+}$  e manejo da fertilidade do solo em sítio específico por meio da agricultura de precisão, fazendo com que esses campos fossem agrupados nos mesmos quadrantes na ACP.

O campo CW-1 foi posicionado em um quadrante diferentemente a maioria dos outros campos (QIII Figura 2). O campo CW-1 apresentou maior teor de areia (Tabela 2), menor teor de MOS (Tabela 3) e menor elevação (Tabela 1) em relação ao campo CW-2, ajudando a explicar que, embora ambos os locais estivessem na agro-ecorregião Centro-Oeste, eles foram posicionados em diferentes quadrantes. A agro-ecorregião S-3 (município de Rosário do Sul) apresentou solo de textura arenosa, menor altitude, menor precipitação e maior temperatura de verão (Tabela 1) que resultou em menor teor de MOS (Tabela 4) em relação aos campos S-1 e S-2 (municípios de Carazinho e Não-Me-Toque, respectivamente). O LYE do campo S-3 foi posicionado no mesmo quadrante do campo CW-1 (QIII). Em geral, a maioria dos pontos referentes ao MYE e HYE dos campos S-1 e S-2 foram posicionados no quadrante QI que foi associado a alta produtividade da cultura na ACP (QI Figura 2a). A maioria dos pontos referentes ao MYE e LYE dos campos S-1, S-2 e CW-2 foram posicionados no quadrante QIII, pelo qual foi associado à atividade enzimática na análise de ACP (QII).

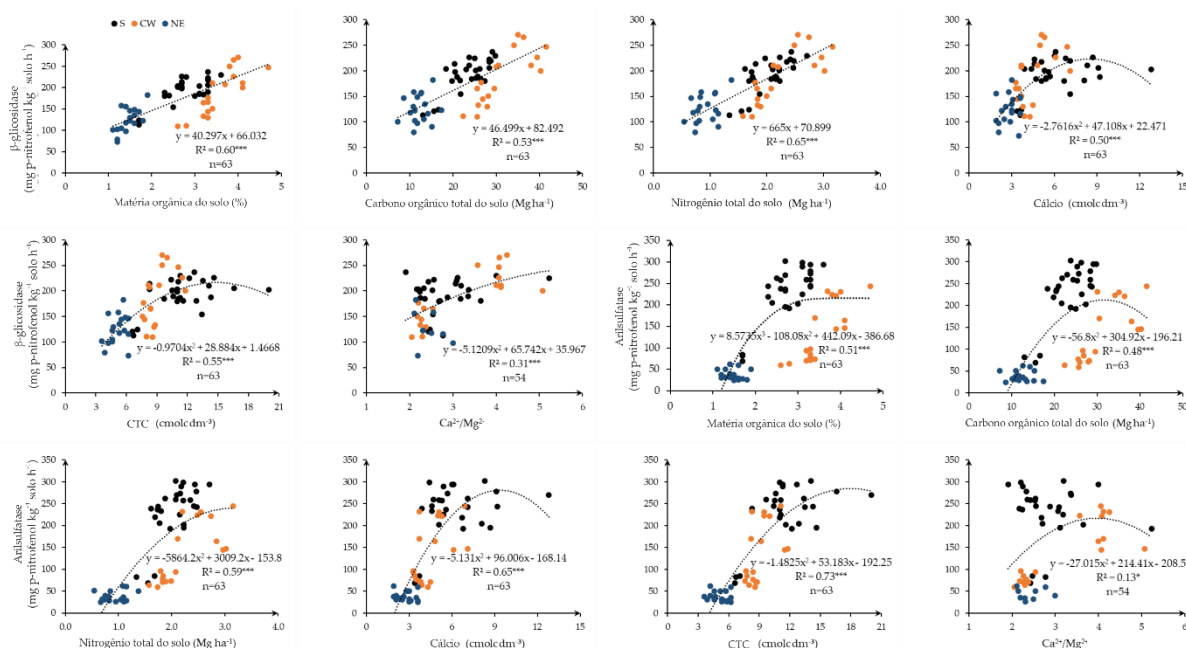
Curiosamente, mesmo os campos com atributos de solo muito distintos, como textura do solo e clima, como subtropical (S-3) e tropical (CW-1), foram agrupados em relação ao desempenho da cultura e atividade enzimática (campos do S e CW-2 no quadrante QII e S-3 LYE e CW-1 no quadrante QIII). Isso sugere que o manejo do solo teve um forte efeito no desempenho da cultura e na atividade enzimática, independentemente do clima e da textura do solo. Esse resultado sugere que, com práticas de manejo regionais adequadas sob AC, é possível alcançar um alto desempenho das culturas e saúde do solo, avaliado pela atividade enzimática em uma ampla gama de tipos de solo e climas. O caso do campo S-3 é particularmente interessante, no LYE esteve mais próximo do campo CW-1 (QIII), já no MYE esteve mais próximo do campo CW-2 (porção baixa do QII) e, finalmente, em HYE esteve mais próximo dos campos S-1 e S-2 em MYE ou LYE e com o campo CW-2 em HYE (posição alta do quadrante QII). Em ordem decrescente de desempenho das culturas e atividade enzimática, observamos: S-1 > S-2 > S-3 > CW-2 > CW-1 > NE-1. É importante destacar que o campo S1 recebeu prêmios nacionais Du Pont por alta produtividade de soja (5668 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2015) (<https://revistacultivar.com.br/noticias/duPont-do-brasil-reconhece-desempenho-de-sojicultores-da-regiao-sul>, acesso em 20 de outubro de 2021) e na safra 2016/17 a produtividade de milho neste campo atingiu 14,700 kg ha<sup>-1</sup>. Esses casos demonstram que o manejo da AC foi uma ferramenta que proporcionou maiores produtividades das culturas e com a vida do solo melhorada com base na atividade enzimática e restauração do teor de MOS (Tabela 4).

Os atributos do solo e do clima na ACP são demonstrados na Figura 2c. No primeiro quadrante (QI), a arilsulfatase e a  $\beta$ -glicosidase foram agrupadas, como esperado, com SOM, COT, NT e teor de silte (Tabela 3) e relação Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> (Tabela 2). Além disso, os teores de CTC, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> e saturação de Ca<sup>2+</sup>, precipitação anual, teores de K<sup>+</sup> e Cu<sup>2+</sup> e produtividades de safras anteriores foram posicionados no QI, ou seja, o mesmo quadrante de alto desempenho da cultura (Figura 2a). Em posição oposta a estes atributos, foram agrupados o teor de areia, saturação de Mg<sup>2+</sup>, pH do solo em água e pH SMP (QIII e QIV, Figura 2c). Ressalta-se que na agro-ecorregião NE-1 o pH do solo em água foi maior do que em outros campos das demais agro-ecorregiões (Tabela 3), justificando em parte a presença deste atributo. Enquanto a saturação de Mg<sup>2+</sup> esteve associada a desequilíbrios na relação Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup>. Por outro lado, o teor de P que apresentou valores na faixa de 18.4 a 76.7 mg dm<sup>-3</sup>, mostrando que alguns campos apresentaram teor de P muito alto, concentrado em uma camada específica do solo (0-0.10 m), onde um teor próximo a 15 mg dm<sup>-3</sup> pode ser o nível crítico da cultura (Tabela 2).

A temperatura e altitude (QII, Figura 2c) também foram agrupadas em posição distante dos promotores de desempenho da cultura, confirmando que a alta temperatura no ambiente tropical foi um importante fator de estresse abiótico da planta.

A Figura 3 mostra a relação dos principais atributos do solo com  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase. Esta figura demonstra que o conteúdo de MOS na profundidade de 0-0.10 m teve uma relação linear positiva com a  $\beta$ -glicosidase que explicou cerca de 60% da

variabilidade da atividade desta enzima. A atividade enzimática máxima foi alcançada com o maior teor de MOS (próximo a 5%). A arilsulfatase apresentou relação quadrática com a MOS, com atividade máxima próxima a 3.55%. Xu et al. [40] relataram que a MOS e NT tiveram uma relação positiva de 0.83 com a atividade enzimática. Os autores explicaram que os microrganismos necessitam de nutrientes e energia das frações lábeis da MOS. Além disso, a MOS retém a umidade do solo e aumenta a CTC e a agregação do solo, o que aumenta a atividade microbiana. Em nosso estudo, a NT teve uma relação linear positiva com a  $\beta$ -glicosidase, sugerindo que as culturas de cobertura, como leguminosas, podem ser uma estratégia importante para restaurar os estoques de NT e aumentar a atividade biológica do solo [38].



**Figura 3.** Relações entre a atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase com a matéria orgânica do solo (MOS) determinada por oxidação úmida, carbono orgânico (COT) e nitrogênio total (NT) determinado por combustão seca, teor de cálcio (Ca<sup>2+</sup>), capacidade de troca catiônica (CTC) e relação Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> em sete campos das principais agro-ecorregiões brasileiras. Códigos de significância: \*\*\*  $p < 0.001$ ; \*  $p < 0.05$ .

Um estudo exploratório recente de análises de solo de laboratórios do Sul do Brasil ( $n = 35.362$ ), relatou que 55% das amostras de solo apresentavam MOS  $< 2.5\%$  [44]. Em nosso estudo, com um banco de dados mais limitado, encontramos cerca de 40% dos pontos amostrados com MOS baixa ( $< 2.5\%$ ) associados à baixa atividade enzimática (Figura 3). Esses dados sugerem uma necessidade urgente de revisar o sistema de cultivo adotado, aumentando as rotações e o uso de plantas de cobertura de leguminosas em associação com o plantio direto para incrementar a MOS [45].

A restauração da MOS e a atividade enzimática estão fortemente ligadas aos princípios da AC. Pires et al. [7] relataram em um experimento de sistemas de manejo de longo prazo (32 anos), que a rotação de culturas e plantas de cobertura sob AC aumentaram a MOS no solo superficial em comparação a solos cultivados intensivamente. Além disso, a diversificação de culturas aumentou a diversidade microbiana do solo, resultando em maior estabilidade de agregados e proteção da MOS. Em seu estudo, a atividade da  $\beta$ -glicosidase foi 69% maior em AC do que em sistemas baseados no preparo do solo. Além disso, a  $\beta$ -glicosidase foi aumentada em 23% sob AC com rotação de culturas em comparação com sistemas de monocultivo em plantio direto. A prevenção da perturbação mecânica do solo estimula o crescimento de fungos e suas redes de hifas, o que permite que os fungos estabeleçam pontes na interface do solo-resíduos, aumentando a estabilização da MOS. Além disso, o efeito de manter a cobertura morta na superfície do

solo durante o ano todo na faixa de 3 a 5 Mg ha<sup>-1</sup>, reduz a temperatura do solo e aumenta a umidade do solo, o que estimula a atividade benéfica dos fungos e equilibra a relação fungos/bactérias (F/B) [46]. Geralmente, a comunidade de fungos é mais sensível à perturbação do solo e à quantidade e qualidade de exsudatos radiculares e resíduos de culturas [47]. Portanto, esta comunidade pode ser impulsionada por policultivos de culturas de cobertura, incluindo leguminosas e a rotação de culturas [48,49].

