

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

2 FOME ZERO
E AGRICULTURA
SUSTENTÁVEL



OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

12 CONSUMO E
PRODUÇÃO
RESPONSÁVEIS



Fazendas de referência para a implementação do modelo de quatro quadrantes na avaliação de tendências do carbono do solo pela tecnologia BioAS



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura e Pecuária**

DOCUMENTOS 403

Fazendas de referência para a implementação do modelo de quatro quadrantes na avaliação de tendências do carbono do solo pela tecnologia BioAS tendências de ganho ou perda de C no solo

*Iêda de Carvalho Mendes
Guilherme Montandon Chaer
Fábio Bueno dos Reis Junior
Maria Inês Lopes de Oliveira
Ozanival Dario Dantas
Juaci Vitoria Malaquias*

Embrapa Cerrados
Planaltina, DF
2023

Embrapa Cerrados
BR 020, Km 18, Rod. Brasília / Fortaleza
Caixa Postal 08223
CEP 73310-970, Planaltina, DF
Fone: (61) 3388-9898
embrapa.br/cerrados
embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações da Unidade

Presidente
Lineu Neiva Rodrigues

Secretário-executivo
Gustavo José Braga

Secretária
Alessandra S. Gelape Faleiro

Membros
Alessandra Silva Gelape Faleiro
Alexandre Specht
Edson Eyji Sano
Fábio Gelape Faleiro
Gustavo José Braga
Jussara Flores de Oliveira Arbues
Kleberon Worsley Souza
Maria Madalena Rinaldi
Shirley da Luz Soares Araujo

Supervisão editorial e revisão de texto
Jussara Flores de Oliveira Arbues

Normalização bibliográfica
Shirley da Luz Soares Araújo

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Leila Sandra Gomes Alencar

Foto da capa
José Mário Lobo

Impressão e acabamento
Alexandre Moreira Veloso

1ª edição

1ª impressão (2023): tiragem (30 exemplares)
Publicação digital (2023): PDF

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Cerrados

F287 Fazendas de referência para a implementação do modelo de quatro
quadrantes na avaliação de tendências do carbono do solo pela
tecnologia BioAS / lêda de Carvalho Mendes... [et al.]. – Planaltina,
DF : Embrapa Cerrados, 2023.

41 p. (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111,
e-ISSN 2176-5081 ; 403).

1. Qualidade do solo. 2. Carbono. I. Carvalho, lêda Mendes de.
II. Embrapa Cerrados. III. Série.

CDD (21 ed.) 631.4

Autores

Iêda de Carvalho Mendes

Engenheira-agrônoma, Ph.D. em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Guilherme Montandon Chaer

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ

Fábio Bueno dos Reis Junior

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Maria Inês Lopes de Oliveira

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciências Agrárias, bolsista (pós-doutorado - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) na Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Ozanival Dario Dantas

Cientista da computação, mestre em Engenharia Elétrica e de Computação, analista da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Juaci Vitoria Malaquias

Estatístico, mestre em Ciência de Materiais em Modelagem e Simulação Computacional, analista da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

Agradecemos os funcionários da Embrapa Cerrados: Clodoaldo Alves de Sousa, Lucas Ferreira Lima Sobreira Rolim, integrantes da equipe do laboratório de Microbiologia do Solo; Osmar Teago de Oliveira e Valmir Vieira de Sousa, técnicos agrícolas. Também expressamos nossa gratidão a Alexssander Sausen (Grupo SLC), Nilton Gomes Jaime (consultor), Paulo Ricardo Teodoro da Silva (Fundação Chapadão), Riviane Albuquerque (Grupo Bom Futuro) e Silvia Vieira (agricultora), pelo auxílio com o histórico de manejo das fazendas de referência. Os autores também agradecem as bolsas de pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Apresentação

Este trabalho foi financiado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), nos projetos 02.14.01.026.00, 20.20.03.017.00 e 22.14.01.026.00, e parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Edital Universal (Processo nº 404764/2016-9), pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF), Edital Demanda Espontânea 2016 (Processo nº 1355/2016), e pelo MCTI/CNPq/CAPES/FAPS (INCT-MPCPAgro).

Desenvolvida pela Embrapa, a BioAS foi lançada em 23 de julho de 2020 como uma tecnologia pioneira no mundo, após 21 anos de estudos. Seu objetivo é avaliar a saúde dos solos por meio da análise da atividade das enzimas Arilsulfatase e β -glicosidase, relacionadas aos ciclos do enxofre e do carbono, respectivamente. Desde então, tem sido amplamente utilizada para avaliar a qualidade do solo, a eficácia de práticas de manejo e o potencial produtivo em diversas fazendas no Cerrado brasileiro e no estado do Paraná.

A grande vantagem da BioAS é sua sensibilidade, permitindo antecipar alterações na saúde do solo em função do uso e manejo. A tecnologia envolve o cálculo de Índices de Qualidade de Solo (IQS) com base nas propriedades químicas e biológicas em conjunto ($\text{IQS}_{\text{Fertbio}}$) e separadamente ($\text{IQS}_{\text{Biológico}}$ e $\text{IQS}_{\text{Químico}}$), permitindo uma avaliação mais completa da saúde do solo.

Esta Série Documentos apresenta uma nova funcionalidade da BioAS, que permite avaliar tendências de ganho ou perda de C no solo utilizando um Modelo de Quatro Quadrantes relacionando o carbono orgânico (COS) e a atividade enzimática do solo. O modelo foi validado em fazendas da região do Cerrado, onde os manejos agrícolas constituíam um gradiente incluindo solos

saudáveis (alto COS), adoecendo (em tendência de perda de COS), doentes (baixo COS) e em recuperação (em tendência de ganho de COS).

Além de destacar as principais premissas e aplicabilidades do modelo para avaliar as tendências de carbono no solo, a publicação objetiva detalhar o conjunto valioso de informações obtidas nas fazendas de referência utilizadas na validação do modelo.

Este trabalho contribui para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) números 2 e 12. Por meio do diagnóstico da saúde do solo, o agricultor poderá tomar decisões de manejo que facilitem a adoção de práticas de agricultura conservacionista/regenerativa e que irão resultar em sistemas agrícolas mais sustentáveis e resilientes. Os 17 ODS foram estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015 e compõem uma agenda mundial para a construção e a implementação de políticas públicas que visam guiar a humanidade até 2030.

Sebastião Pedro da Silva Neto
Chefe-Geral da Embrapa Cerrados

Sumário

Introdução.....	11
O Modelo de Quatro Quadrantes	12
Descrição das fazendas de referência	14
Época e forma de amostragem	16
Parâmetros avaliados.....	16
Cálculo da atividade enzimática específica média (AEM).....	17
Definições das linhas de corte no modelo de quatro quadrantes	18
Dados das fazendas de referência.....	19
Lições aprendidas nas fazendas de referência.....	40
Referências	41

Introdução

Recentemente, foi publicado o artigo técnico-científico intitulado *Evaluating C Trends in Clayey Cerrado Oxisols Using a Four-Quadrant Model Based on Specific Arylsulfatase and B-Glucosidase Activities* (Chaer et al., 2023), propondo um método expedito para avaliar tendências de ganho ou perda de carbono (C) no solo. Esse método, baseado em um modelo de quatro quadrantes, permite avaliar se o solo se apresenta estável, do ponto de vista do ganho ou perda de carbono orgânico do solo (COS) ou em processo de transição, ou seja, em tendência de ganho ou perda de COS. Esses padrões são facilmente identificados em um gráfico que relaciona os valores da atividade enzimática específica média (AEM) da β -glicosidase (GLI) e Arilsulfatase (AriI) versus o COS obtidos na camada de 0 cm a 10 cm.

Esse método constitui mais uma funcionalidade na tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo (BioAS) (Mendes et al., 2018; Mendes et al., 2019a e Mendes et al., 2021a,b,c), que mede e interpreta a atividade das enzimas GLI e AriI e calcula índices de qualidade de solo (IQS). Com a BioAS, o agricultor pode agilizar as tomadas de decisões de manejo sem a necessidade de amostrar em profundidade no perfil do solo, utilizando apenas a camada diagnóstica de 0 cm a 10 cm.

O modelo dos quatro quadrantes da BioAS foi desenvolvido a partir de dados gerados em experimentos de longa duração envolvendo doses e modo de aplicação de fósforo, idealizados e conduzidos pelo pesquisador Djalma Martinhão Gomes de Souza (in memoriam) e validado em fazendas da região do Cerrado com solos saudáveis, adoecendo, doente e em recuperação, conforme os resultados da BioAS (Mendes et al., 2021c; Chaer et al., 2023). Os dados para validar o modelo foram obtidos por meio de levantamentos detalhados junto aos agrônomos e consultores que atuavam nestas fazendas e foram apresentados no material suplementar do artigo de Chaer et al. (2023).

O objetivo do presente documento é destacar as principais premissas e aplicabilidades do modelo de quatro quadrantes para avaliar as tendências de ganho ou perda de carbono no solo e detalhar o conjunto valioso de informações obtidas nas fazendas de referência utilizadas para a validação do modelo. Com isso, espera-se fornecer aos leitores uma compreensão mais abrangente e clara desse método de avaliação.

O Modelo de Quatro Quadrantes

O Modelo de Quatro Quadrantes proposto por Chaer et al. (2023) visa avaliar as tendências de C do solo (perda, ganho ou estabilidade) de uma determinada área, com base na relação entre o COS e a atividade média das enzimas GLI e Aril por unidade de COS (atividade enzimática específica média – AEM).

Este modelo é fundamentado em quatro premissas importantes para a compreensão das tendências de ganho ou perda de carbono no solo:

- i. As enzimas GLI e Aril são mais sensíveis ao tipo de uso do solo ou mudanças no sistema de manejo do que o COS.
- ii. Mudanças na atividade de GLI, Aril e no COS ocorrem na mesma direção, mas as enzimas, por serem bioindicadores altamente sensíveis, mudam em um ritmo mais rápido.
- iii. Áreas que estão sob as mesmas práticas de uso e manejo do solo por um longo período atingem um estado de equilíbrio entre a atividade das duas enzimas e o COS.
- iv. Devido à primeira premissa, áreas que sofrem mudanças recentes e significativas nas práticas de manejo agrícola, que melhoram ou degradam a qualidade/saúde do solo, apresentam um desacoplamento do equilíbrio atividade enzimática/COS.

Considerando um gráfico de dispersão que apresenta a relação entre AEM e COS, é possível definir quatro estados de saúde de solo, representados em quatro quadrantes distintos (Figura 1). O primeiro e o terceiro quadrantes indicam estados de equilíbrio do solo, enquanto o segundo e o quarto quadrantes indicam estados transitórios. O quadrante 1 (Q1) representa solos de alta qualidade, saudáveis e com elevados níveis de AEM e COS. Esses são solos onde boas práticas de manejo (BPM) foram adotadas por um longo período.

