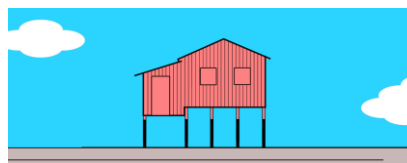


Capítulo 25



Atividade enzimática dos solos da XV RCC: um enfoque bioquímico

*Iêda de Carvalho Mendes
Maria do Rosário Lobato Rodrigues
Maria Inês Lopes de Oliveira
Maria de Lourdes Mendonça-Santos
José Francisco Lumbreras*

1. Introdução

A Amazônia Legal representa 60% do território brasileiro, com aproximadamente 5.000.000 de km². Essa grande extensão geográfica resulta em grande diversidade de ambientes e de solos, decorrentes das diferentes interações entre os fatores de formação dos solos, a saber: clima, organismos, relevo, material de origem e tempo (Jenny, 1941).

Ante esses ambientes diversos e os potenciais impactos que as mudanças no uso das terras podem causar, não se pode falar em desenvolvimento sustentável na Amazônia sem o conhecimento de seus solos por meio de diagnósticos ambientais detalhados e estudos de atributos sensíveis às mudanças climáticas e de uso das terras. Nesse contexto, atenção especial deve ser dada às mudanças na sua biota, que refletirão na saúde dos solos, como um dos pilares para a chamada “Saúde Única” (*One Health*).

O funcionamento do solo tem base nos processos químicos e físicos, e a maquinaria biológica move essas engrenagens. Essa maquinaria é constituída por micro-organismos (cerca de 70%), raízes e fauna e apresenta uma estreita inter-relação com os componentes físicos e químicos, os quais influenciam em conjunto não só a produtividade primária mas também a sustentabilidade dos sistemas florestais e agrícolas.

Os processos biogeoquímicos, que resultam na ciclagem de nutrientes, são mediados pelos micro-organismos e animais do solo, atuando sobre as raízes e seus exsudatos, folhas e outros detritos orgânicos. Todas as reações bioquímicas envolvidas nesses processos são catalisadas por enzimas, que são proteínas com alto poder de ativação específica (Tabatabai, 1994). No solo, as enzimas catalisam todas as reações metabólicas intracelulares, que ocorrem nos seres vivos. Além disso, as enzimas extracelulares desempenham papel ecológico

fundamental, atuando em várias reações hidrolíticas e oxidativas que resultam na decomposição de resíduos orgânicos (ligninases, celulasas, proteases, glucosidases, galactosidases), ciclagem de nutrientes (fosfatases, sulfatases, urease), formação da matéria orgânica do solo (MOS) e da estrutura do solo (Wallenstein; Burns, 2011). A maior parte das enzimas do solo são de origem microbiana, embora plantas e animais também contribuam como fontes.

Após 21 anos de estudos, em uma iniciativa pioneira no mundo, em julho de 2020 foi lançada a tecnologia Embrapa de Bioanálise de Solo (BioAS), que agrega o componente biológico às análises químicas tradicionais de rotina de solos (Mendes et al., 2019a, 2021, 2024). A BioAS tem como base a análise da atividade das enzimas arilsulfatase (ARIL) e β -glicosidase (GLI), associadas aos ciclos do enxofre e do carbono, respectivamente. GLI é uma exocelulase que atua na etapa final da decomposição da celulose, convertendo os resíduos de celobiose em duas moléculas de glicose, importante fonte de energia para as comunidades microbianas no solo. ARIL é uma enzima da classe das esterases que catalisa a hidrólise de ésteres-sulfatos com liberação do ânion sulfato ($R-O-SO_3^- + H_2O \rightarrow R-OH + H^+ + SO_4^{2-}$). Por estarem relacionadas ao potencial produtivo e à sustentabilidade do uso do solo, elas funcionam como bioindicadores, permitindo avaliar a saúde dos solos. As pesquisas desenvolvidas pela Embrapa permitiram estabelecer valores de referência para essas enzimas em diferentes solos, de modo a avaliar o estado do seu funcionamento biológico. Valores elevados de atividade enzimática indicam sistemas de produção e/ou práticas de manejo do solo adequadas e sustentáveis. Ao contrário, valores baixos servem de alerta ao agricultor para uma reavaliação do sistema de produção na direção da adoção de boas práticas de manejo.

Da mesma forma que todo sistema de uso ou manejo deixa sua impressão digital, sua assinatura biológica (Mendes et al., 2019a) no solo, as diferentes fitofisionomias também deixam suas marcas no solo (Mendes et al., 2012). As determinações de atividade enzimática são uma das vias de formação da memória do solo. Isso decorre do fato de que a atividade enzimática total de um solo é o somatório da atividade enzimática dos organismos vivos (micro-organismos, plantas e animais) e das enzimas abiônicas, que são enzimas associadas à fração não viva e que se acumulam no solo, protegidas da ação de proteases por meio de sua adsorção em partículas de argila e na matéria orgânica (Wallenstein; Burns, 2011).