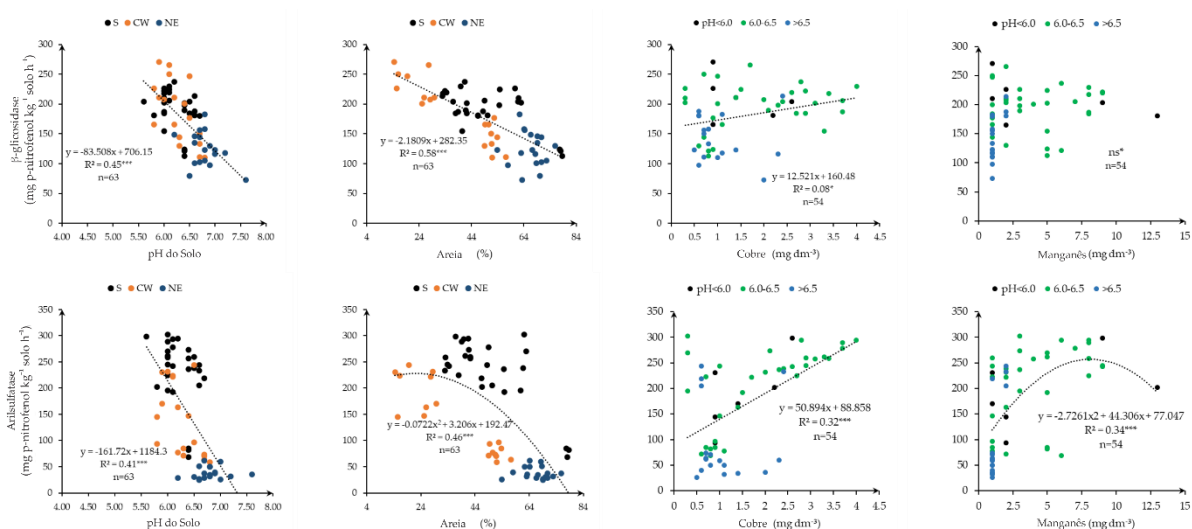
O teor de Ca<sup>2+</sup> teve uma relação quadrática com a β-glicosidase atingindo um platô próximo a 8 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> que é o dobro do nível crítico de Ca<sup>2+</sup> sugerido para a maioria das culturas (4 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>). A CTC apresentou uma relação quadrática com a β-glicosidase atingindo o platô próximo a 14 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>. A relação Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> também teve uma relação quadrática com a β-glicosidase sugerindo que uma relação de 3-5 poderia aumentar a atividade dessa enzima. Os campos com Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> abaixo de 3 e saturação de Mg<sup>2+</sup> superior a 20% foram associados ao aporte de longa duração de calcário dolomítico [42] e monocultivo de soja que teve maior exportação via grãos de Ca<sup>2+</sup> do que Mg<sup>2+</sup> [50].

Dalla Nora e Amado [51] relataram que os teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> são impulsionadores do crescimento radicular em solos tropicais ácidos, permitindo às raízes o acesso à água disponível no subsolo. O efeito positivo do Ca<sup>2+</sup> na divisão celular radicular resulta em maior crescimento radicular, o que é importante para a restauração do teor de MOS e melhorias na agregação do solo, além de aumentar os exsudatos radiculares que estimulam a biota do solo e a atividade enzimática [39].

A arilsulfatase apresentou relação quadrática com SOM, COT e TN, apresentando menor sensibilidade a esses atributos do que a β-glicosidase que apresentou relação linear com tais atributos. A arilsulfatase apresentou relação quadrática com o teor de Ca<sup>2+</sup>, mas com maior sensibilidade ao baixo teor de Ca<sup>2+</sup> em relação a β-glicosidase (Figura 3). Uma tendência semelhante foi observada com CTC, onde a arilsulfatase foi mais sensível que a β-glicosidase a valores baixos de CTC. A relação Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> foi mais crítica para a β-glicosidase do que para a arilsulfatase, embora ambas tenham relações quadráticas.

O teor de P foi agrupado com outros atributos contrários à produtividade da cultura e à atividade enzimática (Figura 2c). Este comportamento não era esperado em solos tropicais intemperizados e com alta capacidade de retenção de P. No entanto, altas taxas de adubação fosfatada a longo prazo e com altas concentrações na mesma profundidade podem resultar em uma forte estratificação vertical de nutrientes, devido à baixa mobilidade do P no solo [52,53] com um impacto negativo no aprofundamento radicular da soja e na produtividade de grãos sob estresse hídrico [54]. Isso ocorre porque há um forte estímulo ao crescimento radicular raso em zonas de alta concentração de P em detrimento do aprofundamento do sistema radicular através do perfil do solo (Tabela 2). Estudos anteriores com o objetivo de avaliar a relação entre o teor de P do solo e a biota do solo revelaram que o alto teor de P estava associado à redução na diversidade da biota, principalmente fungos micorrízicos [55-57]. Além disso, a adubação excessiva de P pode agravar a deficiência de Zn<sup>2+</sup> e Cu<sup>2+</sup>, conforme observado neste estudo na Figura 4 e na análise de ACP (Figura 2c).

A Figura 4 demonstra a relação do pH do solo em água e teores de areia com a atividade enzimática, onde foi encontrada uma relação linear negativa. A relação negativa do pH do solo em água com a atividade enzimática em solos tropicais e subtropicais ácidos não era esperada, mas foi associada aos valores de pH do solo em água relatados em nosso estudo (Tabela 2). A faixa de pH do solo em água foi de 5,9 (±0,3) a 7,0 (±0,5) com um número elevado de pontos de amostragem com pH do solo em água superior a 6,0, o que poderia explicar a relação negativa encontrada. Na Tabela 2, apenas 9,5% dos pontos de amostragem estavam com pH do solo em água abaixo de 6,0, onde era esperada uma relação positiva entre o pH do solo em água e a atividade enzimática. Por outro lado, 46,0% apresentaram valores de pH do solo em água superiores a 6,5 onde a probabilidade de resposta da produtividade da cultura com calcário era muito baixa.



**Figura 4.** Relações entre a atividade das enzimas β-glicosidase e arilsulfatase com pH do solo, teor de areia, cobre (Cu<sup>2+</sup>) e manganês (Mn<sup>2+</sup>) em sete campos das principais agro-ecorreções brasileiras. Códigos de significância: \*\*\*  $p < 0.001$ ; \*  $p < 0.05$ ; ns\* = não significativo.

Embora ambas as enzimas investigadas tenham uma relação linear negativa com o elevado pH do solo em água, o coeficiente linear da arilsulfatase foi quase o dobro da β-glicosidase, sugerindo que a primeira foi mais sensível à mudança do pH do solo em água. No entanto, valores de pH do solo em água superiores a 6.5 em solos tropicais ácidos foram prejudiciais à atividade enzimática. Em condições naturais, esses solos geralmente têm um pH em água abaixo de 5.0 [58]. Embora o microbioma tenha mecanismos para se ajustar a mudanças ambientais abruptas de um pH ácido do solo em água para níveis muito mais altos em relação a condição natural, isso pode causar quebras na estrutura helicoidal do DNA e aumento na hidrólise de lipídios em microrganismos [59-61].

Stark et al. [62], em ecossistemas de tundra, relataram que um aumento no pH do solo em água de 5.6 para 6.6 resultou em maior disponibilidade de nutrientes para as plantas, o que, por sua vez, aumentou a atividade enzimática, principalmente a β-glicosidase. No entanto, quando o pH do solo na água foi aumentado acima de 6.6, houve diminuição da atividade enzimática conforme relatado em nosso estudo. No entanto, há alguma incerteza se isso foi um efeito direto na microbiota ou no substrato orgânico disponível. Em nosso estudo, a faixa ótima de pH para a atividade enzimática estava na faixa de 5.5 a 6.5.

O campo da região Nordeste apresentou os maiores valores de pH do solo em água (Figura 2). O solo desta agro-ecorreção é arenoso e com baixo teor de MOS que resulta em uma baixa capacidade tampão. Muitos agricultores dessa agro-ecorreção vêm da agro-ecorreção Sul e estão acostumados a aplicar maiores doses de calcário, ajustadas a solos argilosos e alto teor de MOS e, conseqüentemente, a maior capacidade tampão [63]. A entrada dessas taxas nos campos do Nordeste resultou em um aumento acentuado do pH do solo em água que foi associado à baixa disponibilidade de micronutrientes metálicos, como Cu<sup>2+</sup> e Mn<sup>2+</sup> [64] (Figura 4). O teor de areia apresentou relação linear e quadrática com β-glicosidase e arilsulfatase, respectivamente. À medida que os teores de areia aumentaram, a MOS e o NT diminuíram (Tabela 5) com impacto negativo na biota do solo. Em nosso estudo foi encontrada uma relação positiva do Cu<sup>2+</sup> com a atividade de ambas as enzimas e do Mn<sup>2+</sup> com a atividade da arilsulfatase. O complexo orgânico metálico de Cu<sup>2+</sup> e Mn<sup>2+</sup> afeta a absorção de nutrientes pela planta [65] e a atividade enzimática (Figura 4). Isso está de acordo com a análise de ACP que mostrou que esses micronutrientes metálicos foram associados à produtividade das culturas em safras anteriores e com o NDVI na safra atual (Figura 2). Considerando que a baixa disponibilidade de micronutrientes metálicos foi associada ao pH do solo em água