No entanto, a introdução de práticas de manejo inadequadas em solos de alta qualidade pode resultar em uma rápida redução da AEM, levando o solo a ser deslocado de Q1 para Q2 (Figura 1). Caso as práticas de manejo inadequadas persistam a longo prazo, o COS também diminui, atingindo um estado de equilíbrio inferior, compatível com o nível mais baixo de AEM anteriormente

alcançado. Isso trará a condição do solo para o estado de equilíbrio de baixa qualidade em Q3 (Figura 1).

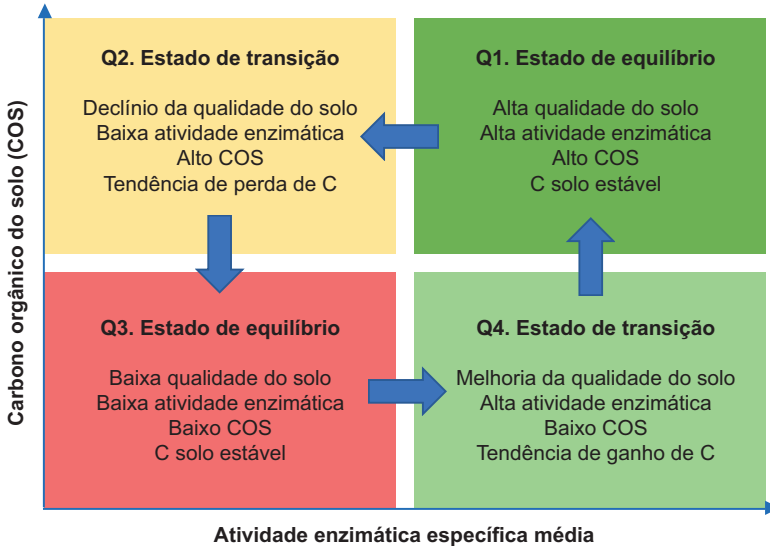


Figura 1. Representação esquemática do modelo de quatro quadrantes para avaliar as tendências de C no solo usando um gráfico de dispersão de atividade enzimática específica média (AEM) versus carbono orgânico do solo (COS). (Q: quadrante).

Um solo de baixa qualidade pode ser recuperado/regenerado com a introdução de práticas de manejo conservacionistas. Quando essas práticas são implementadas em solos no estado de equilíbrio em Q3, o componente biológico do solo é melhorado e a atividade enzimática (GLI e Aril) aumenta rapidamente, enquanto o COS não apresenta um aumento imediato. Dessa forma, a amostra de solo passa para o quadrante 4 (Q4, alta atividade enzimática/baixo COS). Mantidas as práticas conservacionistas de manejo a longo prazo, o COS eventualmente atinge um novo patamar (mais elevado) compatível com a atividade enzimática estabelecida anteriormente, levando o solo ao estado de equilíbrio de alta qualidade em Q1 (Figura 1).

É importante notar que as mudanças no estado de saúde do solo ao longo dos quatro quadrantes ocorrerão no sentido anti-horário (ver as setas na Figura 1), desde que as mudanças nas práticas de manejo do solo que eventualmente desacoplam os estados de equilíbrio sejam mantidas ao longo do

tempo. Isso ocorre porque o AEM, que representa a atividade enzimática, sempre aumentará ou diminuirá mais rapidamente do que o COS.

Descrição das fazendas de referência

Para validar o modelo de quatro quadrantes, foi utilizado um conjunto de dados com 102 amostras de solo de cinco fazendas comerciais localizadas na região do Cerrado, sob cultivos anuais e com históricos de manejo contrastantes. As fazendas foram classificadas em quatro grupos que constituíam fazendas com solos saudáveis, adoecendo, doente e em recuperação (grupos 1, 2, 3 e 4, respectivamente), conforme os resultados da BioAS (Figura 2).

Tipo de laudo	Enzima (ciclagem)	Matéria orgânica (armazenamento)
1 - Solo saudável	Alta	Alta
2 - Solo adoecendo	Baixa	Alta
3 - Solo doente	Baixa	Baixa
4 - Solo em recuperação	Alta	Baixa

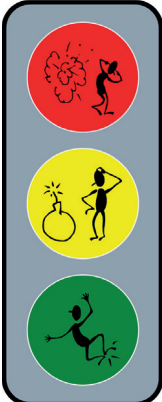


Figura 2. Representação esquemática dos quatro principais tipos de laudos da tecnologia BioAS Embrapa

Fonte: Mendes et al. (2021a).

- Grupo 1: representado por áreas com histórico de manejo conservacionista a longo prazo. Consistem em 26 talhões (com média de 65 ha) de uma fazenda em Chapadão do Sul, no estado de Mato Grosso do Sul, cultivados desde 1970. De 1970 a 1980, as áreas foram cultivadas com arroz e pastagens. O cultivo da soja iniciou-se em 1980. No período de 2000 até 2015, a fazenda cultivou soja/milho, sob plantio direto. Quando o milho é cultivado em primeira safra (data de plantio em outubro) ou segunda safra (data de plantio em fevereiro), é sucedido por culturas de cobertura como nabo forrageiro (*Raphanus*

sativus), *Crotalaria spectabilis* e braquiária (*Urochloa ruziziensis*). Desde 2015, as lavouras estão em plantio direto e integração lavoura-pecuária (ILP).

- Grupo 2: representado por áreas com adoção recente de manejo não conservacionista. Consistem em 47 talhões (com média de 120 ha) de uma fazenda em Tapurah, estado de Mato Grosso, que começou a ser cultivada na safra 2012/2013. Desde 2016 a fazenda é cultivada com soja/algodão sem a presença de plantas de cobertura. Houve uma operação de preparo mecânico (gradagem pesada) em 2019, dois anos antes da amostragem do solo (2021).
- Grupo 3: representado por áreas com manejo não conservacionista a longo prazo. Consistem em 22 talhões de duas fazendas localizadas em Diamantino (com média de 220 ha) e Querência (média de 180 ha), no estado de Mato Grosso. A fazenda de Diamantino (fazenda 3.1; talhões de 1 a 16) começou a ser cultivada na safra 2001/2002. Desde 2017, a fazenda é cultivada com soja/algodão sem culturas de cobertura. A última operação de preparo mecânico (gradagem pesada) também ocorreu em 2017 (4 anos antes da amostragem de solo em 2021). As áreas de Querência (fazenda 3.2; talhões 17 a 22) são cultivadas desde 2013/2014, e prevalece a monocultura de soja. A última operação de preparo mecânico (gradagem pesada) ocorreu em 2018, 3 anos antes da amostragem de solo em 2021.
- Grupo 4: representado por áreas com adoção recente de manejo conservacionista. Consistem em sete talhões (média de 25 ha) de uma fazenda em Jandaia, estado de Goiás cultivada desde 2002 até 2018 com soja, sem plantas de cobertura. A adoção de práticas agrícolas regenerativas começou em 2019, quando foi iniciado o cultivo de soja sob plantio direto em sucessão com uma mistura de braquiária (*Urochloa ruziziensis*) e sorgo (*Sorghum vulgare*).

Em todas as fazendas, os solos eram do tipo Latossolo Vermelho distrófico argiloso típico, com teores de argila variando de 48% a 60%. Todas as fazendas apresentavam teores adequados de macronutrientes, além de pontuarem nas classes alta ou muito alta na função suprimento de nutrientes da BioAS.

Os dados de localização e as propriedades químicas dessas fazendas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Localização, área (ha) e média das propriedades químicas do solo (0 cm a 10 cm profundidade) das fazendas agrupadas em quatro grupos quanto ao histórico de manejo⁽¹⁾.

Fazenda/ Grupo	Local	Área ha	pH (CaCl ₂)	H ⁺ Al ³⁺	CTC		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P
					----- cmol _c dm ⁻³ -----		-----	-----	mg dm ⁻³	mg dm ⁻³
1/1	Chapadão do Sul, MS	1.467	5,6	3,6	12,5	6,2	2,0	263	29	
2/2	Tapurah, MT	22.175	5,2	5,4	11,3	4,2	1,7	132	32	
3.1/3	Diamantino, MT	45.725	5,1	3,8	7,6	2,8	0,8	57	13	
3.2/3	Querência, MT	19.873	5,5	2,6	6,4	2,3	1,2	76	12	
4/4	Jandaia, GO	188	5,2	2,2	6,4	2,9	1,0	58	13	

⁽¹⁾ Segundo Sousa e Lobato (2004), para sistemas de produção de grãos em Latossolos argilosos do Cerrado, os níveis de adequação são os seguintes: pH (CaCl₂): 4,9 a 5,5; CTC: 9,1 a 13,5 cmol_c dm⁻³; Ca²⁺: 1,5 cmol_c dm⁻³ a 7,0 cmol_c dm⁻³; Mg²⁺: 0,5 cmol_c dm⁻³ a 2,0 cmol_c dm⁻³; K: 57 mg dm⁻³ a 80 mg dm⁻³; e P: 8,1 mg dm⁻³ a 12 mg dm⁻³.

Época e forma de amostragem

As áreas foram amostradas durante a fase de pós-colheita, entre abril e julho de 2021, ao final da estação chuvosa. Para a coleta de solo, foi realizada uma amostra composta de no mínimo 20 subamostras, por talhão, obtidas a uma profundidade de 0 cm a 10 cm.

Parâmetros avaliados

Todas as análises foram realizadas em laboratórios comerciais registrados na Rede Embrapa de BioAS¹.

As amostras de solo para determinação de GLI, Aril e COS foram preparadas de acordo com o conceito de amostra de solo Fertbio descrito em Mendes et al. (2019b). Resumidamente, as amostras foram secas ao ar, em temperatura ambiente, por até duas semanas, passadas por uma peneira de 2 mm e armazenadas em temperatura ambiente até que as análises fossem realizadas.

¹Para saber mais sobre a BioAS e sobre os laboratórios da rede Embrapa de BioAS: <https://shre.ink/IPWZ>
Curso na plataforma Enagro: <https://shre.ink/lb1S>

As atividades de GLI e Aril foram determinadas em duplicatas, incluindo um controle, conforme descrito em Tabatabai (1994). Devido ao curto período de incubação (uma hora), o reagente tolueno foi omitido dos ensaios. Os valores das atividades enzimáticas são expressos em mg de *p*-nitrofenol kg⁻¹ solo h⁻¹ (= mg PNP kg⁻¹ solo h⁻¹).

Os teores de COS foram determinados usando o método de Walkley e Black apud Nelson e Sommers (1996).

As análises químicas foram realizadas da seguinte forma: Ca²⁺ e Mg²⁺ foram extraídos com KCl 1N e determinados por absorção atômica. P e K⁺ foram extraídos pelo método Mehlich 1 (H₂SO₄ 0,0125 M + HCl 0,05 M), e determinados por espectrofotometria de chama (K⁺) e pelo método azul-Mo (P) (Claessen, 1997). A acidez potencial (H+Al³⁺) foi extraída com tampão acetato de sódio pH=7,0 e determinada por análise volumétrica usando NaOH na presença de fenolftaleína como indicador ácido-base. A capacidade de troca catiônica (CTC) foi determinada como a soma de H+Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺. A CTC foi expressa em cmolc.dm⁻³.