A participação no PronaSolos da equipe de pesquisa envolvida no desenvolvimento da Tecnologia BioAS resultou na oportunidade única e inédita de caracterizar a atividade das enzimas beta-glicosidase (GLI) e arilsulfatase (ARIL) nos perfis de solo da *XV Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: RCC das várzeas do Médio Rio Amazonas e entorno (XV RCC)*. É importante enfatizar que este estudo não teve a pretensão de avaliar a saúde do solo nos perfis da RCC, mas tão somente caracterizar os níveis de atividade enzimática.

Assim, neste capítulo são reportados os resultados da caracterização da atividade dessas enzimas na camada de 0-10 cm dos perfis de solos da XV RCC e sua relação com os teores de

matéria orgânica do solo (MOS), argila e algumas propriedades químicas (pH, $H^+ + Al^{3+}$, P, K^+ e Ca^{2+}). A atividade da enzima fosfatase ácida (FOS), uma fosfomonoesterase que atua na ciclagem do P orgânico (que constitui uma porcentagem significativa do P total do solo) com liberação do ânion fosfato, também foi avaliada. Dessa forma, essa perspectiva pioneira sobre o potencial bioquímico em perfis de solos da RCC serve como o início de uma base de dados de referência para valores de atividade biológica em solos brasileiros.

2. Material e métodos

2.1. Meio físico

As amostras de solos estudadas correspondem aos perfis descritos e amostrados para a XV RCC (vide Capítulo 9). Compreendem 16 perfis de solos (AM-01, AM-05, AM-06, AM-07, AM-08, AM-09, AM-11, AM-12, AM-15 e AM-16 e PA-05, PA-06, PA-07 e PA-13), conforme descrito na Tabela 25.1. O perfil AM-02 não foi coletado e, portanto, não faz parte deste trabalho.

2.2. Amostragem e análises de solo

As amostras de solo para as determinações de atividade de arilsulfatase (ARIL), β -glicosidase (GLI), fosfatase (FOS) e matéria orgânica do solo (MOS) foram coletadas no período de 15/10 a 27/10/2023 na camada de 0-10 cm. Foram utilizados cinco pontos próximos ao perfil do solo, para constituir uma amostra composta. A amostragem seguiu o conceito de amostra de solo FertBio, descrito em Mendes et al. (2019b). Resumidamente, após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar à temperatura ambiente por pelo menos duas semanas, passadas por uma peneira de 2 mm e armazenadas à temperatura ambiente até a realização das análises, em dezembro de 2023. As atividades de ARIL e GLI foram determinadas conforme Tabatabai (1994), omitindo o tolueno. O método é baseado na determinação colorimétrica do *p*-nitrofenol liberado por essas enzimas, quando o solo é incubado por uma hora, com uma solução tamponada de substratos específicos para cada enzima (*p*-nitrofenil- β -D-glicopiranosídeo, *p*-nitrofenil sulfato de potássio e *p*-nitrofenil fosfato para determinação das atividades de GLI, ARIL e FOS, respectivamente). Os dados são expressos em mg de *p*-nitrofenol kg^{-1} solo h^{-1} (mg PNF kg^{-1} solo h^{-1}). Uma curva padrão com concentrações conhecidas de *p*-nitrofenol (0, 10, 20, 30, 40 e 50 μg) foi utilizada para determinar a quantidade do produto liberado pelas amostras de solo.

Os teores de MOS foram determinados utilizando o método de Walkley e Black (Nelson; Sommers, 1996) e calculados de acordo com Jackson (1958). Os parâmetros químicos de solo (pH, $H^+ + Al^{3+}$, P, K^+ e Ca^{2+}) foram avaliados conforme metodologia proposta pelo *Manual de métodos de análise de solo* da Embrapa (Teixeira et al., 2017).

Tabela 25.1. Localização e descrição dos 16 perfis de solos e pontos de coleta da XV RCC. Coletas realizadas em maio e outubro de 2023.