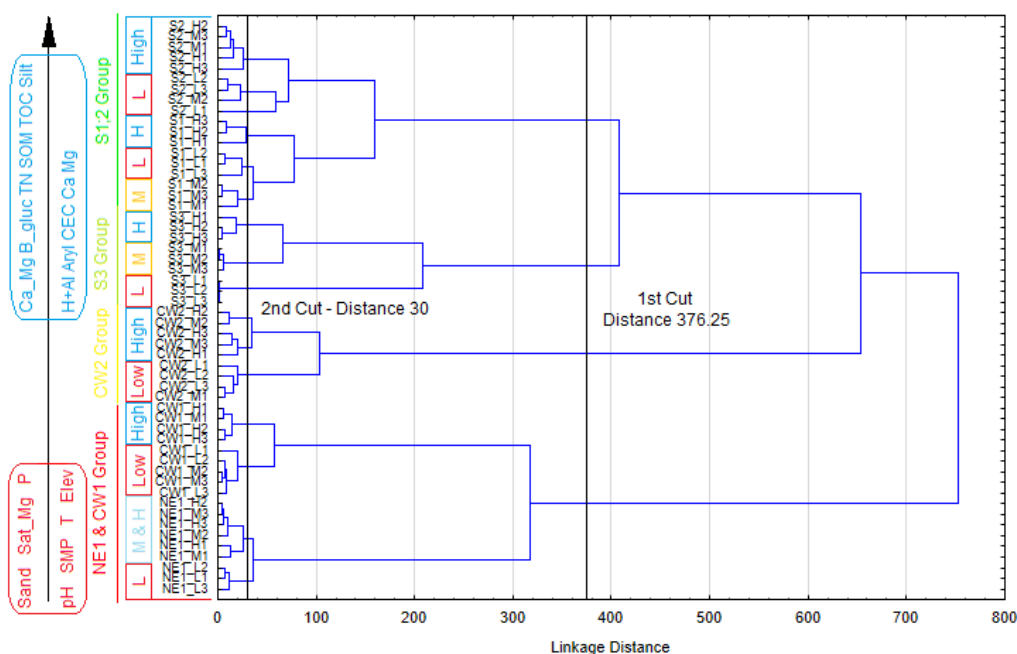


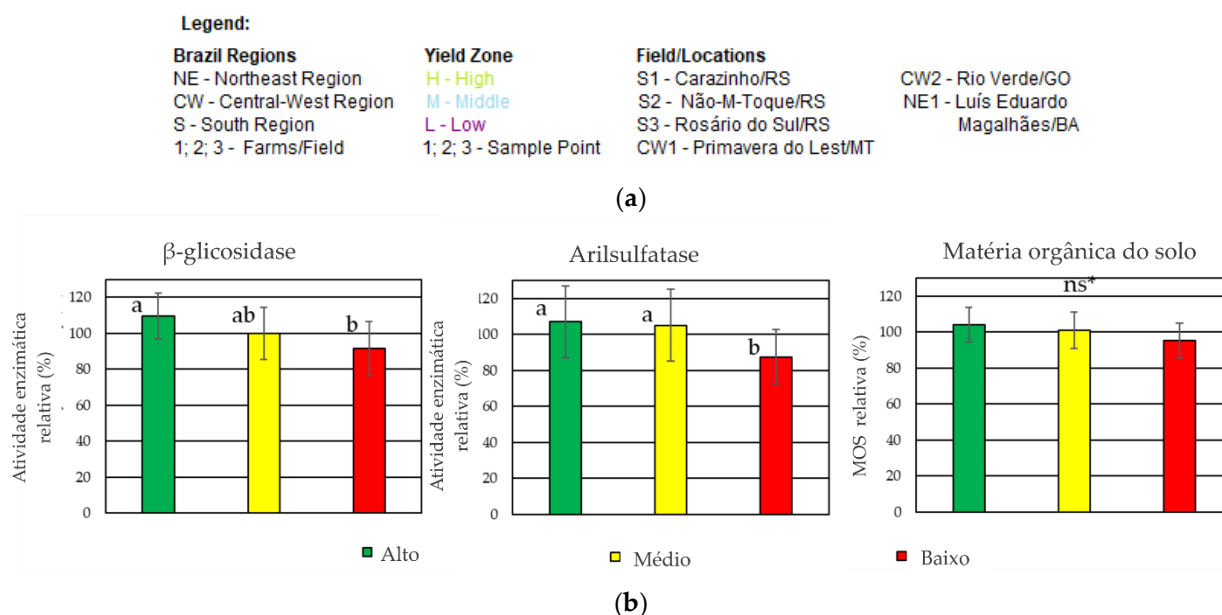
superior a 6,5, destacando que há necessidade, em solos tropicais com baixa capacidade tampão, de formular com precisão a prescrição da dose de calcário e utilizar fertilizantes com esses nutrientes para compensar sua remoção através da exportação de grãos (Figura 4).

O  $Mn^{2+}$  desempenha um papel importante nas funções metabólicas das plantas, atuando como um cofator essencial na redução do oxigênio e estimulando a maquinaria fotossintética, catalisando a divisão da água na fotossíntese [66]. Além disso,  $Cu^{2+}$  é um componente essencial de várias proteínas que atuam na fotossíntese, respiração e fitohormônios ligados à produção de pólen [64]. Portanto, os micronutrientes metálicos são essenciais para o metabolismo hormonal da planta relacionado ao desempenho da cultura, conforme observado na análise de ACP em nosso estudo (Figura 2). Sua deficiência geralmente está associada a pH elevado (Figura 4), baixo teor de MOS e solo seco [64], como verificado no campo Nordeste em nosso estudo (Tabela 2).

### 3.3. Atividade Enzimática e Biodiversidade do Solo sob Distintos Ambientes de Potencial Produtivo

A análise de clusters apresentada na Figura 5a vai de acordo com a análise ACP e fatorial demonstrada na Figura 2. Na Figura 5a há uma divisão dos dados por agroecorregiões e YEs. No primeiro corte, os campos NE-1 e CW-1 foram separados dos demais com forte influência do teor de areia, saturação de  $Mg^{2+}$ , teor de P, pH do solo em água, temperatura e altitude. Por outro lado, o campo da agroecorregião CW-2 se mostrou semelhante ao campo S-3, estando em posição intermediária. Por fim, os campos S-1 e S-2 (solos argilosos) foram afetados pela atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase, relação  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ , teor de MOS, COT, CTC, teor de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , silte e  $H + Al^{3+}$ , conforme discutido anteriormente na ACP (Figura 2). Dessa forma, quatro grupos foram construídos na Figura 5. O primeiro grupo foi associado a fatores detratores da atividade enzimática do solo e do clima, o segundo e terceiro grupos ficaram em posição intermediária e o quarto grupo foi associado a fatores promotores da atividade enzimática.





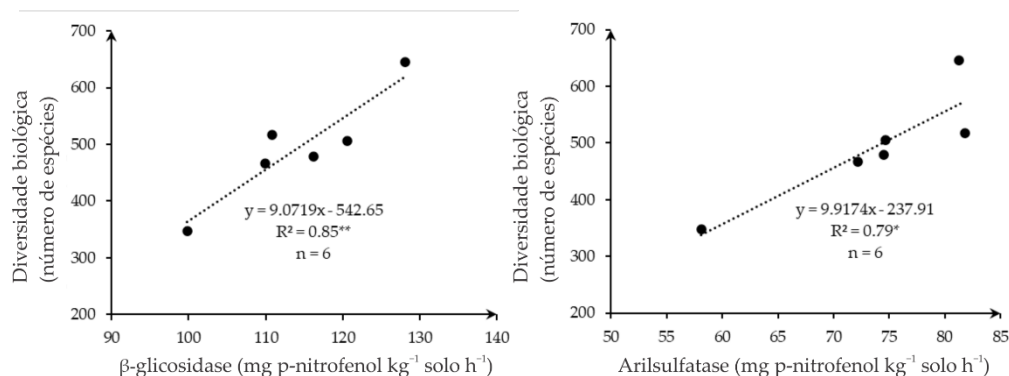
**Figura 5.** (a) Análise de clusters do agrupamento dos cases entre atributos do solo, declividade, clima e produtividade da cultura,  $n = 54$ ; (b) Atividade das enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase e teor de MOS relativo à média do campo em distintos ambientes de potencial produtivo (alto, médio e baixo) em sete campos das principais agro-ecorregiões brasileiras. Valores seguidos da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0.05$ ), ns\* = não significativo,  $n = 63$ . As barras de erro correspondem ao desvio padrão.

Na Figura 5a, os YEs dentro dos campos foram distinguidos, principalmente no segundo corte (Figura 5a). Na Figura 5b, os diferentes YEs, na média das agro-ecorregiões, foram distinguidos, o que destacou que o LYE era diferente do HYE e confirmou que o uso da agricultura de precisão foi uma ferramenta importante para o manejo em sítio específico em sistemas de AC. Lorenz et al. [67] relataram anteriormente, que a atividade da  $\beta$ -glicosidase tinha uma relação com o rendimento do milho. Em nosso estudo, o LYE apresentou menor atividade enzimática em relação ao HYE, com decréscimos de 18.0% e 19.6%, respectivamente (Figura 5b). Esses decréscimos foram superiores à diferença no teor de MOS entre esses ambientes, que foi de 8.6%, porém sem diferença estatística significativa.

Lopes et al. [19] realizaram um estudo com o objetivo de estabelecer níveis críticos para a atividade das enzimas celulase,  $\beta$ -glicosidase, arilsulfatase e fosfatase para Latossolos do Centro-Oeste brasileiro. Eles relataram que solos com altas produtividades geralmente apresentavam maior C na biomassa microbiana, respiração microbiana e alta atividade enzimática. Esses relatos estão de acordo com os resultados encontrados em nosso estudo (Figura 5b). Com base nesses níveis críticos de atividade enzimática [19], quase 70% de todo o banco de dados de nosso estudo, compreendendo 63 pontos de amostragem, foi classificado como alto nível de atividade da enzima  $\beta$ -glicosidase ( $>115$  mg p-nitrofenol  $\text{kg}^{-1}$  solo  $\text{h}^{-1}$ ) e 30 % como nível moderado de atividade enzimática (66–115 mg p-nitrofenol  $\text{kg}^{-1}$  solo  $\text{h}^{-1}$ ). Por outro lado, para a arilsulfatase os níveis de atividade da enzima foram de 55.5%, 30.2% e 14.3% correspondendo a alta ( $>90$  mg p-nitrofenol  $\text{kg}^{-1}$  solo  $\text{h}^{-1}$ ), moderada (41–90 mg p-nitrofenol  $\text{kg}^{-1}$  solo  $\text{h}^{-1}$ ) e baixa atividade ( $\leq 40$  mg p-nitrofenol  $\text{kg}^{-1}$  solo  $\text{h}^{-1}$ ), respectivamente. É importante destacar que esses níveis críticos foram propostos para a agro-ecorregião Centro-Oeste, e a extrapolação para outras agro-ecorregiões brasileiras deve ser feita com cautela [15].