Cálculo da atividade enzimática específica média (AEM)

A fim de normalizar as atividades das enzimas em função do teor de COS, o valor de atividade de cada enzima (GLI e Aril) foi dividido pelo COS, resultando na atividade específica de GLI (AE-GLI) e Aril (AE-Aril), respectivamente (Trasar-Cepeda et al., 2008a, 2008b):

$$AE\text{-}GLI = GLI / COS$$

$$AE\text{-}Aril = Aril / COS$$

A atividade enzimática específica média (AEM) foi calculada com base na média de AE-GLI e AE-Aril:

$$AEM = (AE\text{-}GLI + AE\text{-}Aril) / 2$$

AAEM é expressa em g *p*-nitrofenol kg⁻¹ COS h⁻¹ (=g PNP kg⁻¹ COS h⁻¹)

Definições das linhas de corte no modelo de quatro quadrantes

O processo de definição das linhas de corte do modelo de quatro quadrantes é descrito detalhadamente em Chaer et al. (2023). Em resumo, os valores de COS e do AEM utilizados para definir os quatro quadrantes foram obtidos a partir de experimentos de longa duração conduzidos na Embrapa Cerrados pelo pesquisador Djalma Martinhão Gomes de Sousa (in memoriam), envolvendo doses e modos de aplicação de adubos fosfatados. As linhas de corte do modelo foram definidas com base nas relações entre os níveis de atividade de GLI e Aril, bem como dos teores de COS, com o rendimento acumulado de grãos (RAG) de soja e milho obtidos nesses experimentos (Figura 3). Os valores de GLI, Aril e COS correspondentes aos níveis de 50% do máximo rendimento de grãos (Figuras 3A, 3B, 3C) foram utilizados para a definição das linhas de corte para AEM e COS resultando em um gráfico AEM vs. COS com quatro quadrantes, conforme mostrado na Figura 3D.

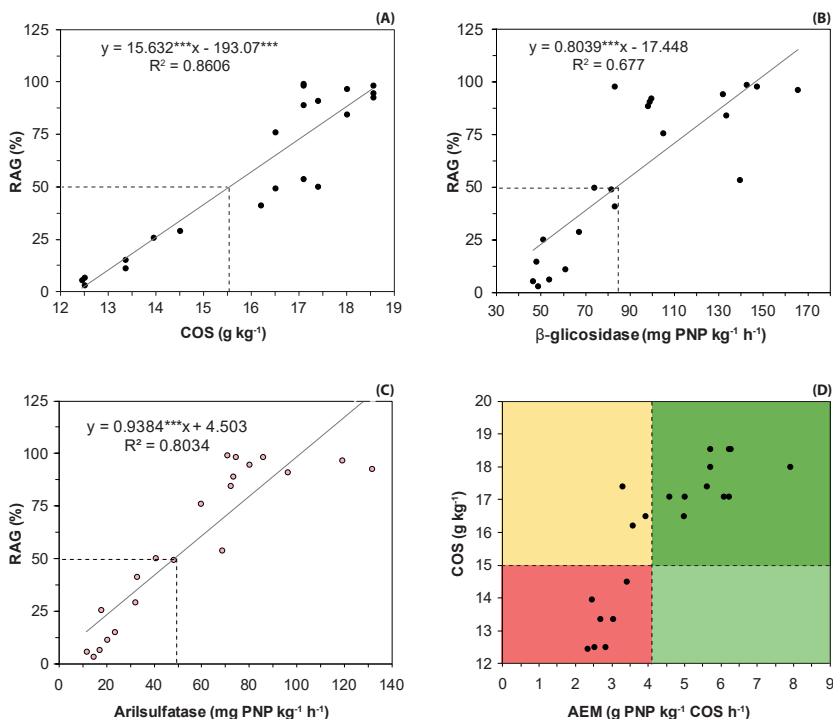


Figura 3. Relações entre o rendimento relativo acumulado de grãos (RAG) com o teor de carbono orgânico do solo (COS) (A), atividade de β -glicosidase (B) e atividade de Arilsulfatase (C) no conjunto de dados dos experimentos de longa duração sobre adubação fosfatada do Dr. Djalma Sousa (in memoriam). As linhas de corte para o COS ($15,5 \text{ g kg}^{-1}$) e para a atividade enzimática específica média (AEM: $4,26$) foram definidas com base em 50% do RAG. Esses valores foram utilizados para definir o modelo de quatro quadrantes em um gráfico de dispersão AEM vs. COS separando os dados obtidos nesse experimento conforme apresentado em (D). Os pontos nos gráficos representam as médias dos dados de enzimas e COS de 21 tratamentos, obtidos em dois anos de amostragem (2013 e 2015).

Dados das fazendas de referência

Nas Tabelas 2, 3, 4 e 5, são apresentados os valores de atividade das enzimas GLI e Aril, os teores de COS, a AEM, os teores de argila, a sequência de cultivos e o rendimento de grãos dos talhões nas fazendas dos quatro grupos. Já na Tabela 6, são apresentadas as médias dos dados de GLI e Aril, COS, AEM, teores de argila e rendimento de grãos dos talhões nas fazendas dos quatro grupos, considerando o período de 2018 a 2021. Nessa tabela, também são apresentadas as médias de aplicação de $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ e $\text{K}_2\text{O ha}^{-1}$ nessas fazendas durante o mesmo período.

Tabela 2. Atividade das enzimas Arilsulfatase (AriI) e β -glicosidase (GLI) e β -glucosidase (GLI), carbono orgânico do solo (COS), atividade enzimática específica média (AEM), teor de argila no solo e histórico do manejo das áreas de cultivo da fazenda do grupo 1. A produtividade de cada cultura é mostrada entre parênteses.

ID amostra	ID área	AriI		GLI	COS	AEM ⁽¹⁾	Argila %	Sequência de culturas e produtividade por ciclo anual ⁽²⁾				
		mg PNP kg ⁻¹ h ⁻¹	mg kg ⁻¹ h ⁻¹					2020/2021	2019/2020	2018/2019	2017/2018	
1	108043_Th.24-01	156	202	22,9	7,8	56						Past
2	108044_Th.24-02	159	174	23,5	7,1	51		S(67)+B	Past	Past		Past
3	108045_Th.05-01	187	233	25,9	8,1	51		S(90); M(115)+B	S(70); M(132)+B	S(78); M(115); Crot	S(65); M(208)+B	
4	108046_Th.06-01	191	191	24,5	7,8	51						
5	108047_Th.06-02	204	201	28,1	7,2	49		S(78); M(151)	S(66); M(150)+B	S(74); M(138)+B	S(78); M(208)+B	
6	108048_Th.08-01	197	213	26,0	7,9	51						
7	108049_Th.08-02	211	219	27,4	7,9	54		S(77); M(151)	S(65); M(128)+B	S(81); M(129)+B	S(69); M(208)+B	
8	108050_Th.9 12-01	184	215	25,1	8,0	49		S(72); M(145)+B	S(72); M(126)+B	S(78); M(136)+B	S(72); M(208)+Crot	
9	108051_Th.13-01	205	180	26,3	7,3	54						
10	108052_Th.13-02	201	160	27,0	6,7	51		S(76); M(129); Raph	S(70); M(143)+B	S(62); M(158)+B	S(68); M(208)+B	
11	108053_Th.14-01	189	167	24,8	7,2	56						
12	108054_Th.14-02	164	176	24,3	7,0	49		S(76); M(148)+B	S(75); M(123)+B	S(69); M(138)	S(65); M(208)+B	
13	108055_Th.15-01	124	181	24,0	6,4	44						
14	108056_Th.15-02	147	192	24,1	7,1	44		S(78); M(129); Crot	S(79); Raph	S(74); M(158)	S(66); M(208)	
15	108057_Th.16-01	161	166	27,2	6,0	44						
16	108058_Th.16-02	130	152	25,2	5,6	41		S(77); M(129)	S(79); M(132); Crot	S(64); M(168)	S(67); M(208)+B	
17	108059_Th.17-01	122	131	24,8	5,1	41						
18	108060_Th.17-02	161	171	24,2	6,9	39		S(77); M(129)+B	S(80); M(132); Crot	S(75); M(158)	S(64); M(208)+B	

Continua...

Tabela 2. Continuação.

ID amostra	ID área	Aritl mg PNP kg ⁻¹ h ⁻¹	GLI	COS g kg ⁻¹	AEM ⁽¹⁾ %	Argila %	Sequência de culturas e produtividade por ciclo anual ⁽²⁾			
							2020/2021	2019/2020	2018/2019	2017/2018
19	108061_Th.18-01	199	190	26,6	7,3	51	S(82); M(130)	S(75); M(77)+B	S(78); M(128)+B	S(67); M(208)+B
20	108062_Th.19-02	203	176	27,2	7,0	49	S(82); M(130)	S(75)+B	S(78)+B	S(67)+B
21	108063_Th.20-01	185	132	26,7	5,9	54	S(77); M(76)	S(72); M(132)	S(78); M(136)	S(67); M(208)B
22	108064_Th.20-02	201	136	26,6	6,3	54	S(77); M(76)	S(72); M(132)	S(78); M(136)	S(67); M(208)B
23	108065_Th. Furna 30-01	141	172	27,0	5,8	46	S(77); M(70)	S(66); M(132)	S(68)+B	S(67)+B
24	108066_Th. Furna 30-02	139	158	26,3	5,6	49	S(77); M(70)	S(66); M(132)	S(68)+B	S(67)+B
25	108067_Th. Furna 60-01	219	144	27,9	6,5	56	S(77)+B	Past	Past	Past
26	108068_Th. Furna 60-02	215	169	25,5	7,5	56	S(77)+B	Past	Past	Past
	Média	177	177	25,7	6,9	49,6	S(78)	S(73)	S(73)	S(66)

⁽¹⁾ AEM = ((GLI + Aritl) / 2) / COS. Valores expressos em g PNP kg⁻¹ COS h⁻¹.

⁽²⁾ S (soja); M (milho); B (braquiária); Crot (crotalária); Sg (sorgo); Raph (Raphanus sativus); Past (pastagem). "+" indica consórcio. Produtividades da soja e do milho expressas em número de sacas de 60 kg/ha. As áreas da fazenda têm sido utilizadas para cultivo desde 1970. De 1970 a 1980, foram cultivadas com arroz e pastagens extensivas. O cultivo de soja teve início em 1980. Desde o ano 2000, essas áreas estão sob rotação soja/milho. Após o cultivo do milho, seja na safra (plântio em outubro) seja na safinha (plântio em fevereiro), utiliza-se as culturas de cobertura *Raphanus sativus*, *Crotalaria spectabilis* e braquiária (*Urochloa ruzizienensis*). Desde 2015, a fazenda é manejada com integração lavoura-pecuária sob o sistema de plântio direto. As médias das aplicações de fertilizantes foram as seguintes: soja = 80 kg P₂O₅ ha⁻¹ + 90 kg K₂O ha⁻¹; milho = 150 kg N ha⁻¹ + 400 kg ha⁻¹ NPK (16-16-16).