Número	Base apoio	Classificação do solo ⁽¹⁾
AM-01	Manaus, CE Caldeirão	Argissolo Amarelo Distrófico latossólico antrópico, textura média/argilosa/muito argilosa, epieutrófico, caulínítico, Tmb, mesoférrico, fase floresta equatorial perenifólia, relevo plano.
AM-05	Itacoatiara, planície interna	Gleissolo Háptico Ta Eutrófico neofluvissólico, textura siltosa, A moderado, Tma, fase floresta equatorial hidrófila de várzea, relevo plano.
AM-06	Itacoatiara, dique da planície	Gleissolo Háptico Ta Eutrófico neofluvissólico, textura média e siltosa, A moderado, Tma, fase floresta equatorial higrófila de várzea, relevo plano.
AM-07	Manaus, CE Caldeirão, dique da planície	Cambissolo Flúvico Ta Eutrófico gleissólico, textura média/siltosa, A moderado, Tma, hipoférrico, fase floresta tropical higrófila de várzea, relevo plano.
AM-08	Manaus, AM-070 km 42 (Irاندوبا)	Plintossolo Argilúvico Alumínico gleissólico, textura média/argilosa/muito argilosa, A moderado, epiálico, Tmoa, fase floresta equatorial higrófila de várzea, relevo plano.
AM-09	Manaus, BR-174	Espodossolo Humilúvico Hiperespesso típico, textura muito arenosa/arenosa-média/média-arenosa, A fraco, endodúrico, fase campinarana equatorial arbórea, relevo plano.
AM-11	Parintins, barra de acreção do Amazonas	Gleissolo Háptico Ta Eutrófico vertissólico neofluvissólico, textura siltosa-média/média-siltosa, A moderado, Tma, fase campo equatorial hidrófilo de várzea, relevo plano.
AM-12	Parintins, planície interna	Gleissolo Háptico Ta Distrófico neofluvissólico, textura média, A moderado, álico, epialumínico, Tmoa, fase floresta equatorial hidrófila de várzea, relevo plano.
AM-15	Parintins, dique da planície (ilha)	Gleissolo Háptico Ta Eutrófico neofluvissólico, textura média/arenosa/siltosa, A fraco, Tma, fase floresta equatorial higrófila de várzea, relevo plano.
AM-16	Parintins, várzea interna (ilha)	Gleissolo Háptico Ta Eutrófico solódico vertissólico, textura argilosa, A moderado, mesoendossolódico, Tma, fase campo tropical hidrófilo de várzea, relevo plano.
PA-05	Santarém, Belterra	Latossolo Amarelo Distrófico típico, textura muito argilosa, A moderado, álico, epidistrófico, caulínítico, Tmb, mesoférrico, fase floresta equatorial perenifólia, relevo plano.
PA-06	Santarém, Ponta de Pedras	Neossolo Quartzarênico Órtico húmico, textura arenosa-média, álico, fase cerrado equatorial subcaducifólio, relevo plano.
PA-07	Santarém, Belterra	Latossolo Amarelo Distrófico húmico, textura muito argilosa, álico, epidistrófico, caulínítico, Tmb, hipoférrico, fase floresta equatorial perenifólia, relevo plano.
PA-13	Parintins, barra de acreção, Fazenda São Joaquim	Gleissolo Háptico Ta Eutrófico solódico vertissólico, textura argilosa/siltosa, A moderado, endossolódico, Tma, fase floresta equatorial higrófila de várzea, relevo plano.
PA-14	Parintins, várzea interna, Fazenda São Joaquim	Vertissolo Hidromórfico Órtico solódico, textura argilosa/siltosa, A fraco, endossolódico, eutrófico, Tma, fase campo equatorial hidrófilo de várzea, relevo plano.
PA-17	Santarém, planície flúvio-lagunar, Comunidade Tiningu	Organossolo Háptico Hêmico típico, textura argilosa/média/orgânica fíbrica, distrófico, fase campo tropical hidrófilo de várzea, relevo plano.

¹ Classificação segundo Santos et al. (2018).

2.3. Abordagem estatística

As atividades de ARIL, GLI, relação ARIL/GLI, FOS, MOS e os teores de argila dos 16 perfis de solos foram analisados por representações em *box plot* para obtenção de medidas estatísticas de dispersão (média, mediana, valores máximos e mínimos, valores do primeiro e do terceiro quartil e dados discrepantes).

As relações entre as atividades enzimáticas, granulometria (teores de argila, silte e areia) e algumas variáveis de química de solo (pH, $H^+ + Al^{3+}$, P, K^+ e Ca^{2+}) foram determinadas por correlação linear de Pearson. As correlações significativas foram submetidas à análise de regressão. As análises foram realizadas utilizando o software R (R Core Team, 2022).

3. Resultados e discussão

Os dados de atividade enzimática, MOS e as propriedades químicas de 16 perfis de solos coletados para a XV RCC são apresentados nas Tabelas 25.2 e 25.3. Visando o aproveitamento das análises de granulometria e química de solo realizadas na Embrapa Solos, apenas para essas variáveis foram utilizadas as médias aritméticas ponderadas pelas espessuras de horizontes mais próximos à camada diagnóstica das enzimas e MOS (0-10cm), conforme descrito na Tabela 25.3.