Em um campo (S-2), investigamos a relação da atividade enzimática com a análise de DNA do solo (Figura 6). Houve relação linear entre as enzimas  $\beta$ -glicosidase e arilsulfatase e a diversidade da comunidade de microrganismos (gêneros de fungos, bactérias, protistas e archaea) com coeficientes de determinação de 0.85 ( $p < 0.01$ ) e 0.79 ( $p < 0.05$ ),

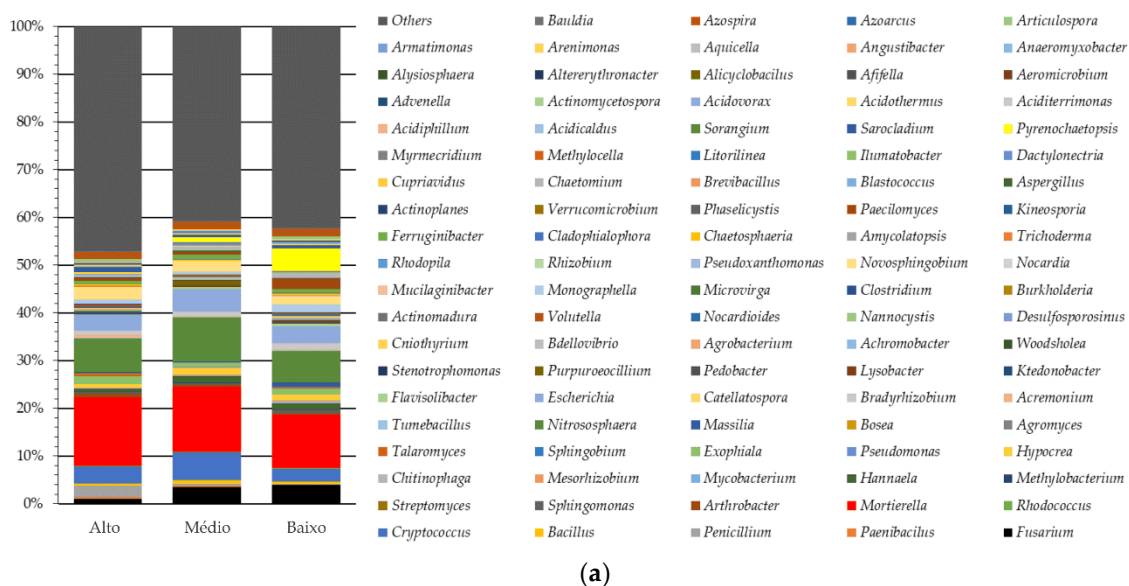
respectivamente. Esses resultados reforçam o papel da atividade enzimática como um eficiente bioindicador da saúde do solo [15].



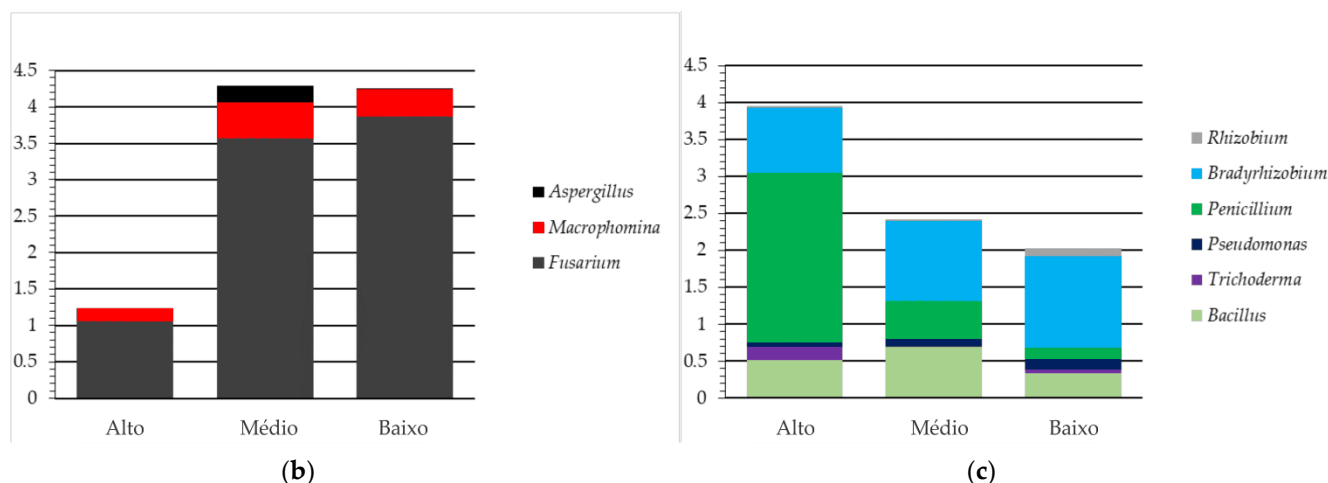
**Figura 6.** Relação entre atividade das enzimas β-glicosidase e arilsulfatase e biodiversidade avaliada por caracterização de DNA em um campo sob agricultura de conservacionista no Sul do Brasil (S-2), no município de Não-Me-Toque, RS. Códigos de significância: \*\*  $p < 0.01$ ; \*  $p < 0.05$ .

Bactérias e fungos são os principais produtores de enzimas extracelulares que conduzem o processo de degradação de compostos poliméricos complexos em compostos mais simples (oligômeros e monômeros). Os protistas (protozoários e algas simples) desempenham um papel importante nos processos de decomposição biogeoquímica do solo por bactérias que liberam nutrientes para as plantas e criam um “circuito microbiano” que é altamente dependente da qualidade dos resíduos das culturas [68-70].

A caracterização das espécies do microbioma no campo S-2 (Figura 7a) demonstrou que o HYE teve um melhor equilíbrio entre as espécies de microrganismos, onde os 100 gêneros mais abundantes na comunidade representaram 52.9% da população total. Por outro lado, no MYE e LYE, os 100 principais gêneros compreendiam 59.2% e 57.7% da população total da comunidade de microrganismos, sugerindo menor diversidade microbiana [46].



(a)



**Figura 7.** (a) Biodiversidade do solo avaliada pelo DNA através de abordagem com gráfico de barras empilhadas e proporção acumulada dos gêneros mais abundantes de microrganismos do solo classificados como (b) patógenos e (c) benéficos para o crescimento de plantas em distintos ambientes de produção sob agricultura de conservacionista no Sul do Brasil (campo S-2), Não-Me-Toque, RS, n = 6.

A abundância de espécies benéficas de microrganismos do solo é um importante indicador da saúde do solo. Em nosso estudo, o gênero *Mortierella* foi o mais abundante, representando 14.4%, 13.7% e 11.2% da população microbiana total em HYE, MYE e LYE, respectivamente (Figura 7a). Ozimek e Hanaka [71], em uma revisão de microrganismos promotores de crescimento às plantas, relataram que alguns fungos, como o gênero *Mortierella*, geralmente estão presentes em grandes quantidades na rizosfera e ajudam no crescimento das plantas em ambientes hostis, aumentando a absorção de P pelas plantas. Alguns microrganismos associados a plantas de cobertura de leguminosas podem fornecer fitohormônios como a enzima 1-aminociclopropano-1-carboxilato (ACC) deaminase, responsável pela conversão de ACC (o precursor do etileno nas plantas) em amônia e  $\alpha$ -cetobutirato, que promove o crescimento das plantas diminuindo os níveis de etileno. Esta bioenzima pode ajudar as plantas na proteção contra ataques de pragas e aumentar sua habilidade de adaptação ambiental [72].

As interações planta-microbioma na rizosfera são fatores-chave no vigor da planta e na produtividade de grãos [73]. Os principais mecanismos envolvidos estão relacionados à biodisponibilidade de nutrientes, como solubilização de fosfato, fixação biológica de N e alívio de estresse biótico e abiótico [73]. Entre os principais gêneros de organismos promotores de crescimento de plantas, estão *Bacillus* e *Pseudomonas*, conhecidos como bactérias promotoras de crescimento às plantas (BPCP) [14,73], e *Penicillium* e *Trichoderma*, conhecidos como fungos promotores de crescimento às plantas (FPCP), e biocontrole do solo promotores [14,74-76]. A fixação atmosférica de N também pode estar associada à presença de *Bradyrhizobium* e *Rhizobium* [77]. Esses microrganismos foram mais abundantes em HYE, sendo 64% e 96% mais abundantes em relação ao MYE e LYE, respectivamente (Figura 7c). Os organismos selecionados em nosso estudo foram previamente propostos por Shah et al. [5] em um artigo de revisão sobre o papel dos micróbios do solo na produção sustentável de culturas e na saúde do solo.

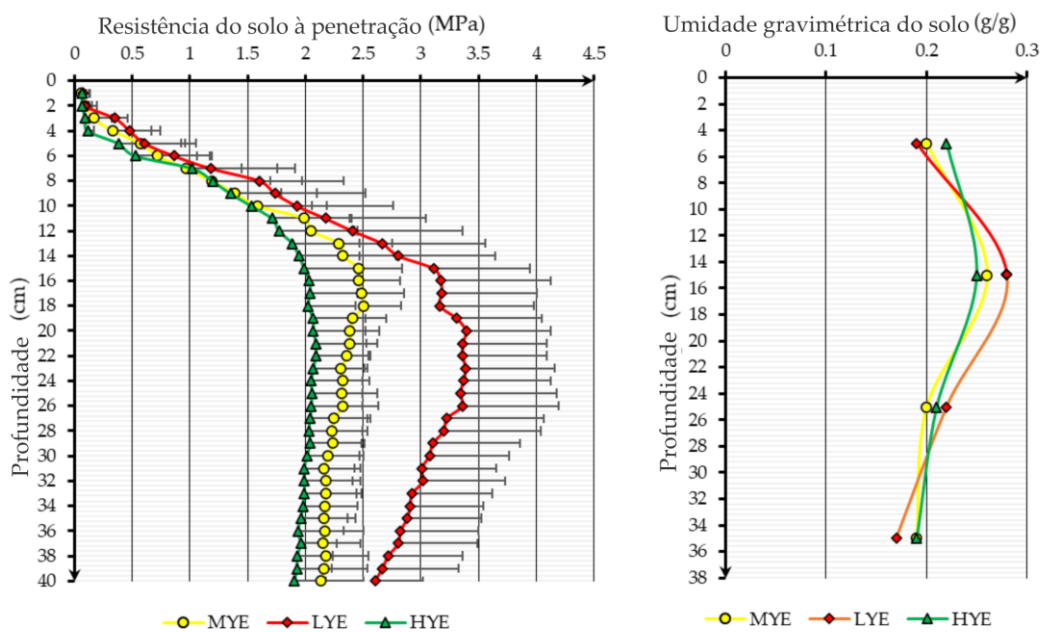
Os microrganismos fitopatogênicos mais abundantes encontrados em nosso estudo foram os gêneros *Fusarium*, *Macrophomina* e *Aspergillus*, que juntos foram cerca de 245% maiores em MYE e LYE do que em HYE (Figura 7b). Portanto, as plantas que desenvolviam-se em MYE e LYE estavam sob pressão muito maior de doenças de plantas do solo do que em HYE.

Campos de produção manejados em monocultivo de soja e sem diversificação com plantas de cobertura são mais propensos à podridão radicular de *Fusarium* [78]. Esta é uma das doenças mais importantes do solo da soja, que ocorre em muitos campos na América do Norte e do Sul [79,80]. Raízes laterais de soja com podridão radicular de

*Fusarium* podem morrer e, conseqüentemente, reduzir a absorção de nutrientes pelas plantas e a produção de exsudatos que poderiam sustentar uma biota do solo mais diversificada [81]. É importante destacar que este gênero foi o mais prevalente em LYE e MYE e foi associado a uma diminuição de organismos promotores de crescimento de plantas (Figura 7c). Ranzi et al. [80], avaliando a soja e o milho em sistemas de monocultivo, conseguiram identificar até nove espécies de *Fusarium* relacionadas à falta de diversidade de cultivos e alta compactação do solo.