Tabela 3. Atividade das enzimas Arilsulfatase (AriI) e β -glucosidase (Gli) e carbono orgânico do solo (COS), teor de argila no solo e histórico do manejo das áreas de cultivo da fazenda do grupo 2. A produtividade de cada cultura é mostrada entre parênteses.

ID amostra	ID área	AriI mg PNP kg ⁻¹ h ⁻¹	Gli kg kg ⁻¹ h ⁻¹	COS g kg ⁻¹	AEM ⁽¹⁾	Argila (%)	Sequência de culturas e produtividade por ciclo anual ⁽²⁾			
							2020/2021	2019/2020	2018/2019	2017/2018
1	TH L01-01-B	25	30	23,8	1,2	59				
2	TH L01-02-B	29	38	24,9	1,3	63				
3	TH L01-03-B	51	50	26,7	1,9	59	S(74); C†(320)	S(50); C†(343)	S(75); C†(316)	S
4	TH L01-01-B	27	37	23,8	1,3	51				
5	TH L01-02-B	27	44	27,3	1,3	53				
6	TH L01-03-B	8	74	26,1	1,6	60				
7	TH L02-01-B	28	39	33,1	1,0	55				
8	TH L02-02-B	21	36	23,2	1,2	55	S(70); C†(315)	S(65); C†(311)	S(71); M(78)	S(59); C†(297)
9	TH L02-03-B	14	17	24,9	0,6	59				
10	TH L 03	22	35	20,3	1,4	62	S(70); C†(303)	S(65); C†(342)	S(74); C†(290)	S(58); C†(295)
11	TH 05-01-B	36	62	24,9	2,0	57				
12	TH 05-02-B	25	44	24,4	1,4	63				
13	TH 05-03-B	38	69	20,3	2,6	51				
14	TH 05-01-B	42	72	19,7	2,9	52	S(71); C†(325)	S(63); C†(329)	S(63); C†(324)	S(65); C†(318)
15	TH 05-02-B	40	87	21,5	3,0	53				
16	TH 05-03-B	27	40	23,2	1,4	54				

Continua...

Tabela 3. Continuação.

ID amostra	ID área	Aril mg PNP kg ⁻¹ h ⁻¹	Gli kg ⁻¹ h ⁻¹	COS g kg ⁻¹	AEM ⁽¹⁾	Argila (%)	Sequência de culturas e produtividade por ciclo anual ⁽²⁾			
							2020/2021	2019/2020	2018/2019	2017/2018
17	TH 12-01-B	16	28	20,3	1,1	65				
18	TH 12-02-B	25	27	27,3	1,0	62				
19	TH 12-03-B	9	24	25,5	0,6	64				
20	TH 12-01-B	14	24	23,2	0,8	59	S(64); Ct(317)	S(61); Ct(283)	S(61); Ct(256)	S(71); Ct(295)
21	TH 12-02-B	36	40	30,2	1,3	55				
22	TH 12-03-B	16	33	20,9	1,2	55				
23	TH 15-01-B	24	45	28,4	1,2	57				
24	TH 15-02-B	15	34	23,8	1,0	56				
25	TH 15-03-B	26	32	21,5	1,4	54				
26	TH 15-01-B	27	49	29,0	1,3	51	S(79); Ct(297)	S(68); Ct(297)	S(45); Ct(277)	S(70); Ct(270)
27	TH 15-02-B	21	46	25,5	1,3	56				
28	TH 15-03-B	22	44	23,8	1,4	63				
29	TH 16-01-B	27	38	24,4	1,3	58				
30	TH 16-02-B	20	38	25,5	1,1	57				
31	TH 16-03-B	19	36	26,1	1,1	55	S(61); Ct(258)	S(62); Ct(295)	S(62); Ct(261)	S(72); C(313)
32	TH 16-01-B	14	33	29,0	0,8	49				
33	TH 16-02-B	9	34	23,8	0,9	62				

Continua...

Tabela 3. Continuação.

ID amostra	ID área	Aril mg PNP kg ⁻¹ h ⁻¹	Gli kg ⁻¹ h ⁻¹	COS g kg ⁻¹	AEM ⁽¹⁾ (%)	Argila (%)	Sequência de culturas	2019/2020	2018/2019	2017/2018
34	TH 19-01-B	35	65	27,3	1,8	60				
35	TH 19-02-B	33	49	26,7	1,5	57				
36	TH 19-03-B	28	55	22,0	1,9	60				
37	TH 19-01-B	26	30	30,2	0,9	47	S(63); Ct(322)	S(58); Ct(280)	S(71); Ct(260)	S(70); Ct(289)
38	TH 19-02-B	33	52	27,3	1,6	51				
39	TH 19-03-B	18	33	24,9	1,0	58				
40	TH 25-01-B	18	46	26,1	1,2	59				
41	TH 25-02-B	26	41	25,5	1,3	56	S(64); Ct(283)	S(68); Ct(275)	S(65); Ct(288)	S(70); Ct(262)
42	TH 25-01-B	35	46	29,6	1,4	57				
43	TH31	41	48	25,5	1,7	55	S(67); M(115)	S(61); M(113)	S(68); M(114)	S(64); M(114)
44	TH 33-01-B	26	61	30,2	1,4	55				
45	TH 33-02-B	17	42	24,9	1,2	60				
46	TH 33-01-B	11	29	26,7	0,7	57	S(64); Ct(280)	S(68); Ct(284)	S(63); Ct(303)	S(69); Ct(284)
47	TH 33-01-B	11	81	26,7	1,7	52				
	Média	25	44	25,3	1,4	57	S(68)	S(63)	S(64)	S(67)

⁽¹⁾ AEM = ((Gli + Aril) / 2) / COS. Valores expressos em g PNP kg⁻¹ COS h⁻¹.

⁽²⁾ A (algodão), S (soja), M (milho). Produtividades da soja e do milho expressas em número de sacas de 60 kg/ha. Produtividade de sementes de algodão expressas em @/ha. O cultivo teve início em 2012/2013. Nos últimos 5 anos, as áreas dessa fazenda, estão sob sistema intensivo de produção de soja/algodão sem a utilização de culturas de cobertura. Em 2019, o solo foi preparado com gradagem pesada, 1 ano antes da amostragem. As médias das aplicações de fertilizantes (2017–2021) foram as seguintes: soja = 73 kg P₂O₅ ha⁻¹ + 87 kg K₂O ha⁻¹; milho = 120 kg N ha⁻¹ + 50 kg P₂O₅ ha⁻¹ + 50 kg K₂O ha⁻¹; algodão = 160 kg N ha⁻¹ + 110 kg P₂O₅ ha⁻¹ + 120 kg K₂O ha⁻¹.

Tabela 4. Atividade das enzimas Arilsulfatase (AriI) e β -glicosidase (GLI) e β -glucosidase (GLI), carbono orgânico do solo (COS), atividade enzimática específica média (AEM), teor de argila no solo e histórico do manejo das áreas de cultivo das fazendas do grupo 3. A produtividade de cada cultura é mostrada entre parênteses.

ID amostra	ID área	AriI		GLI	COS	AEM ⁽¹⁾	Argila %	Seqüência de culturas e produtividade por ciclo anual ⁽²⁾				
		mg	PNP kg ⁻¹ h ⁻¹					2020/2021	2019/2020	2018/2019	2017/2018	
1	Lav. 134	51	27	12,5	3,1	57	S(63); A(225)	S(54); A(256)	S(72); A(293)	S(62); M(114)		
2	Lav. 155	59	42	13,8	3,7	60	S(62); A(196)	S(57); M(92)	S(63); M(118)	S(49); M(80)		
3	Lav. 89	33	48	11,3	3,6	48	S(89)					
4	Lav. 141	28	30	12,1	2,4	48	S(82); A(174)	S(53); A(255)	S(64); A(225)	S(61); A(239)		
5	Lav. 147	41	36	13,5	2,9	55	S(59); A(233)	S(62); A(276)	S(63); A(206)	S(46); M(92)		
6	Lav. 60	29	35	13,5	2,4	56	S(76); A(306)	S(59); A(276)	S(64); M(116)	S(58); A(240)		
7	Lav. 45	37	56	13,8	3,4	54	S(74); A(187)	S(57); A(294)	S(59); A(256)	S(51)		
8	Lav. 29	41	67	13,6	4,0	59	S(67); A(242)	S(71); A(307)	S(68); M(157)	S(57); A(288)		
9	Lav. 137	42	36	12,9	3,0	52	S(70); A(173)	S(61); A(249)	S(69); A(247)	S(67); M(115)		
10	Lav. 15	43	70	14,2	4,0	59	S(79); A(222)	S(67); A(259)	S(68); M(155)	S(66); A(288)		
11	Lav. 14	50	69	14,5	4,1	58	S(63); A(332)	S(64); A(282)	S(61); M(164)	S(59); A(277)		
12	Lav. 136	40	29	13,5	2,6	49	S(72); A(213)	S(57); A(260)	S(76); A(272)	S(28); M(125)		
13	Lav. 156	58	46	12,0	4,3	58	S(62); A(175)	S(47); M(88)	S(58); M(90)	S(48); M(79)		
14	Lav. 50	38	32	10,9	3,2	53	S(68); M(136)	S(49); M(101)	S(66); A(305)	S(63); M(115)		
15	Lav. 51	48	39	11,1	3,9	53	S(67); M(146)	S(46); A(263)	S(67); A(305)	S(63); M(116)		

Continua...

Tabela 4. Continuação.

ID amostra	ID área	Arlil mg PNP kg ⁻¹ h ⁻¹	GLI	COS g kg ⁻¹	AEM ⁽¹⁾ %	Argila %	Sequência de culturas e produtividade por ciclo anual ⁽²⁾				
							2020/2021	2019/2020	2018/2019	2017/2018	2017/2018
16	Lav. 23	46	63	13,8	3,9	61	S(68); A(202)	S(52); A(317)	S(53); A(346)	S(34); M(133)	S(61); M(103)
17	Lav. 25	8	59	11,0	3,0	44	S(59)	S(62)	S(66); M(55)	S(61); M(103)	
18	Lav. 29	9	54	9,3	3,4	56	S(67)	S(65)	S(61)	S(61); M(89)	
19	Lav. 19	14	67	10,4	3,9	48	S(71)	S(70)	S(78); M(81)	S(52)	
20	Lav. 21	13	61	10,7	3,4	46	S(73)	S(72)	S(68) M(66)	S(53)	
21	Lav. 28	8	51	11,0	2,7	56	S(69)	S(73)	S(59)	S(67); M(71)	
22	Lav. 35A	12	47	8,7	3,4	40	S(64)	S(55)	S(69)	S(65)	
	Média	34	48	12,2	3,4	53	S(69)	S(60)	S(62)	S(57)	

⁽¹⁾ AEM = ((GLI + Aril) / 2) / COS. Valores expressos em g PNP kg⁻¹ COS h⁻¹.