Os gêneros *Penicillium*, *Bacillus*, *Pseudomonas* e *Trichoderma* desempenham um papel importante na proteção das plantas contra o ataque de *Fusarium* [74–76,82–84] através da produção de bioprodutos antibióticos, da modulação da expressão da ACC deaminase e do aumento da absorção de nutrientes do solo, que resulta em maiores taxas de fotossíntese e status de vigor da planta. Além disso, esses microrganismos podem induzir uma reprogramação das expressões gênicas da planta que aumenta a capacidade das plantas em contornar estresses bióticos e abióticos [74,75,85–87]. Em nosso estudo, *Penicillium* foi fortemente associado com YEs sendo 351% e 1338% maior em HYE do que em MYE e LYE, respectivamente (Figura 7). Portanto, em MYE e LYE, a menor população de *Penicillium* foi associada a uma maior população de *Fusarium* sp. (Figura 7).

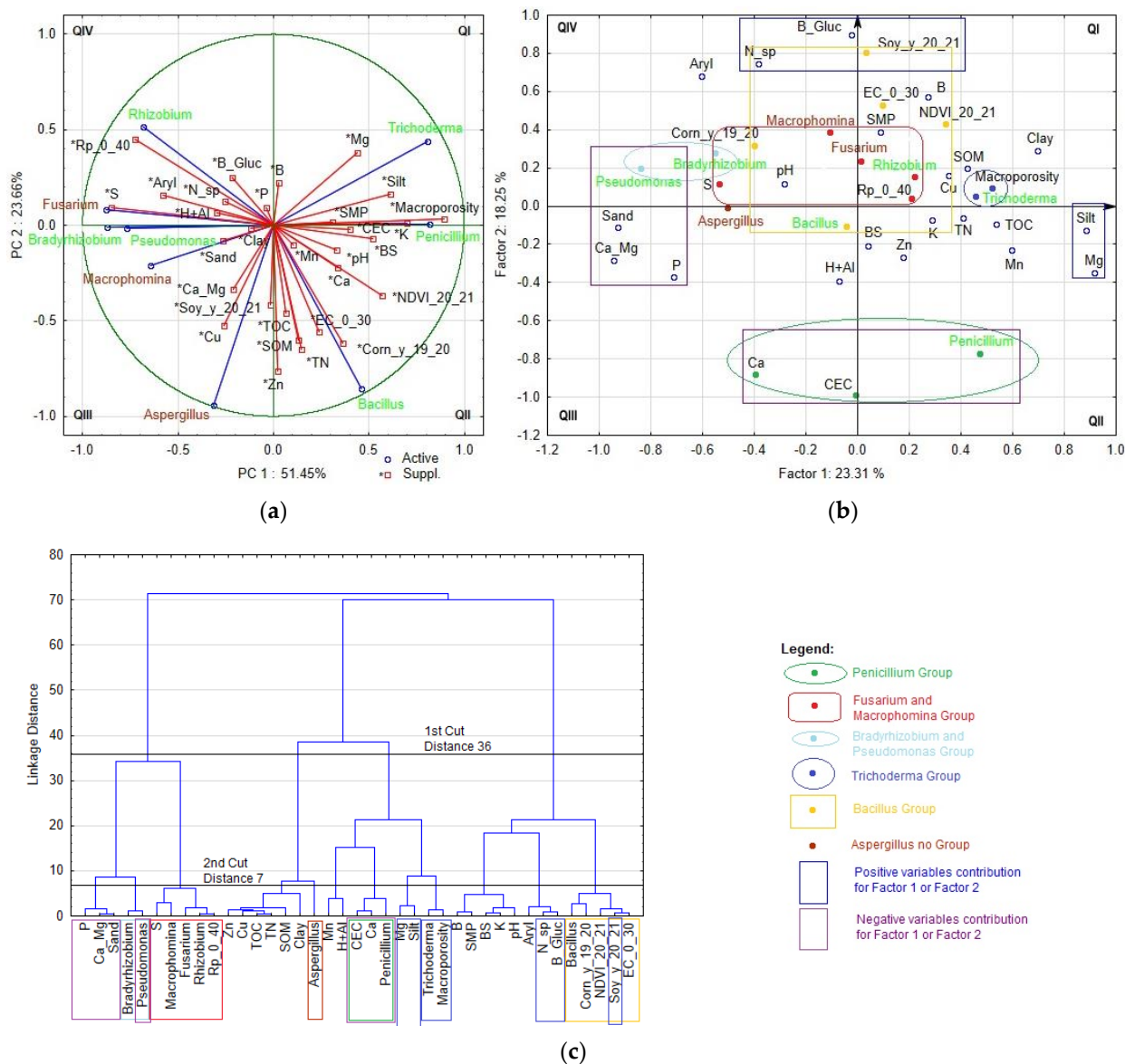
Em nosso estudo, a compactação do solo foi avaliada com base na resistência do solo à penetração (RP) nos três YEs investigados (Figura 8). Nossos resultados são consistentes com os de Pott et al. [23] no mesmo campo de nosso estudo, os quais relataram maior RP, menor macroporosidade e menor infiltração de água em LYE do que em HYE. Em nosso estudo, a RP foi maior em profundidades superiores a 0.15 m e seguiu a ordem decrescente: LYE > MYE > HYE (Figura 8). Pressupõe-se que  $RP > 2,5$  MPa seja um valor crítico para o crescimento das raízes da soja e o rendimento da cultura [88]. LYE teve RP maior que este valor crítico, enquanto MYE e HYE não atingiram este valor referência em nenhuma profundidade do solo (Figura 8). Valores elevados de RP podem afetar a aeração do solo, principalmente em solos argilosos, e estimular a ocorrência de *Fusarium* sp. sob condições de chuvas frequentes [89–91].



**Figura 8.** Resistência do solo à penetração e umidade do solo em distintos ambientes de produção sob agricultura conservacionista no Sul do Brasil (campo S-2). As barras de erro correspondem ao desvio padrão.

A Figura 9a mostra que a ACP explica 75.1% da variação através dos dados referentes aos organismos de crescimento de plantas e organismos fitopatogênicos e suas relações

com os atributos do solo. Esta informação é importante para orientar biologicamente o manejo do solo. Houve efeito positivo do teor de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ , produtividade de milho (safra 2019/20), macroporosidade, silte, MOS, COT, TN, CTC, CE, pH SMP,  $Zn^{2+}$  e pH do solo em água, com *Trichoderma* sp., *Penicillium* sp. e *Bacillus* sp. posicionados nos quadrantes QI e QII (Figura 9a). Por outro lado, os organismos patogênicos representados por *Fusarium* sp., *Macrophomina* sp. e *Aspergillus* sp. foram associados a RP, S,  $Cu^{2+}$ , relação  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$ , teor de areia,  $H + Al^{3+}$  e produtividade de soja (2020/21), foram posicionados nos quadrantes QIII e QIV (Figura 9a).



**Figura 9.** (a) Projeção da dispersão de variáveis pela análise de componentes principais (ACP), entre os gêneros mais abundantes de microrganismos do solo classificados como patogênicos e benéficos ao crescimento de plantas avaliados por análise molecular de DNA, atributos do solo e crescimento e produtividade das culturas em distintos ambientes de potencial produtivo sob agricultura de conservação no sul do Brasil (campo S-2) Não-Me-Toque, RS. Proporção dos gêneros *Penicillium*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Trichoderma*, *Bradyrhizobium*, *Rhizobium*, *Fusarium*, *Macrophomina* e *Aspergillus* no microbioma do solo foram consideradas como as principais variáveis na análise. As variáveis suplementares (\*) foram: produtividade de grãos da cultura da soja da safra 2020/21 (Soy\_y\_20\_21); produtividade de grãos da cultura do milho da safra 2019/20 (Corn\_y\_19\_20); índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI\_20\_21), número de espécies no solo por análise molecular (N\_sp); atividade enzimática do solo de  $\beta$ -glicosidase (B\_Gluc) e arilsulfatase (Aryl); areia; silte; argila; nitrogênio total (NT); carbono orgânico total (COT); potencial de hidrogênio (pH); índice pH SMP (SMP); fósforo (P); potássio (K); matéria orgânica do solo (MOS); cálcio ( $Ca^{2+}$ ); magnésio ( $Mg^{2+}$ ); capacidade de troca catiônica (CTC);

acidez potencial (H+Al); saturação de bases (V); enxofre (S); zinco (Zn<sup>2+</sup>); cobre (Cu<sup>2+</sup>); boro (B); manganês (Mn); relação cálcio/magnésio (Ca\_Mg); condutividade elétrica do solo de 0–0.30 m de profundidade (EC\_0\_30); resistência do solo à penetração, média de 0–0.40 m de profundidade (PR\_0\_40), e macroporosidade de 0.05–0.10 m; (b) dispersão das variáveis e (c) análise de clusters de acordo com sua contribuição para a formação dos Fatores 1 e 2; n = 6.

Houve uma relação antagônica entre *Penicillium* sp. (QI) e *Fusarium* sp. (QIV), e entre *Trichoderma* sp. e *Macrophomina* sp. (Figura 9a). Esses resultados podem ser explicados pelo efeito de biocontrole de *Penicillium* sp. e *Trichoderma* sp. O *Bacillus* sp. esteve no mesmo quadrante (QII) dos atributos NT, MOS e COT do solo.

Na análise fatorial, foi demonstrado que: *Penicillium* sp. foi associado ao conteúdo de Ca<sup>2+</sup> e CTC (Figura 9b,c); *Bradyrhizobium* sp. foi associado a *Pseudomonas* sp. (Figura 9b); *Trichoderma* sp. foi associado à macroporosidade (Figura 9b,c); e *Bacillus* sp. foi associado com CE, biodiversidade, produtividade de culturas e NDVI (Figura 9b,c). Por outro lado, *Macrophomina* sp., *Fusarium* sp. e *Aspergillus* sp. foram associados a alta RP, um indicador de compactação do solo. Além disso, o desequilíbrio na calagem e adubação expresso pelo alto pH do solo em água e alto teor de P concentrado em camada rasa afetou esses organismos fitopatogênicos. Esses resultados reforçam o conhecimento de que os atributos do solo são um importante condutor da biota do solo e que podem ser manejados no nível de fazenda para suportar uma diversidade de organismos que são promotores de crescimento de plantas. No entanto, mais estudos são necessários para entender melhor essas relações.

#### 4. Conclusões

A atividade das enzimas β-glicosidase e arilsulfatase foram eficientes indicadores da biodiversidade do solo sob AC. Além disso, a atividade dessas enzimas serve como uma ferramenta eficiente para distinguir ambientes de baixo potencial produtivo em relação a ambientes de alto potencial produtivo dentro dos campos.

Em geral, partículas finas de solo (argila e silte), alta CTC, alto teor de Ca<sup>2+</sup>, alta relação Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup>, alto COT, NT e MOS foram promotores da atividade das enzimas β-glicosidase e arilsulfatase do solo nos campos das principais agro-ecorregiões brasileiras. Por outro lado, pH do solo em água (>6.5), alto teor de areia, alto teor de P concentrado em camada superficial, alta temperatura, baixa disponibilidade de Cu<sup>2+</sup> e Mn<sup>2+</sup> diminuíram a atividade destas enzimas.

Uma grande proporção dos pontos de dados investigados (40%) apresentou baixo teor de MOS, COT e NT, criando condições associadas à baixa atividade enzimática e biodiversidade restrita. Esses resultados reforçam a visão de que a aplicação dos três princípios interligados da AC operam sinergicamente para construir e sustentar a saúde do solo nos sistemas de produção. Além disso, o desequilíbrio na correção do solo e no aporte de fertilização afeta a atividade enzimática do solo. O uso excessivo desses insumos pode resultar em alto pH do solo em água, alta concentração de fósforo em profundidade específica do solo, baixa disponibilidade de cobre e manganês, estreita relação Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> e alta saturação de Mg<sup>2+</sup> que, juntamente com textura arenosa e alta temperatura, foram associadas a baixa atividade enzimática. Por outro lado, o baixo ou não uso desses insumos pode resultar em baixo teor de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, baixo pH do solo em água, alto teor de Al<sup>3+</sup>, baixa saturação por bases e CTC que foram associados a baixo teor de MOS e baixo COT e NT que também foram associados à baixa atividade enzimática.

Através da caracterização do microbioma do solo, foi possível adicionar uma nova camada de dados que, juntamente com dados sobre os atributos do solo e das plantas, ajudaram a explicar os diferentes ambientes de potencial produtivo dentro de um campo de produção. Em nosso estudo, ambientes de alta produtividade apresentaram uma comunidade microbiana do solo mais diversificada com maior presença de biota que promove o crescimento das plantas (*Bacillus* sp., *Penicillium* sp., *Trichoderma* sp., *Pseudomonas* sp., *Bradyrhizobium* sp. e *Rhizobium* sp.). Nos ambientes de baixa produtividade, houve maior presença de *Fusarium* sp. e *Macrophomina* sp. que foram

negativos para o crescimento das plantas. Esses organismos patogênicos foram associados à presença de alta resistência à penetração do solo e baixa diversidade da microbiota como consequência da compactação do solo.

Conclui-se que a aplicação dos três princípios integrados da AC com foco na rotação de culturas e culturas de cobertura no sistema de cultivo, resulta em melhoria da saúde do solo e produtividade das culturas. Os principais impulsionadores desse processo de regeneração da saúde do solo são a restauração da matéria orgânica do solo e do teor de nitrogênio total por meio da diversificação das culturas, correção calibrada dos nutrientes das plantas com fertilização que se concentra no aumento do teor de  $\text{Ca}^{2+}$ , evitar a compactação do solo e estimular o crescimento das raízes das plantas que irão suportar microrganismos promotores de crescimento de plantas e uma comunidade diversificada da biota do solo.

**Contribuições dos Autores:** Conceituação, J.H.P., T.J.C.A. e A.K.; metodologia, J.H.P., T.J.C.A. e J.A.A.A.; validação, J.H.P., T.J.C.A. e A.K.; análise formal, J.H.P. e L.d.P.A.; investigação, J.H.P. e T.J.C.A.; recursos, T.J.C.A. e J.A.A.A.; redação—preparação do rascunho original, J.H.P. e T.J.C.A.; escrita—revisão e edição, J.H.P., T.J.C.A. e A.K.; visualização, J.H.P., T.J.C.A. e A.K.; supervisão, J.H.P. e T.J.C.A.; administração do projeto, T.J.C.A. e J.H.P.; aquisição de financiamento, T.J.C.A. e J.A.A.A. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

**Financiamento:** Projeto Aquarius e ABDI (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial) Agro 4.0 Edital 003/2020.

**Agradecimentos:** Agradecemos ao Projeto Aquarius, Stara, Cotrijal, Drakkar Solos Consultoria, Biome Markers, ABDI (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial) Agro 4.0 Edital 003/2020 e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) para bolsas ao primeiro (J.H.P.) e segundo autor (T.J.C.A.).

**Conflitos de interesse:** Os autores declaram não haver conflito de interesses.



## Referências

1. Kassam, A.; Friedrich, T.; Shaxson, F.; Pretty, J. The Spread of Conservation Agriculture: Justification, Sustainability and Uptake. *Int. J. Agric. Sustain.* **2009**, *7*, 292–320, doi:10.3763/ijas.2009.0477.
2. Shaxson, T.F. Re-Thinking the Conservation of Carbon, Water and Soil: A Different Perspective. *Agron. Sustain. Dev.* **2006**, *26*, 9–19, doi:10.1051/agro:2005054.
3. Leal, O.A.; Amado, T.J.C.; Fiorin, J.E.; Keller, C.; Reimche, G.B.; Rice, C.W.; Nicoloso, R.S.; Bortolotto, R.P.; Schwalbert, R. Linking Cover Crop Residue Quality and Tillage System to CO<sub>2</sub>-C Emission, Soil C and N Stocks and Crop Yield Based on a Long-Term Experiment. *Agronomy* **2020**, *10*, 1848, doi:10.3390/agronomy10121848.
4. Doran, J.W.; Zeiss, M. Soil Health and Sustainability: Managing the Biotic Component of Soil Quality. *Appl. Soil Ecol.* **2000**, *15*, 3–11.
5. Shah, K.K.; Tripathi, S.; Tiwari, I.; Shrestha, J.; Modi, B.; Paudel, N.; Das, B.D. Role of Soil Microbes in Sustainable Crop Production and Soil Health: A Review. *AST* **2021**, *13*, 109–118, doi:10.15547/ast.2021.02.019.
6. Kassam, A.; Friedrich, T.; Derpsch, R. Global Spread of Conservation Agriculture. *Int. J. Environ. Stud.* **2019**, *76*, 29–51, doi:10.1080/00207233.2018.1494927.
7. Pires, C.A.B.; Amado, T.J.C.; Reimche, G.; Schwalbert, R.; Sarto, M.V.M.; Nicoloso, R.S.; Fiorin, J.E.; Rice, C.W. Diversified Crop Rotation with No-till Changes Microbial Distribution with Depth and Enhances Activity in a Subtropical Oxisol. *Eur. J. Soil Sci.* **2020**, *71*, 1173–1187, doi:10.1111/ejss.12981.
8. Mendes, I.C.; Sousa, D.M.G.; Dantas, O.D.; Lopes, A.A.C.; Junior, F.B.R.; Oliveira, M.I.; Chaer, G.M. Soil Quality and Grain Yield: A Win-Win Combination in Clayey Tropical Oxisols. *Geoderma* **2021**, *388*, 114880, doi:10.1016/j.geoderma.2020.114880.
9. Doran, J.W.; Parkin, T.B. Defining and Assessing Soil Quality. In *SSSA Special Publications*; Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A., Eds.; Soil Science Society of America and American Society of Agronomy: Madison, WI, USA, 1994; pp. 1–21, ISBN 978-0-89118-930-5.
10. Garbisu, C.; Alkorta, I.; Epelde, L. Assessment of Soil Quality Using Microbial Properties and Attributes of Ecological Relevance. *Appl. Soil Ecol.* **2011**, *49*, 1–4, doi:10.1016/j.apsoil.2011.04.018.
11. Kremer, R.J. Biotechnology Impacts on Soil and Environmental Services. In *Soil Health and Intensification of Agroecosystems*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2017; pp. 353–375, ISBN 978-0-12-805317-1.
12. Van Bruggen, A.H.C.; Semenov, A.M.; van Diepeningen, A.D.; de Vos, O.J.; Blok, W.J. Relation between Soil Health, Wave-like Fluctuations in Microbial Populations, and Soil-Borne Plant Disease Management. *Eur. J. Plant Pathol.* **2006**, *115*, 105–122, doi:10.1007/s10658-005-1250-8.
13. Tripathi, S.; Srivastava, P.; Devi, R.S.; Bhadouria, R. Influence of synthetic fertilizers and pesticides on soil health and soil microbiology. In *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation: Pesticides and Chemical Fertilizers*; Prasad, M.N.V., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; pp. 25–54, ISBN 978-0-08-103017-2.
14. Khan, N.; Bano, A.M.D.; Babar, A. Impacts of Plant Growth Promoters and Plant Growth Regulators on Rainfed Agriculture. *PLoS ONE* **2020**, *15*, e0231426, doi:10.1371/journal.pone.0231426.
15. Mendes, I.C.; Souza, D.M.G.; Reis Junior, F.B.; Lopes, A.A.C. *Bioanálise de Solo: Como Acessar e Interpretar a Saúde Do Solo*; Embrapa: Planaltina, Brazil, 2018.
16. Van Bruggen, A.H.C.; Grünwald, N.J.; Bolda, M. Cultural Methods and Soil Nutrient Status in Low and High Input Agricultural Systems, as They Affect Rhizoctonia Species. In *Rhizoctonia Species: Taxonomy, Molecular Biology, Ecology, Pathology and Disease Control*; Sneh, B., Jabaji-Hare, S., Neate, S., Dijst, G., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 1996; pp. 407–421, ISBN 978-90-481-4597-3.
17. Toor, M.D.; Adnan, M. Role of Soil Microbes in Agriculture, A Review. *J. Biog. Sci. Res.* **2020**, doi:10.46718/JBGRS.2020.04.000091.
18. de Carvalho Mendes, I.; de Souza, L.M.; de Sousa, D.M.G.; de Castro Lopes, A.A.; dos Reis Junior, F.B.; Lacerda, M.P.C.; Malaquias, J.V. Critical Limits for Microbial Indicators in Tropical Oxisols at Post-Harvest: The FERTBIO Soil Sample Concept. *Appl. Soil Ecol.* **2019**, *139*, 85–93, doi:10.1016/j.apsoil.2019.02.025.
19. Alves de Castro Lopes, A.; Gomes de Sousa, D.M.; Chaer, G.M.; Bueno dos Reis Junior, F.; Goedert, W.J.; de Carvalho Mendes, I. Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **2013**, *77*, 461–472, doi:10.2136/sssaj2012.0191.
20. Mendes, I.C.; Tormena, C.A.; Cherubin, M.R.; Karlen, D.L. Soil health assessment and maintenance in Central and South-Central Brazil. In *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science*; Reicosky, D., Ed.; Burleigh Dodds Science Publishing: Cambridge, UK, 2018; Volume 2, pp. 379–415, ISBN 978-1-78676-192-7.
21. Lopes, A.A.C.; Sousa, D.M.G.; dos Reis, F.B.; Figueiredo, C.C.; Malaquias, J.V.; Souza, L.M.; Mendes, I.C. Temporal Variation and Critical Limits of Microbial Indicators in Oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Reg.* **2018**, *12*, 72–82, doi:10.1016/j.geodrs.2018.01.003.
22. Pott, L.P.; Amado, T.J.C.; Schwalbert, R.A.; Gebert, F.H.; Reimche, G.B.; Pes, L.Z.; Ciampitti, I.A. Effect of Hairy Vetch Cover Crop on Maize Nitrogen Supply and Productivity at Varying Yield Environments in Southern Brazil. *Sci. Total Environ.* **2021**, *759*, 144313, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144313.
23. Pott, L.P.; Amado, T.J.C.; Leal, O.A.; Ciampitti, I.A. Mitigation of Soil Compaction for Boosting Crop Productivity at Varying Yield Environments in Southern Brazil. *Eur. J. Soil Sci.* **2019**, *71*, 1157–1172, doi:10.1111/ejss.12880.