⁽²⁾ A (algodão), S (soja), M (milho). Produtividades da soja e do milho expressas em número de sacas de 60 kg/ha. Produtividade de sementes de algodão expressas em @/ha. As áreas de cultivo de 1 a 16 (fazenda 3.1) têm sido cultivadas desde 2001/2002. Nos últimos 5 anos, as áreas desta fazenda estão sob sistema intensivo de produção de soja/algodão sem a utilização de culturas de cobertura. A última operação mecânica para preparo do solo (gradagem pesada) ocorreu 5 anos antes da amostragem do solo. As médias de aplicações de fertilizantes (2017-2021) foram as seguintes: soja = 36 kg P₂O₅ ha⁻¹ + 87 kg K₂O ha⁻¹; milho = 117 kg N ha⁻¹ + 48 kg P₂O₅ ha⁻¹ + 67 kg K₂O ha⁻¹; algodão = 154 kg N ha⁻¹ + 114 kg P₂O₅ ha⁻¹ + 118 kg K₂O ha⁻¹.

As áreas de cultivo de 17 a 22 (fazenda 3.2) têm sido cultivadas desde 2013/2014. Nos últimos 5 anos, prevaleceu o cultivo da soja em monocultura. A última operação mecânica para preparo do solo (gradagem pesada) ocorreu 4 anos antes da amostragem do solo. As médias das aplicações de fertilizantes (2017-2021) foram as seguintes: soja = 87 kg P₂O₅ ha⁻¹ + 93 kg K₂O ha⁻¹; milho = 101 kg N ha⁻¹ + 48 kg P₂O₅ ha⁻¹ + 56 kg K₂O ha⁻¹.

Tabela 5. Atividade das enzimas Arilsulfatase (AriI) e β -glicosidase (GLI), carbono orgânico do solo (COS), atividade enzimática específica média (AEM), teor de argila no solo e histórico do manejo das áreas de cultivo das fazendas do grupo 4. A produtividade de cada cultura é mostrada entre parênteses.

ID amostra	ID área	AriI		GLI	COS	AEM ⁽¹⁾	Argila %	Sequência de culturas e produtividade por ciclo anual ⁽²⁾			
		mg	PNP kg ⁻¹ h ³					2020/21	2019/20	2018/19	2017/18
1	8009_sede 1	71	79	6.4	11.8	46	S(67); Sg(43)+B	S(77); Sg(62)+B	S(81); Sg(76)+B	S(68)	
2	8010_sede 2	68	60	9.3	6.9	42	S(69); Sg(40)+B	S(76); Sg(63)+B	S(80); Sg(72)+B	S(66)	
3	8011_sede 3	65	78	10.4	6.8	48	S(68); Sg(45)+B	S(78); Sg(61)+B	S(79); Sg(73)+B	S(71)	
4	8012_mariq 1	82	90	7.5	11.4	44	S(69); Sg(43)+B	S(77); Sg(64)+B	S(81); Sg(83)+B	S(67)	
5	8013_mariq 1	104	104	8.1	12.8	38	S(67); Sg(48)+B	S(76); Sg(60)+B	S(80); Sg(80)+B	S(73)	
6	8014_mariq 2	75	65	8.7	8.0	44	S(68); Sg(43)+B	S(77); Sg(59)+B	S(81); Sg(75)+B	S(65)	
7	8015_a.edio 1	82	85	8.1	10.3	32	S(68); Sg(38)+B	S(76); Sg(64)+B	S(82); Sg(72)+B	S(67)	
	Média	78.1	80.1	8.4	9.7	42.9					

⁽¹⁾ AEM = ((GLI + AriI) / 2) / COS. Valores expressos em g PNP kg⁻¹ COS h⁻¹.

⁽²⁾ S (Soja), Sg (Sorgo). O sinal "+;" indica cocultivo. Rendimento de soja e sorgo expresso em número de sacas de 60 kg/ha. Desde 2002 até 2018, este grupo incluiu uma fazenda cultivada com soja, sem culturas de cobertura. A atual propriedade cultiva a fazenda desde 2019, quando iniciou a adoção de práticas agrícolas regenerativas. Nos últimos 3 anos, a soja foi cultivada sob plantio direto em sucessão com uma mistura de braquiária de raiz profunda (*Urochloa ruziziensis*) e sorgo (*Sorghum vulgare*). As médias das aplicações de fertilizantes (2017–2021) foram as seguintes: soja = 92 kg P₂O₅ ha⁻¹ + 98 kg K₂O ha⁻¹.

Tabela 6. Teores médios de: argila, níveis de atividade enzimática (Aril e GLI), carbono orgânico do solo (COS), atividade enzimática específica média (AEM), rendimento de soja (Grãos) e teores de P_2O_5 e K_2O (P-K) utilizados nas fazendas de referência dos grupos 1 a 4 no período de 2018 a 2021.

Fazenda/Grupo	Local	Argila (%)	Aril mg PNP $kg^{-1} h^{-1}$	GLI $kg^{-1} h^{-1}$	COS g kg^{-1}	AEM ⁽¹⁾	Grão kg ha^{-1}	P-K ⁽²⁾
1/1	Chapadão do Sul, MS	50	177	177	25,7	6,9	4.351	80/90
2/2	Tapurah, MT	57	25	44	25,3	1,4	3.926	73/87
3.1/3	Diamantino, MT	55	43	45	13	3,0	3.692	36/87*
3.2/3	Querência, MT	52	28	49	12	4,0	3.900	87/93
4	Jandaia, GO	43	78	80	8,4	9,7	4.410	92/98

⁽¹⁾ P-K: $kg P_2O_5 ha^{-1} - kg K_2O ha^{-1}$.

⁽²⁾ AEM = $((GLI + Aril) / 2) / COS$. Valores expressos em $g PNP kg^{-1} COS h^{-1}$.

* Nesta fazenda, a aplicação de doses menores de adubo fosfatado na soja é compensada pela utilização de doses mais elevadas na cultura do algodão.

Na Figura 4, apresenta-se a representação gráfica do Modelo de Quatro Quadrantes com a plotagem das amostras de solo coletadas nas fazendas de referência dos grupos de 1 a 4. Usando as linhas de corte para o teor de COS ($15,5 \text{ g kg}^{-1}$ solo) e AEM ($4,26 \text{ g PNP kg}^{-1} \text{ COS h}^{-1}$) obtidos a partir dos dados dos experimentos de longa duração (Figura 3), cada grupo de amostras foi separado em um dos quatro quadrantes.

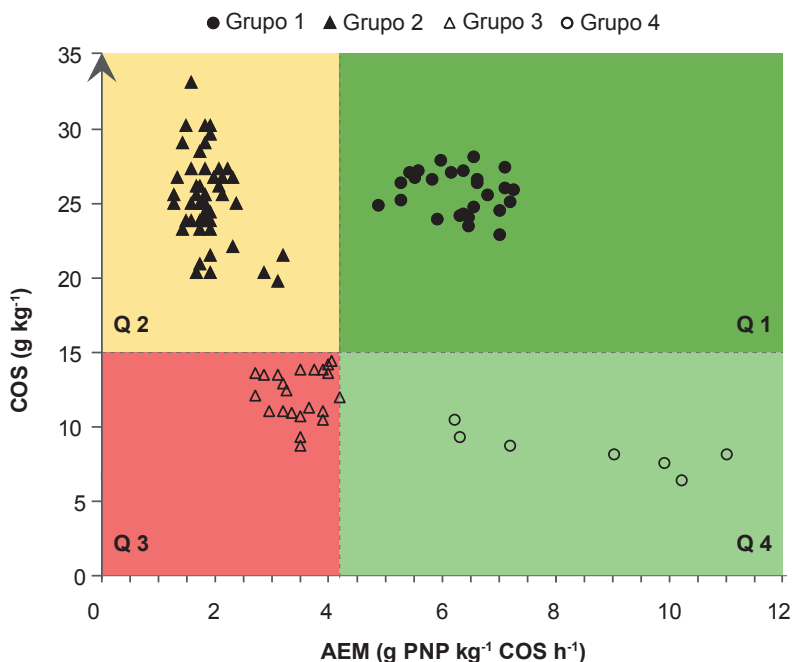


Figura 4. Amostras de solo (0 cm a 10 cm) do conjunto de dados das fazendas de referência dos grupos 1 a 4 plotadas no modelo de quatro quadrantes. As linhas de limite nos eixos x (AEM) e y (COS) foram definidas conforme descrito no item Definições das Linhas de Corte do Modelo de Quatro Quadrantes neste Documentos.

Fonte: Chaer et al. (2023).

Com base na plotagem das amostras das fazendas de referência dos grupos de 1 a 4 no modelo de quatro quadrantes (Figura 4), podem ser levantadas as seguintes observações:

- i) Todas as amostras de solo do grupo 1 foram plotadas em Q1, indicando solos com níveis elevados e estáveis de carbono orgânico e atividade biológica (alto COS/alto AEM). Este grupo representa áreas sob ILP em

plantio direto desde 2015. Além da presença de animais pastejando sob braquiária com sistema radicular profundo, que sucedeu a soja ou a sucessão soja/milho, um esquema de rotação de culturas de cobertura com crotalária, nabo forrageiro e sorgo também tem sido amplamente adotado nesta fazenda. Os sistemas de ILP são considerados uma forma estratégica de intensificação ecológica que se beneficia do sinergismo entre solo, plantas e animais. Esses sistemas possuem características únicas, que incluem a diversificação das atividades agrícolas e a promoção de funções agrícolas complexas que garantem maior produtividade, rentabilidade e sustentabilidade (Lemaire et al., 2014; Salton et al., 2014; Anghinoni; Vezzani, 2021).

- ii) Todas as amostras de solo do grupo 2 foram plotadas em Q2, indicando solos com baixa atividade biológica e com tendência a perda de carbono orgânico (alto COS/baixo AEM). Este grupo inclui áreas recentemente convertidas para agricultura (menos de 10 anos) e sob sistemas intensivos de produção de soja/algodão sem culturas de cobertura.
- iii) Todas as amostras de solo, exceto uma (localizada na intersecção entre Q3 e Q4) do grupo 3, foram plotadas em Q3, indicando a predominância de solos com níveis baixos e estáveis de carbono orgânico e atividade biológica (baixo COS/baixo AEM). Este grupo é composto por duas fazendas. A primeira é cultivada há mais de 20 anos (soja e milho). Desde 2017, vem sendo cultivada com sistemas de produção mais intensivos de soja/algodão, sem plantas de cobertura. Na segunda fazenda, cultivada há 8 anos, predomina a monocultura da soja (desde 2013). Ambas as fazendas não tinham histórico de uso de plantas de cobertura nos 4 anos anteriores a este estudo. Os sistemas de produção de algodão e soja, com baixa entrada de biomassa, possuem alto potencial de lucratividade, mas historicamente têm sido prejudiciais à sustentabilidade dos recursos naturais (Reeves, 1997; Mbuthia et al., 2015; Lopes et al., 2021; Ferreira et al., 2020).
- iv) Todas as amostras de solo do grupo 4 foram plotadas em Q4, indicando solos com alta atividade biológica e tendência a ganho de carbono orgânico (baixo COS/alto AEM). Este grupo incluiu uma fazenda cultivada de 2002 a 2018 com soja sem plantas de cobertura. Desde 2019, são

adotadas práticas agrícolas regenerativas, em que a soja e o milho são plantados em sucessão com uma mistura de braquiária e sorgo.