24. Corassa, G.M.; Santi, A.L.; Amado, T.J.C.; Reimche, G.B.; Gaviraghi, R.; Bisognin, M.B.; Pires, J.L.F. Performance of Soybean Varieties Differs According to Yield Class: A Case Study from Southern Brazil. *Precis. Agric.* **2019**, *20*, 520–540, doi:10.1007/s11119-018-9595-0.
25. Schwalbert, R.A.; Amado, T.J.C.; Reimche, G.B.; Gebert, F. Fine-Tuning of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Variable Nitrogen Rate by Combining Crop Sensing and Management Zones Approaches in Southern Brazil. *Precis. Agric.* **2019**, *20*, 56–77, doi:10.1007/s11119-018-9581-6.
26. Soil Survey, Staff. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed.; Soil Conservation Service: Washington, DC, USA, 2014.
27. Tabatabai, M.A. Soil enzymes. In *Methods of Soil Analysis. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties*; Soil Science Society of America: Madison, WI, USA, 1994; Volume 5, pp. 775–833.
28. Embrapa. *Manual de Métodos de Análise de Solo*, 2nd ed.; Embrapa Solos: Rio de Janeiro, Brazil, 2011; Volume 1.
29. Tedesco, M.J.; Gianello, C.; Bohnen, H.; Volkweiss, S.J. *Análises de Solo, Plantas e Outros Materiais*, 2nd ed.; Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, Brazil, 1995.
30. Teixeira, P.C.; Donagemma, G.K.; Fontana, A.; Teixeira, W.G. *Manual de Métodos de Análise de Solo*, 3rd ed.; Embrapa: Brasília, Brazil, 2017.
31. Imam, N.; Belda, I.; Duehl, A.J.; Doroghazi, J.R.; Almonacid, D.E.; Thomas, V.P.; Acedo, A. Soil Microbial Composition and Structure Allow Assessment of Biological Product Effectiveness and Crop Yield Prediction. *BioRxiv* **2021**, doi:10.1101/2021.02.09.430373.
32. Vicini, L.; Souza, A.M.; Morales, F.E.C.; Souza, F.M. *Técnicas Multivariadas: Teorias e Aplicações No Software Statistica*; Editora da UFSM: Santa Maria, CA, USA, 2018.
33. Hair, J.F.; Black, W.C.; Babin, B.J.; Anderson, R.E.; Tathan, R.L. *Análise Multivariada de Dados*, 5th ed.; Bookmam: Porto Alegre, Brazil, 2005.
34. Ji, B.; Hu, H.; Zhao, Y.; Mu, X.; Liu, K.; Li, C. Effects of Deep Tillage and Straw Returning on Soil Microorganism and Enzyme Activities. *Sci. World J.* **2014**, *2014*, 451493, doi:10.1155/2014/451493.
35. Elliott, E.T.; Anderson, R.V.; Coleman, D.C.; Cole, C.V. Habitable Pore Space and Microbial Trophic Interactions. *Oikos* **1980**, *35*, 327, doi:10.2307/3544648.
36. Alvarez, G.; Chaussod, R.; Cluzeau, D. *Biological Activities and Soil Fertility, Interest and Limitations of Analytical Methods Available*, 1st ed.; Itab: London, UK, 2002.
37. Soares, M.R.; Alleoni, L.R.F.; Vidal-Torrado, P.; Cooper, M. Mineralogy and Ion Exchange Properties of the Particle Size Fractions of Some Brazilian Soils in Tropical Humid Areas. *Geoderma* **2005**, *125*, 355–367, doi:10.1016/j.geoderma.2004.09.008.
38. Bayer, C.; Mielniczuk, J.; Amado, T.J.C.; Martin-Neto, L.; Fernandes, S.V. Organic Matter Storage in a Sandy Clay Loam Acrisol Affected by Tillage and Cropping Systems in Southern Brazil. *Soil Tillage Res.* **2000**, *54*, 101–109, doi:10.1016/S0167-1987(00)00090-8.
39. de Oliveira Ferreira, A.; Amado, T.J.C.; Rice, C.W.; Ruiz Diaz, D.A.; Briedis, C.; Inagaki, T.M.; Gonçalves, D.R.P. Driving Factors of Soil Carbon Accumulation in Oxisols in Long-Term No-till Systems of South Brazil. *Sci. Total Environ.* **2018**, *622–623*, 735–742, doi:10.1016/j.scitotenv.2017.12.019.
40. Xu, Z.; Yu, G.; Zhang, X.; Ge, J.; He, N.; Wang, Q.; Wang, D. The Variations in Soil Microbial Communities, Enzyme Activities and Their Relationships with Soil Organic Matter Decomposition along the Northern Slope of Changbai Mountain. *Appl. Soil Ecol.* **2015**, *86*, 19–29, doi:10.1016/j.apsoil.2014.09.015.
41. Thor, K. Calcium—Nutrient and Messenger. *Front. Plant Sci.* **2019**, *10*, 440, doi:10.3389/fpls.2019.00440.
42. Dalla Nora, D.; Amado, T.J.C.; Bortolotto, R.P.; Ferreira, A.O.; Reichardt, K.; Santi, A.L. Subsoil Chemical Amelioration and Crop Yields under Continuous Long-Term No-till in a Subtropical Oxisol. *Afr. J. Agric. Res.* **2014**, *9*, 3338–3349.
43. Mankolo, R.; Reddy, C.; Senwo, Z.; Nyakatawa, E.; Sajjala, S. Soil Biochemical Changes Induced by Poultry Litter Application and Conservation Tillage under Cotton Production Systems. *Agronomy* **2012**, *2*, 187–198, doi:10.3390/agronomy2030187.
44. Tiecher, T.; Martins, A.P.; Peretto, E.J.S.; Fink, J.R.; Santos, L.S.; Denardin, L.G.O.; Tiecher, T.L. *Evolução e Estado Da Fertilidade Do Solo No Norte Do Rio Grande Do Sul e Sudoeste de Santa Catarina*; UFRGS: Porto Alegre, Brazil, 2016.
45. Bayer, C.; Dieckow, J.; Amado, T.J.C.; Eltz, F.L.F.; Vieira, F.C.B. Cover Crop Effects Increasing Carbon Storage in a Subtropical No-Till Sandy Acrisol. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **2009**, *40*, 1499–1511, doi:10.1080/00103620902820365.
46. FAO. *State of Knowledge of Soil Biodiversity-Status, Challenges and Potentialities*; FAO: Rome, Italy, 2020; ISBN 978-92-5-133582-6.
47. Bardgett, R.D.; Hobbs, P.J.; Frostegard, A. Changes in Soil Fungal:Bacterial Biomass Ratios Following Reductions in the Intensity of Management of an Upland Grassland. *Biol. Fertil. Soils* **1996**, *22*, 261–264.
48. Lange, M.; Habekost, M.; Eisenhauer, N.; Roscher, C.; Bessler, H.; Engels, C.; Oelmann, Y.; Scheu, S.; Wilcke, W.; Schulze, E.-D.; et al. Biotic and Abiotic Properties Mediating Plant Diversity Effects on Soil Microbial Communities in an Experimental Grassland. *PLoS ONE* **2014**, *9*, e96182, doi:10.1371/journal.pone.0096182.
49. Chen, C.; Chen, H.Y.H.; Chen, X.; Huang, Z. Meta-Analysis Shows Positive Effects of Plant Diversity on Microbial Biomass and Respiration. *Nat. Commun.* **2019**, *10*, 1332, doi:10.1038/s41467-019-09258-y.
50. de Vargas, R.L.; Schuch, L.O.B.; Barros, W.S.; Rigo, G.A.; Szarecki, V.J.; Carvalho, I.R.; Pimentel, J.R.; Troyjack, C.; Jaques, L.B.A.; de Souza, V.Q.; et al. Macronutrients and Micronutrients Variability in Soybean Seeds. *JAS* **2018**, *10*, 209, doi:10.5539/jas.v10n4p209.
51. Dalla Nora, D.; Amado, T.J.C. Improvement in Chemical Attributes of Oxisol Subsoil and Crop Yields under No-Till. *Agron. J.* **2013**, *105*, 1393–1403, doi:10.2134/agronj2013.0031.

52. Hansel, F.D.; Amado, T.J.C.; Bortolotto, R.P.; Trindade, B.S.; Hansel, D.S.S. Influence of Different Phosphorus Sources on Fertilization Efficiency. *Rev. Bras. Tecnol. Apl. Ciênc. Agrár.* **2014**, *7*, 103–111, doi:10.5935/PAeT.V7.N1.12.
53. de Souza Nunes, R.; de Sousa, D.M.G.; Goedert, W.J.; de Oliveira, L.E.Z.; Pavinato, P.S.; Pinheiro, T.D. Distribution of Soil Phosphorus Fractions as a Function of Long-Term Soil Tillage and Phosphate Fertilization Management. *Front. Earth Sci.* **2020**, *8*, 350, doi:10.3389/feart.2020.00350.
54. Hansel, F.D.; Amado, T.J.C.; Ruiz Diaz, D.A.; Rosso, L.H.M.; Nicoloso, F.T.; Schorr, M. Phosphorus Fertilizer Placement and Tillage Affect Soybean Root Growth and Drought Tolerance. *Agron. J.* **2017**, *109*, 2936–2944, doi:10.2134/agronj2017.04.0202.
55. Bao, Z.; Matsushita, Y.; Morimoto, S.; Hoshino, Y.T.; Suzuki, C.; Nagaoka, K.; Takenaka, M.; Murakami, H.; Kuroyanagi, Y.; Urashima, Y.; et al. Decrease in Fungal Biodiversity along an Available Phosphorous Gradient in Arable Andosol Soils in Japan. *Can. J. Microbiol.* **2013**, *59*, 368–373, doi:10.1139/cjm-2012-0612.
56. Yang, G.; Liu, N.; Lu, W.; Wang, S.; Kan, H.; Zhang, Y.; Xu, L.; Chen, Y. The Interaction between Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Soil Phosphorus Availability Influences Plant Community Productivity and Ecosystem Stability. *J. Ecol.* **2014**, *102*, 1072–1082, doi:10.1111/1365-2745.12249.
57. Treseder, K.K. A Meta-analysis of Mycorrhizal Responses to Nitrogen, Phosphorus, and Atmospheric CO<sub>2</sub> in Field Studies. *New Phytol.* **2004**, *164*, 347–355, doi:10.1111/j.1469-8137.2004.01159.x.
58. Abreu, C.H., Jr.; Muraoka, T.; Lavorante, A.F. Relationship between Acidity and Chemical Properties of Brazilian Soils. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* **2003**, *60*, 337–343, doi:10.1590/S0103-90162003000200019.
59. Msimbira, L.A.; Smith, D.L. The Roles of Plant Growth Promoting Microbes in Enhancing Plant Tolerance to Acidity and Alkalinity Stresses. *Front. Sustain. Food Syst.* **2020**, *4*, 106, doi:10.3389/fsufs.2020.00106.
60. Rousk, J.; Bååth, E.; Brookes, P.C.; Lauber, C.L.; Lozupone, C.; Caporaso, J.G.; Knight, R.; Fierer, N. Soil Bacterial and Fungal Communities across a pH Gradient in an Arable Soil. *ISME J.* **2010**, *4*, 1340–1351, doi:10.1038/ismej.2010.58.
61. Shen, C.; Shi, Y.; Fan, K.; He, J.-S.; Adams, J.M.; Ge, Y.; Chu, H. Soil pH Dominates Elevational Diversity Pattern for Bacteria in High Elevation Alkaline Soils on the Tibetan Plateau. *FEMS Microbiol. Ecol.* **2019**, *95*, fiz003, doi:10.1093/femsec/fiz003.
62. Stark, S.; Männistö, M.K.; Eskelinen, A. Nutrient Availability and pH Jointly Constrain Microbial Extracellular Enzyme Activities in Nutrient-Poor Tundra Soils. *Plant Soil* **2014**, *383*, 373–385, doi:10.1007/s11104-014-2181-y.
63. Donagemma, G.K.; de Freitas, P.L.; de Carvalho Balieiro, F.; Fontana, A.; Spera, S.T.; Lumberras, J.F.; Viana, J.H.M.; de Araújo Filho, J.C.; dos Santos, F.C.; de Albuquerque, M.R.; et al. Characterization, Agricultural Potential, and Perspectives for the Management of Light Soils in Brazil. *Pesq. Agropec. Bras.* **2016**, *51*, 1003–1020, doi:10.1590/s0100-204x2016000900001.
64. Roques, S.; Kendall, S.; Smith, K.; Newell Price, P.; Berry, P. Review of the Non-NPKS Nutrient Requirements of UK Cereals and Oilseed Rape. *HGCA Res. Rev.* **2013**, *78*, 9–108.
65. García-Mina, J.M.; Antolín, M.C.; Sanchez-Diaz, M. Metal-Humic Complexes and Plant Micronutrient Uptake: A Study Based on Different Plant Species Cultivated in Diverse Soil Types. *Plant Soil* **2004**, *258*, 57–68, doi:10.1023/B:PLSO.0000016509.56780.40.
66. Alejandro, S.; Höller, S.; Meier, B.; Peiter, E. Manganese in Plants: From Acquisition to Subcellular Allocation. *Front. Plant Sci.* **2020**, *11*, 300, doi:10.3389/fpls.2020.00300.
67. Lorenz, N.; McSpadden Gardener, B.B.; Lee, N.R.; Ramsier, C.; Dick, R.P. Soil Enzyme Activities Associated with Differential Outcomes of Contrasting Approaches to Soil Fertility Management in Corn and Soybean Fields. *AEES* **2020**, *8*, 517–525, doi:10.12691/aees-8-6-26.
68. Bai, X.; Dippold, M.A.; An, S.; Wang, B.; Zhang, H.; Loepmann, S. Extracellular Enzyme Activity and Stoichiometry: The Effect of Soil Microbial Element Limitation during Leaf Litter Decomposition. *Ecol. Indic.* **2021**, *121*, 107200, doi:10.1016/j.ecolind.2020.107200.
69. Stout, J.D. The Role of Protozoa in Nutrient Cycling and Energy Flow. In *Advances in Microbial Ecology*; Alexander, M., Ed.; Springer: Boston, MA, USA, 1980; Volume 4.
70. Clarholm, M. Interactions of Bacteria, Protozoa and Plants Leading to Mineralization of Soil Nitrogen. *Soil Biol. Biochem.* **1985**, *17*, 181–187, doi:10.1016/0038-0717(85)90113-0.
71. Ozimek, E.; Hanaka, A. Mortierella Species as the Plant Growth-Promoting Fungi Present in the Agricultural Soils. *Agriculture* **2020**, *11*, 7, doi:10.3390/agriculture11010007.
72. Glick, B.R.; Todorovic, B.; Czarny, J.; Cheng, Z.; Duan, J.; McConkey, B. Promotion of Plant Growth by Bacterial ACC Deaminase. *Crit. Rev. Plant Sci.* **2007**, *26*, 227–242, doi:10.1080/07352680701572966.
73. de Souza, R.; Ambrosini, A.; Passaglia, L.M.P. Plant Growth-Promoting Bacteria as Inoculants in Agricultural Soils. *Genet. Mol. Biol.* **2015**, *38*, 401–419, doi:10.1590/S1415-475738420150053.
74. Radhakrishnan, R.; Kang, S.-M.; Baek, I.-Y.; Lee, I.-J. Characterization of Plant Growth-Promoting Traits of *Penicillium* Species against the Effects of High Soil Salinity and Root Disease. *J. Plant Interact.* **2014**, *9*, 754–762, doi:10.1080/17429145.2014.930524.
75. Shores, M.; Harman, G.E.; Mastouri, F. Induced Systemic Resistance and Plant Responses to Fungal Biocontrol Agents. *Annu. Rev. Phytopathol.* **2010**, *48*, 21–43, doi:10.1146/annurev-phyto-073009-114450.
76. Ethur, L.Z.; Blume, E.; Muniz, M.F.B.; Flores, M.G.V. Seleção de Antagonistas Fúngicos a *Fusarium Solani* e *Fusarium Oxysporum* Em Substrato Comercial Para Mudas. *Cienc. Rural* **2007**, *37*, 1801–1804, doi:10.1590/S0103-84782007000600047.
77. Vanlauwe, B.; Hungria, M.; Kanampiu, F.; Giller, K.E. The Role of Legumes in the Sustainable Intensification of African Smallholder Agriculture: Lessons Learnt and Challenges for the Future. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2019**, *284*, 106583, doi:10.1016/j.agee.2019.106583.

78. Leandro, L.F.S.; Eggenberger, S.; Chen, C.; Williams, J.; Beattie, G.A.; Liebman, M. Cropping System Diversification Reduces Severity and Incidence of Soybean Sudden Death Syndrome Caused by *Fusarium virguliforme*. *Plant Dis.* **2018**, *102*, 1748–1758, doi:10.1094/PDIS-11-16-1660-RE.
79. Costa, S.S.; Matos, K.S.; Tessmann, D.J.; Seixas, C.D.S.; Pfenning, L.H. *Fusarium paranaense* sp. nov., a Member of the *Fusarium solani* Species Complex Causes Root Rot on Soybean in Brazil. *Fungal Biol.* **2016**, *120*, 51–60, doi:10.1016/j.funbio.2015.09.005.
80. Ranzi, C.; Camera, J.N.; Deuner, C.C. Influence of Continuous Cropping on Corn and Soybean Pathogens. *Summa Phytopathol.* **2017**, *43*, 14–19, doi:10.1590/0100-5405/2150.
81. Hartman, G.L.; Leandro, L.F.; Rupe, J.C. Sudden death syndrome. In *Compendium of Soybean Diseases and Pests*; Hartman, G.L., Rupe, J.C., Sikora, E.J., Domier, L.L., Davis, J.A., Steffey, K.L., Eds.; American Phytopathological Society: St. Paul, MN, USA, 2015; pp. 88–90.
82. Alam, S.S.; Sakamoto, K.; Inubushi, K. Biocontrol Efficiency of Fusarium Wilt Diseases by a Root-Colonizing Fungus *Penicillium* sp. *Soil Sci. Plant Nutr.* **2011**, *57*, 204–212, doi:10.1080/00380768.2011.564996.
83. Hariprasad, P.; Divakara, S.T.; Niranjana, S.R. Isolation and Characterization of Chitinolytic Rhizobacteria for the Management of Fusarium Wilt in Tomato. *Crop Prot.* **2011**, *30*, 1606–1612, doi:10.1016/j.cropro.2011.02.032.
84. Saikia, R.; Singh, K.; Arora, D.K. Suppression of Fusarium Wilt and Charcoal Rot of Chickpea by *Pseudomonas Aeruginosa* RsB29. *Indian J. Microbiol.* **2006**, *44*, 181–184.
85. Dimkpa, C.O.; Merten, D.; Svatoš, A.; Büchel, G.; Kothe, E. Siderophores Mediate Reduced and Increased Uptake of Cadmium by *Streptomyces Tendae* F4 and Sunflower (*Helianthus Annuus*), Respectively. *J. Appl. Microbiol.* **2009**, *107*, 1687–1696, doi:10.1111/j.1365-2672.2009.04355.x.
86. Grover, M.; Ali, S.Z.; Sandhya, V.; Rasul, A.; Venkateswarlu, B. Role of Microorganisms in Adaptation of Agriculture Crops to Abiotic Stresses. *World J. Microbiol. Biotechnol.* **2011**, *27*, 1231–1240, doi:10.1007/s11274-010-0572-7.
87. Glick, B.R. Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. *Scientifica* **2012**, *2012*, 963401, doi:10.6064/2012/963401.
88. Girardello, V.C.; Amado, T.J.C.; Santi, A.L.; Cherubin, M.R.; Kunz, J.; de Gregori Teixeira, T. Resistência à Penetração, Eficiência de Escarificadores Mecânicos e Produtividade Da Soja Em Latossolo Argiloso Manejado Sob Plantio Direto de Longa Duração. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* **2014**, *38*, 1234–1244, doi:10.1590/S0100-06832014000400020.
89. Cruz, D.R.; Leandro, L.F.S.; Mayfield, D.A.; Meng, Y.; Munkvold, G.P. Effects of Soil Conditions on Root Rot of Soybean Caused by *Fusarium graminearum*. *Phytopathology* **2020**, *110*, 1693–1703, doi:10.1094/PHYTO-02-20-0052-R.
90. Leandro, L.F.S.; Robertson, A.E.; Mueller, D.S.; Yang, X.-B. Climatic and Environmental Trends Observed During Epidemic and Non-Epidemic Years of Soybean Sudden Death Syndrome in Iowa. *Plant Health Progress* **2013**, *14*, 18, doi:10.1094/PHP-2013-0529-01-RS.
91. Scherm, H.; Yang, X. Development of Sudden Death Syndrome of Soybean in Relation to Soil Temperature and Soil Water Matric Potential. *Phytopathology* **1996**, *86*, 642, doi:10.1094/Phyto-86-642.