Além dos aspectos relacionados ao tamanho das fazendas (de 200 ha até 45.000 ha) e aos sistemas de produção (ILP, soja/algodão; monocultivo de soja, soja/milho + braquiária), que influenciam diretamente nos procedimentos operacionais diários das lavouras, um aspecto muito importante e que merece destaque com base na Figura 4 e nos dados apresentados na Tabela 6, é o desempenho econômico das fazendas nos diferentes grupos. Nas fazendas dos grupos 1 e 4 (solos de alta qualidade ou em recuperação), os rendimentos médios de grãos de soja dos últimos 4 anos foram de 4.351 kg ha⁻¹ e 4.410 kg ha⁻¹, respectivamente. Já nas fazendas dos grupos 2 e 3 (solos em degradação ou degradados), os rendimentos médios foram de 3.926 kg ha⁻¹ e 3.717 kg ha⁻¹, respectivamente (Tabela 6). Esse padrão mostra claramente os benefícios de um ambiente com o solo saudável (de alta qualidade) para a obtenção de maiores produtividades.

Outro aspecto interessante é que, embora as fazendas dos grupos 2 e 3 tenham apresentado as menores produtividades, elas foram superiores à média brasileira de produtividade da soja em 2020/2021 equivalente a 3.525 kg ha⁻¹ (Conab, 2022). Ou seja, os dados mostram que os níveis de produtividade nessas fazendas poderiam ser ainda maiores, caso manejos conservacionistas fossem adotados, modificando a condição desses solos para aquelas definidas nos quadrantes Q4 e Q1. Esses dados reforçam a importância da presença de solos saudáveis para a manutenção de lavouras de alta produtividade.

Por fim, outro aspecto que merece destaque é que, com exceção da fazenda 3.1, em que a aplicação reduzida de P₂O₅ na soja é compensada por uma maior adubação no algodão, os níveis médios de adubação da soja (kg P₂O₅ ha⁻¹; kg K₂O ha⁻¹) nas demais fazendas foram semelhantes. Níveis diferenciados de rendimento de grãos, associados a níveis semelhantes de adubação evidenciam uma maior eficiência de uso de nutrientes (EUN) nas fazendas onde o solo é saudável ou está em processo de regeneração (Q1 e Q4), demonstrando mais uma vantagem dos solos saudáveis que vai além dos níveis de produtividade.

Relação entre o modelo de quatro quadrantes e laudos da BioAS

É possível relacionar o modelo de quatro quadrantes com os quatro padrões típicos de laudos da BioAS (Mendes et. al., 2021a). Esses padrões são determinados com base nas pontuações das funções ciclagem de nutrientes (associada à atividade enzimática) e armazenamento de nutrientes (associada à matéria orgânica e à capacidade de troca catiônica – CTC) conforme demonstrado na Figura 5.

Nas Figuras 6, 7, 8 e 9, são apresentados os laudos da BioAS das fazendas de referência classificadas nos grupos de 1 a 4. Importante observar que, nos laudos da BioAS, são apresentados os teores de matéria orgânica do solo (MOS) e que, o $COS = MOS/1,724$. Na Figura 6, referente à fazenda 1, o aspecto visual do laudo da BioAS, com predominância da cor verde, indica que os talhões da propriedade agrícola estavam em excelente condição com relação às funções F1 – Ciclar e F2 – Armazenar, indicando um solo saudável. No modelo de quatro quadrantes, essa condição é semelhante à do Q1. Em situações como essa, recomenda-se a manutenção das práticas de manejo adotadas na propriedade.

Tipo de laudo	Função ciclagem de nutrientes (enzimas)	Função armazenamento de nutrientes (MOS+CTC)	Modelo de quatro quadrantes / Tendência COS
1 - Solo "saudável" / alta qualidade	Alta	Alta	Q1 / estável
2 - Solo "adoecendo" / perda de qualidade	Baixa	Alta	Q2 / perda
3 - Solo "doente" / baixa qualidade	Baixa	Baixa	Q3 / estável
4 - Solo "recuperando" / ganho de qualidade	Alta	Baixa	Q4 / ganho

Figura 5. Principais tipos de laudo da BioAS encontrados em fazendas de produção de grãos no Cerrado em função dos padrões de cores das funções ciclagem de nutrientes (associada à atividade enzimática) e armazenamento de nutrientes (associada à matéria orgânica e à capacidade de troca catiônica) e a relação destes padrões com o modelo de quatro quadrantes.

Amostra	Aril	GLI	Argila	MOS	IQS _{Ferribio}	IQS _{Biológico}	IQS _{Químico}	Ciclagem de nutrientes	Armazenamento de nutrientes	Suprimento de nutrientes
108043_Th. 2.4 -01 0-10	156	202	56	40	0.90	0.88	0.91	0.88	0.93	0.89
108044_Th. 2.4 -02 0-10	159	174	51	40	0.92	0.91	0.93	0.91	0.97	0.89
108045_Th. 05 -01 0-10	187	233	51	45	0.94	0.97	0.93	0.97	0.98	0.88
108046_Th. 06 -01 0-10	191	191	51	42	0.93	0.94	0.93	0.94	0.97	0.89
108047_Th. 06 -02 0-10	204	201	48,5	48	0.95	0.97	0.94	0.97	0.99	0.89
108048_Th. 08 -01 0-10	197	213	51	45	0.94	0.96	0.93	0.96	0.98	0.89
108049_Th. 08 -02 0-10	211	219	53,5	47	0.94	0.96	0.94	0.96	0.98	0.89
108050_Th. 9.12 -01 0-10	184	215	48,5	43	0.95	0.97	0.94	0.97	0.98	0.89
108051_Th. 13 c po de rocha -01 0-10	205	180	53,5	45	0.92	0.92	0.92	0.92	0.96	0.88
108052_Th. 13 c po de rocha -02 0-10	201	160	51	47	0.92	0.91	0.93	0.91	0.98	0.88
108053_Th. 14 -01 0-10	189	167	56	43	0.90	0.87	0.91	0.87	0.94	0.89
108054_Th. 14 -02 0-10	164	176	48,5	42	0.94	0.94	0.94	0.94	0.98	0.89
108055_Th. 15 -01 0-10	124	181	43,5	41	0.94	0.95	0.93	0.95	0.99	0.88
108056_Th. 15 -02 0-10	147	192	43,5	42	0.95	0.97	0.93	0.97	0.99	0.88
108057_Th. 16 -01 0-10	161	166	43,5	47	0.94	0.96	0.94	0.96	0.99	0.88
108058_Th. 16 -02 0-10	130	152	41	43	0.94	0.95	0.94	0.95	0.99	0.88
108059_Th. 17 -01 0-10	122	131	41	43	0.93	0.92	0.94	0.92	0.99	0.88
108060_Th. 17 -02 0-10	161	171	38,5	42	0.95	0.98	0.93	0.98	0.99	0.88
108061_Th. 18 19 -01 0-10	199	190	51	46	0.94	0.95	0.94	0.95	0.99	0.89
108062_Th. 18 19 -02 0-10	203	176	48,5	47	0.94	0.95	0.94	0.95	0.99	0.89
108063_Th. 20 -01 0-10	185	132	53,5	46	0.90	0.84	0.93	0.84	0.96	0.89
108064_Th. 20 -02 0-10	201	136	53,5	46	0.91	0.85	0.93	0.85	0.98	0.89
108065_Th. Furna 30 -01 0-10	141	172	46	47	0.94	0.94	0.94	0.94	0.99	0.89
108066_Th. Furna 30 -02 0-10	139	158	48,5	45	0.92	0.90	0.94	0.90	0.99	0.89
108067_Th. Furna 60 -01 0-10	219	144	56	48	0.90	0.85	0.92	0.85	0.96	0.89
108068_Th. Furna 60 -02 0-10	215	169	56	44	0.91	0.89	0.91	0.89	0.94	0.89

Figura 6. Laudo da BioAS de amostras de solo coletadas na fazenda do grupo 1. Os tons verdes indicam valores adequados para os resultados de análises de Arilsulfatase (Aril), β -glicosidase (GLI) e matéria orgânica do solo (MOS), assim como para os índices e funções do solo apresentados. O laudo indica as funções ciclagem de nutrientes e armazenamento de nutrientes em níveis adequados, o que corresponde ao padrão definido em Q1 no modelo de quatro quadrantes, indicando solos com níveis elevados e estáveis de carbono orgânico e atividade biológica (solo saudável). Dados obtidos pela Rede Embrapa BioAS.

ID amostra	ID campo	Aril	GLI	MOS	Argila	IQS _{Ferbio}	IQS _{Biológico}	IQS _{Químico}	Ciclagem de nutrientes	Armazenamento de nutrientes	Suprimento de nutrientes
1	Th. L01 - 01 - B	25	30	41	59	0,66	0,32	0,83	0,32	0,80	0,85
2	Th. L01 - 02 - B	29	38	43	63	0,66	0,34	0,82	0,34	0,80	0,84
3	Th. L01 - 03 - B	51	50	46	59	0,73	0,46	0,87	0,46	0,88	0,86
4	Th. L01 - 01 - B	27	37	41	51	0,71	0,37	0,88	0,37	0,91	0,84
5	Th. L01 - 02 - B	27	44	47	53	0,73	0,39	0,90	0,39	0,96	0,84
6	Th. L01 - 03 - B	8	74	45	60	0,68	0,36	0,84	0,36	0,91	0,78
7	Th. L02 - 01 - B	28	39	57	55	0,74	0,37	0,93	0,37	0,99	0,86
8	Th. L02 - 02 - B	21	36	40	55	0,68	0,33	0,85	0,33	0,85	0,85
9	Th. L02 - 03 - B	14	17	43	59	0,63	0,24	0,83	0,24	0,87	0,79
10	Th. L 03	22	35	35	62	0,57	0,32	0,70	0,32	0,60	0,80
11	Th. 05 - 01 - B	36	62	43	57	0,73	0,45	0,86	0,45	0,88	0,85
12	Th. 05 - 02 - B	25	44	42	63	0,65	0,35	0,81	0,35	0,79	0,83
13	Th. 05 - 03 - B	38	69	35	51	0,70	0,51	0,80	0,51	0,76	0,84
14	Th. 05 - 01 - B	42	72	34	52	0,70	0,53	0,78	0,53	0,71	0,85
15	Th. 05 - 02 - B	40	87	37	53	0,75	0,55	0,85	0,55	0,80	0,90
16	Th. 05 - 03 - B	27	40	40	54	0,66	0,37	0,81	0,37	0,86	0,76
17	Th. 12 - 01 - B	16	28	35	65	0,55	0,27	0,69	0,27	0,59	0,78
18	Th. 12 - 02 - B	25	27	47	62	0,69	0,31	0,88	0,31	0,92	0,85
19	Th. 12 - 03 - B	9	24	44	64	0,61	0,23	0,80	0,23	0,83	0,77
20	Th. 12 - 01 - B	14	24	40	59	0,68	0,26	0,88	0,26	0,83	0,94
21	Th. 12 - 02 - B	36	40	52	55	0,74	0,40	0,92	0,40	0,98	0,86
22	Th. 12 - 03 - B	16	33	36	55	0,62	0,31	0,77	0,31	0,74	0,81
23	Th. 15 - 01 - B	24	45	49	57	0,72	0,36	0,90	0,36	0,95	0,85
24	Th. 15 - 02 - B	15	34	41	56	0,67	0,30	0,85	0,30	0,87	0,83
25	Th. 15 - 03 - B	26	32	37	54	0,67	0,35	0,83	0,35	0,78	0,88
26	Th. 15 - 01 - B	27	49	50	51	0,74	0,41	0,91	0,41	0,98	0,84
27	Th. 15 - 02 - B	21	46	44	56	0,70	0,36	0,87	0,36	0,89	0,85
28	Th. 15 - 03 - B	22	44	41	63	0,66	0,34	0,82	0,34	0,78	0,85
29	Th. 16 - 01 - B	27	38	42	58	0,69	0,35	0,86	0,35	0,86	0,86
30	Th. 16 - 02 - B	20	38	44	57	0,69	0,33	0,88	0,33	0,90	0,85
31	Th. 16 - 03 - B	19	36	45	55	0,70	0,33	0,89	0,33	0,92	0,86
32	Th. 16 - 01 - B	14	33	50	49	0,71	0,31	0,91	0,31	0,99	0,83
33	Th. 16 - 02 - B	9	34	41	62	0,63	0,26	0,81	0,26	0,76	0,86
34	Th. 19 - 01 - B	35	65	47	60	0,74	0,44	0,88	0,44	0,92	0,85
35	Th. 19 - 02 - B	33	49	46	57	0,72	0,41	0,88	0,41	0,92	0,84
36	Th. 19 - 03 - B	28	55	38	60	0,65	0,39	0,79	0,39	0,73	0,84
37	Th. 19 - 01 - B	26	30	52	47	0,70	0,36	0,87	0,36	1,00	0,74
38	Th. 19 - 02 - B	33	52	47	51	0,74	0,44	0,89	0,44	0,97	0,80
39	Th. 19 - 03 - B	18	33	43	58	0,63	0,31	0,79	0,31	0,86	0,72
40	Th. 25 - 01 - B	18	46	45	59	0,65	0,34	0,80	0,34	0,89	0,72
41	Th. 25 - 02 - B	26	41	44	56	0,70	0,36	0,87	0,36	0,91	0,83
42	Th. 25 - 01 - B	35	46	51	57	0,76	0,43	0,92	0,43	0,99	0,86
43	Th. 31	41	48	44	55	0,73	0,44	0,87	0,44	0,91	0,84
44	Th. 33 - 01 - B	26	61	52	55	0,73	0,42	0,89	0,42	0,99	0,79
45	Th. 33 - 02 - B	17	42	43	60	0,67	0,32	0,85	0,32	0,89	0,81
46	Th. 33 - 01 - B	11	29	46	57	0,65	0,27	0,85	0,27	0,93	0,76
47	Th. 33 - 01 - B	11	81	46	52	0,75	0,43	0,91	0,43	0,96	0,86

Figura 7. Laudo da BioAS de amostras de solo coletadas na fazenda do grupo 2. Os tons verdes indicam valores adequados, os tons laranja-vermelho, valores inadequados e em amarelo, valores intermediários, para os resultados de análises de Arilsulfatase (Aril), β -glicosidase (GLI) e matéria orgânica do solo (MOS), assim como para os índices e funções do solo apresentados. O laudo indica a função ciclagem de nutrientes em nível inadequado e a função armazenamento de nutrientes em nível adequado, o que corresponde ao padrão definido em Q2 no modelo de quatro quadrantes, indicando solos com baixa atividade biológica e com tendência a perda de carbono orgânico (solos adoecendo). Os dados foram obtidos pelos laboratórios da Rede Embrapa de BioAS.

ID amostra	ID campo	Aril	GLI	MOS	Argila	IQS _{Ferbio}	IQS _{biológico}	IQS _{Químico}	Ciclagem de nutrientes	Armazenamento de nutrientes	Suprimento de nutrientes
1	Lav. 134	51	27	22	57	0,51	0,41	0,56	0,41	0,30	0,82
2	Lav. 155	59	42	24	60	0,52	0,46	0,54	0,46	0,29	0,80
3	Lav. 89	33	48	20	48	0,54	0,44	0,59	0,44	0,40	0,77
4	Lav. 141	28	30	21	48	0,52	0,37	0,60	0,37	0,44	0,75
5	Lav. 147	41	36	23	55	0,51	0,41	0,56	0,41	0,33	0,78
6	Lav. 60	29	35	23	56	0,53	0,36	0,62	0,36	0,38	0,85
7	Lav. 45	37	56	24	54	0,56	0,45	0,62	0,45	0,43	0,81
8	Lav. 29	41	67	23	59	0,56	0,47	0,61	0,47	0,37	0,85
9	Lav. 137	42	36	22	52	0,54	0,42	0,60	0,42	0,42	0,78
10	Lav. 15	43	70	24	59	0,57	0,49	0,62	0,49	0,39	0,85
11	Lav. 14	50	69	25	58	0,59	0,51	0,63	0,51	0,41	0,85
12	Lav. 136	40	29	23	49	0,54	0,41	0,60	0,41	0,44	0,75
13	Lav. 156	58	46	21	58	0,51	0,48	0,53	0,48	0,25	0,80
14	Lav. 50	38	32	19	53	0,47	0,39	0,51	0,39	0,18	0,84
15	Lav. 51	48	39	19	53	0,50	0,45	0,52	0,45	0,25	0,79
16	Lav. 23	46	63	24	61	0,57	0,47	0,62	0,47	0,38	0,86
17	Lav. 25	8	59	19	44	0,46	0,38	0,50	0,38	0,29	0,72
18	Lav. 29	9	54	16	56	0,38	0,33	0,41	0,33	0,08	0,74
19	Lav. 19	14	67	18	48	0,40	0,42	0,40	0,42	0,17	0,63
20	Lav. 21	13	61	18	46	0,44	0,40	0,46	0,40	0,22	0,71
21	Lav. 28	8	51	19	56	0,36	0,31	0,39	0,31	0,12	0,65
22	Lav. 35A	12	47	15	40	0,41	0,38	0,43	0,38	0,20	0,65

Figura 8. Laudo da BioAS de amostras de solo coletadas nas fazendas do grupo 3. Os tons verdes indicam valores adequados, os tons laranja-vermelho, valores inadequados e em amarelo, valores intermediários, para os resultados de análises de Arilsulfatase (Aril), β -glicosidase (GLI) e matéria orgânica do solo (MOS), assim como para os índices e funções do solo apresentados. O laudo indica as funções ciclagem de nutrientes e armazenamento de nutrientes predominantemente em níveis intermediários a inadequados, o que corresponde ao padrão definido em Q3 no modelo de quatro quadrantes, indicando solos com níveis baixos e estáveis de carbono orgânico e atividade biológica (solos doentes). Os dados foram obtidos pelos laboratórios da Rede Embrapa de BioAS.

Amostra	Aril	GLI	MOS	Argila	IQS _{Ferbio}	IQS _{biológico}	IQS _{Químico}	Ciclagem de nutrientes	Armazenamento de nutrientes	Suprimento de nutrientes
8009_Sede 1	71	79	11	46	0,58	0,64	0,55	0,64	0,24	0,86
8010_Sede 2	68	60	16	42	0,65	0,64	0,66	0,64	0,44	0,88
8011_Sede 3	65	78	18	48	0,57	0,58	0,56	0,58	0,27	0,85
8012_Mariquinha 1	82	90	13	44	0,54	0,73	0,45	0,73	0,14	0,75
8013_Mariquinha 2	104	104	14	38	0,57	0,89	0,40	0,89	0,26	0,55
8014_Mariquinha 2 área 1	75	65	15	44	0,52	0,64	0,45	0,64	0,31	0,60
8015_Área Edio 1	82	85	14	32	0,55	0,89	0,38	0,89	0,26	0,49

Figura 9. Laudo da BioAS de amostras de solo coletadas nas fazendas do grupo 4. Os tons verdes indicam valores adequados, os tons laranja-vermelho, valores inadequados e em amarelo, valores intermediários, para os resultados de análises de Arilsulfatase (Aril), β -glicosidase (GLI) e matéria orgânica do solo (MOS), assim como para os índices e funções do solo apresentados. O laudo indica a função ciclagem de nutrientes em nível adequado e a função armazenamento de nutrientes em nível inadequado, o que corresponde ao padrão definido em Q4 no modelo de quatro quadrantes, indicando solos com alta atividade biológica e tendência a ganho de carbono orgânico (solo em recuperação). Dados obtidos pela Rede Embrapa de BioAS.

Na Figura 7, referente à fazenda do grupo 2, o laudo mostra a predominância de tons vermelhos-alaranjados na coluna de ciclagem e predominância de tons verde claro e verde escuro na coluna de armazenamento, indicando que o solo está em um processo de degradação sob o ponto de vista biológico e, conseqüentemente, está adoecendo (perdendo qualidade). No modelo de quatro quadrantes, essa condição corresponde ao quadrante Q2. É importante destacar que a pontuação da função Armazenamento de Nutrientes ainda se encontra em patamares adequados (indicado pelas cores verde-clara e verde-escura), pois as alterações na matéria orgânica do solo (MOS) ocorrem de maneira mais lenta e gradual que nas enzimas. Diante desse tipo de laudo, aconselha-se uma avaliação criteriosa das práticas de manejo que vêm sendo adotadas na propriedade agrícola para evitar perdas nos teores de MOS em médio ou em longo prazos.

O laudo das fazendas do grupo 3 é apresentado na Figura 8. À medida que o processo de degradação do solo perdura, a função Ciclagem de Nutrientes é comprometida, resultando em redução dos teores de MOS. Isso acarreta um predomínio das cores alaranjada e vermelha na função Armazenamento de Nutrientes, indicando uma condição similar à de Q3 no modelo de quatro quadrantes. A perda de MOS e a redução da atividade biológica são indicativos de um solo doente (baixa qualidade), exigindo que práticas de manejo regenerativas sejam adotadas com urgência.

O laudo da fazenda do grupo 4, apresentado na Figura 9, ilustra o processo de recuperação de um solo doente ou de baixa qualidade (comprometimentos nas funções Ciclagem de Nutrientes e Armazenamento de Nutrientes). Nesse laudo, os níveis de atividade enzimática, representados na função Ciclagem de Nutrientes, encontram-se em patamares elevado/muito elevado (verde-clara/verde-escura), enquanto os níveis de MOS/CTC, representados na função Armazenamento de Nutrientes, permanecem nos níveis baixo/muito baixo (alaranjado/vermelho escuro). Esses resultados indicam que as práticas de manejo utilizadas estão impactando positivamente o solo e que ele está em processo de recuperação do ponto de vista biológico. O uso contínuo e persistente de práticas de manejo regenerativas resultará, ao longo do tempo, em aumentos nos teores de MOS com conseqüente aumento dos escores da função Armazenamento de Nutrientes. O tempo necessário para que isso aconteça dependerá das condições edafoclimáticas locais e das práticas regenerativas adotadas (intensidade e duração).

Conforme já mencionado, a sensibilidade das enzimas como bioindicadores capazes de detectar precocemente se o solo está em processo de perda ou ganho de qualidade (em processo de adoecimento ou de recuperação) fica evidente nos laudos transicionais apresentados nas Figuras 7 e 9. Nessas situações, as enzimas atuam como mensageiras de más (Figura 7) e de boas notícias (Figura 9). No laudo da Figura 7, as enzimas alertam para o fato de que as práticas de manejo utilizadas na propriedade rural estão causando a degradação do solo. Já no laudo da Figura 9, o aumento na atividade enzimática em solos com baixos teores de MOS serve para estimular os agricultores que estão adotando práticas de manejo que possibilitem a recuperação da qualidade/saúde do solo.

Um aspecto importante que deve ser destacado nos laudos é que, com exceção de três talhões na fazenda do grupo 4, todos os demais talhões das cinco fazendas avaliadas obtiveram pontuação verde para a função Suprimento de Nutrientes. Isso indica que os solos estavam com acidez corrigida e níveis adequados de disponibilidade de macronutrientes para as culturas, conforme verificado na Tabela 1. Enquanto as funções Ciclagem e Armazenamento de Nutrientes são interdependentes e influenciadas pelo uso e manejo do solo de forma mais ampla (ex., sistema de plantio, rotação de culturas, ILP etc.), a função Suprimento está diretamente relacionada ao manejo da adubação e calagem do solo. O suprimento adequado de nutrientes é tão crucial quanto a ciclagem e o armazenamento, em um contexto de uso do solo para produção de alimentos, fibras ou energia. Um solo empobrecido em nutrientes dificilmente alcançará altas produtividades, que são essenciais para promover a maquinaria biológica do solo e a formação e acúmulo de MOS em longo prazo. Entretanto, como já mencionado, apenas condições químicas adequadas não garantem solos saudáveis e produtivos.

Lições aprendidas nas fazendas de referência

- i. Mudanças na atividade enzimática do solo ocorrem no curto prazo, independentemente das mudanças no COS em Latossolos argilosos tropicais. Esse fato corrobora estudos anteriores que mostraram que as enzimas GLI e Aril são mais sensíveis que o COS em resposta a mudanças no manejo do solo (Bandick; Dick, 1999; Ndiaye et al., 2000; Stott et al., 2010;

Dick; Burns, 2011; Mendes et al., 2018). Este comportamento torna as enzimas ecossensores, capazes de detectar, como radares, os efeitos benéficos e prejudiciais das práticas de manejo na saúde do solo. Além disso, sua sensibilidade as torna estratégicas como ferramentas de apoio às tomadas de decisões de manejo do solo e permitem identificar tendências de alteração do COS no longo prazo.

- ii. A média de rendimento de grãos de soja nos últimos 4 cultivos foi superior em 550 kg/ha nas áreas com solo na condição de Q1 (saudável) e Q4 (em recuperação) em relação às lavouras em Q2 (solo adoecendo) e Q3 (solo doente). Esses dados evidenciam os benefícios de um ambiente de solo saudável e de alta qualidade para a obtenção de maiores produtividades.
- iii. A seleção de um conjunto mínimo de indicadores para o monitoramento da saúde/qualidade do solo não precisa ser uma tarefa onerosa e complicada. Com o uso da análise da atividade de apenas duas enzimas e dos teores de COS na camada de 0 cm a 10 cm, é possível identificar a condição de saúde/qualidade de um solo, sabendo se ele está saudável (alto COS/alta atividade biológica), adoecendo (alto COS/baixa atividade enzimática), doente (baixo COS/baixa atividade enzimática) ou em recuperação (baixo COS/alta atividade enzimática).
- iv. Nos sistemas de produção agrícola no Cerrado, a adoção de sistemas ou práticas de manejo como o plantio direto (sem revolvimento do solo), a rotação de culturas, o uso de plantas de cobertura e a ILP constituem o caminho natural para a obtenção de solos saudáveis e resilientes, o que é essencial para garantir a sustentabilidade da produção agrícola a longo prazo.

Nas novas etapas de desenvolvimento da tecnologia BioAS, esse modelo será expandido para novas culturas (cana de açúcar, café, pastagens e plantios de eucalipto) visando ampliar o monitoramento da saúde dos solos dos agroecossistemas brasileiros.

Referências

ANGHINONI, I.; VEZZANI, F. M. Systemic Soil Fertility as product of system self-organization resulting from management. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v. 45, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210090>.

- BANDICK A. K.; DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, p. 1471-9, 1999. DOI: doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00051-6.
- CHAER G. M.; MENDES I. C.; DANTAS O. D.; MALAQUIAS J. V.; REIS JUNIOR, F. B.; OLIVEIRA M. I. L. Evaluating C trends in clayey Cerrado Oxisols using a four-quadrant model based on specific arylsulfatase and β -glucosidase activities. **Applied Soil Ecology**, v. 183, p. 104742, 2023.
- CLAESSEN, M. E. C. (org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPq. Documentos, 1). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330804>. Acesso em: 11 abr. 2022.
- CONAB. **Tabela de dados**: produção e balanço de oferta e demanda de grãos. Brasília, DF, 2022. (Boletim da Safra de Grãos). Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 12 jul. 2022.
- DICK, R. P.; BURNS, R. G. A brief history of soil enzyme research. In: DICK, R. P. (ed.). **Methods of soil enzymology**. Madison: Soil Science Society of America, 2011. p. 1-19. DOI: doi.org/10.2136/sssabookser9.c1.
- FERREIRA, A. C. B.; BORIN, A. L. D. C.; LAMAS, F. M.; BOGIANI, J. C.; SILVA, M. A. S.; SILVA FILHO, J. L.; STAUT, L. A. Soil carbon accumulation in cotton production systems in the Brazilian Cerrado. **Acta Scientiarum-Agronomy**, v. 42, e43039, 2020. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/204991/1/SoilCarbonAccumulationCottonAlexandreFerreira.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2022.
- LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P. C. F.; DEDIEU, B. Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture Ecosystem Environment**. v.190, p. 4-8, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>.
- LOPES, A. A. C.; BOGIANI, J. C.; FIGUEIREDO, C. C. de; REIS JUNIOR, F. B.; SOUSA, D. M. G.; MALAQUIAS, J. V.; MENDES, I. C. Enzyme activities in a sandy soil of Western Bahia under cotton production systems: short-term effects, temporal variability, and the FERTBIO sample concept. **Brazilian Journal Microbiology**, v. 52, p. 2193-2204, 2021. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42770-021-00606-z>.
- MBUTHIA, L. W.; MARTÍNEZ, V. A.; DEBRUYN, J.; SCHAEFFER, S.; TYLER, D.; ODOI, E.; MPHESHEA, M.; WALKER, F.; EASH, N. Long-term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: implications for soil quality. **Soil Biology Biochemistry**, v. 89, p. 24-34, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.06.016>.
- MENDES, I. de C.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. dos; SOUSA, D. M. G. de; SILVA, O. D. D. da; OLIVEIRA, M. I.; MALAQUIAS, J. V. **Tecnologia BioAS**: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021a. 50 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 369).
- MENDES, I. de C.; SOUSA, D. M. G. de; REIS JUNIOR, F. B. dos; LOPES, A. A. de C. **Bioanálise de solo**: como acessar e interpretar a saúde do solo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2018. 23 p. (Embrapa Cerrados. Circular Técnica, 38).
- MENDES, I. de C.; SOUSA, D. M. G. de; REIS JUNIOR, F. B. dos; CHAER, G. M.; LOPES, A. A. de C.; SILVA, O. D. D. da; SOUZA, L. M. de. Soil bioanalysis: a simple and effective tool

to access and interpret soil health. In: GLOBAL SYMPOSIUM ON SOIL DIVERSITY, Rome, 2021. **Keep soil alive, protect soil biodiversity**: proceedings. Rome: FAO, 2021b. p. 256-261. Disponível em: https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/GSP/GSOBI-21/DAY2/PS1/14-15/1_1%20C3%AAada_de_Carvalho_Mendes_ID_204.pdf. Acesso em: 12 jul. 2022.

MENDES, I. de C.; SOUSA, D. M. G. de; SILVA, O. D. D. da; LOPES, A. A. C.; REIS JUNIOR, F. B. dos; OLIVEIRA, M. I.; CHAER, G. M. Soil quality and grain yield: a win win combination in clayey tropical oxisols. **Geoderma**, v. 388, 114880, 2021c.

MENDES, I. de C.; SOUSA, D. M. G. de; REIS JUNIOR, F. B. dos; LOPES, A. A. de C.; SOUZA, L. M. de; CHAER, G. M. Bioanálise de solo: aspectos teóricos e práticos. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 10, jun. 2019. p. 399-462, 2019a.

MENDES, I. C.; SOUZA, L. M.; SOUSA, D. M. G.; LOPES, A. A. C.; 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. **Applied Soil Ecology**, v. 139, p. 85-93, 2019b. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>.

NDIAYE, E. L.; SANDENO, J. M.; MCGRATH, D.; DICK, R. P. Integrative biological indicators for detecting change in soil quality. **American Journal Alternative Agriculture**, v.15, n. 1, p. 26-36, 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0889189300008432>.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (ed.). **Methods of soil analysis**: part 3: chemical methods. Madison: Soil Science Society of America: American Society of Agronomy, 1996. p. 961-1010. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>.

REEVES, D. W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. **Soil Tillage Research**, v. 43, p. 31-167, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00038-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00038-X).

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: toward a sustainable production system. **Agriculture Ecosystem Environment**, v. 190, p. 70-79, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.023>.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p. il. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/222588/1/Cerrado-Correcao-solo-adubacao-ed-02-8a-impressao-2017.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2022.

STOTT, D. E.; ANDREWS, S. S.; LIEBIG, M. A.; WIENHOLD, B. J.; KARLEN, D. L. Evaluation of β -glucosidase activity as a soil quality indicator for the Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society America Journal**, v. 74, p. 107-119, 2010. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0029>.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P.; BEZDICEK, D.; SMITH, S.; TABATABAI, A.; WOLLUM, A. (ed.). **Methods of Soil Analysis**. Part 2. Microbiological and Biochemical Properties. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 778-833. DOI: <https://doi.org/10.1002/047126363X.agr354>.

TRASAR-CEPEDA, C.; LEIROS, M. C.; GIL-SOTRES, F. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils: some implications for their use as indicators of soil quality. **Soil**

Biology and Biochemistry, v. 40, p. 2146-2155, 2008a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.015>.

TRASAR-CEPEDA, C.; LEIROS, M. C.; SEOANE, S.; GIL-SOTRES, F. 2008b. Biochemical properties of soils under crop rotation. **Applied Soil Ecology**, v. 39, p. 133-143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.12.003>.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, p. 29-38, 1934.

Embrapa

Cerrados

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA E
PECUÁRIA

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

CGPE 018112