A distribuição dos valores de atividade enzimática (Figura 25.1), matéria orgânica do solo e teores de argila (Figura 25.2) foi analisada por representações em *box plot*. Os perfis correspondentes às amostras de AM-15 (Gleissolo Háplico Ta Eutrófico neofluvisólico, textura média/arenosa/siltosa) e PA-17 (Organossolo Háplico Hêmico típico, textura argilosa/média/orgânica fibrica) constituíram dados discrepantes (*outliers*), cujos resultados representaram os extremos inferiores e superiores, respectivamente, entre os 16 perfis avaliados. As medianas para os valores de ARIL, GLI e FOS foram de 93, 23,5 e 275 mg PNF kg^{-1} solo h^{-1} , respectivamente. A mediana para os valores de MOS foi de 31,6 g kg^{-1} . Os solos que apresentaram maior concentração de MOS foram um Organossolo Háplico (PA-17, 165,6 g kg^{-1}), com acúmulo de matéria orgânica resultante da decomposição lenta de material vegetal em condições úmidas e frequentemente anaeróbicas, um Latossolo Amarelo Distrófico húmico (PA-07, 95,0 g kg^{-1}), dois Gleissolos Háplicos (AM-12, 58,5 g kg^{-1} ; e PA-13, 49,0 g kg^{-1}) e um Argissolo Amarelo Distrófico latossólico antrópico (AM-01, 47,6 g kg^{-1}).

Tabela 25.2. Atividade das enzimas arilsulfatase (ARIL), β -glicosidase (GLI), relação ARIL/GLI, fosfatase ácida (FOS) e teores de matéria orgânica (MO) dos 16 pontos de coleta da XV RCC.

Amostra	ARIL	GLI	FOS	ARIL/GLI	MO
	----- mg PNF kg solo h ⁻¹ -----				g kg ⁻¹
AM-01	293	24	345	12,4	47,6
AM-05	96	17	158	5,7	21,4
AM-06	58	45	161	1,3	14,6
AM-07	82	15	138	5,6	16,2
AM-08	90	20	328	4,6	28,4
AM-09	25	15	113	1,7	18,2
AM-11	25	7	11	3,8	14,2
AM-12	381	77	515	5,0	58,5
AM-15	4	1	22	3,1	2,6
AM-16	89	23	234	3,8	31,9
PA-05	556	40	411	13,9	41,5
PA-06	46	14	106	3,3	31,2
PA-07	680	72	680	9,4	95,0
PA-13	249	53	420	4,7	49,0
PA-14	132	45	317	2,9	33,4
PA-17	1173	86	872	13,6	165,6

Tabela 25.3. Profundidades utilizadas e médias aritméticas da distribuição granulométrica e das propriedades químicas dos 16 pontos de coleta, da XV RCC.

Amostra	Profundidade ⁽¹⁾	Argila	Silte	Areia	pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	H ⁺ +Al ³⁺
	cm	----- g kg ⁻¹ -----			H ₂ O	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	-- cmol _c kg ⁻¹ --	
AM-01	0-8	304	144	552	5,2	134	27,4	6,6	7,6
AM-05	0-5/5-13	214	747	39	4,5	46,5	100	7,3	11
AM-06	0-5/5-17	145	661	194	5,1	87	146,6	8,5	4,8
AM-07	0-4/4-15	107	476	417	5,3	69	103,6	10	4
AM-08	0-6/6-30	145	624	231	4,2	2	31,2	0,4	6,5
AM-09	0-8	16	10	974	4,1	2	15,6	0,1	2,3
AM-11	0-5/5-17	182	703	115	5,2	54	72	10	4,3
AM-12	0-5/5-11	291	270	439	4,5	8,5	52,8	1,1	11,8
AM-15	0-4/4-11	29	24	946	5,7	68	18,1	4	1,8
AM-16	0-4/4-14	211	752	37	4,4	36	93,9	6,4	9,1
PA-05	0-8	753	197	50	4,2	7	35	1,1	11,5
PA-06	0-6/6-22	88	47	865	4,5	6,5	23	0,1	14,2
PA-07	0-15	675	269	56	4,6	3	39	2,0	22
PA-13	0-5/5-15	337	642	21	4,6	38	105	6,5	9
PA-14	0-3/3-20	514	455	31	4,5	11,5	193,5	11	12
PA-17	0-4/4-12	403	424	173	4,5	5,5	101	7,5	31,4

⁽¹⁾ Visando o aproveitamento das análises de granulometria e química de solo, realizadas na Embrapa Solos, apenas para esses parâmetros foram utilizadas as médias aritméticas ponderadas pelas espessuras de horizontes mais próximos à camada diagnóstica das enzimas (0-10cm).

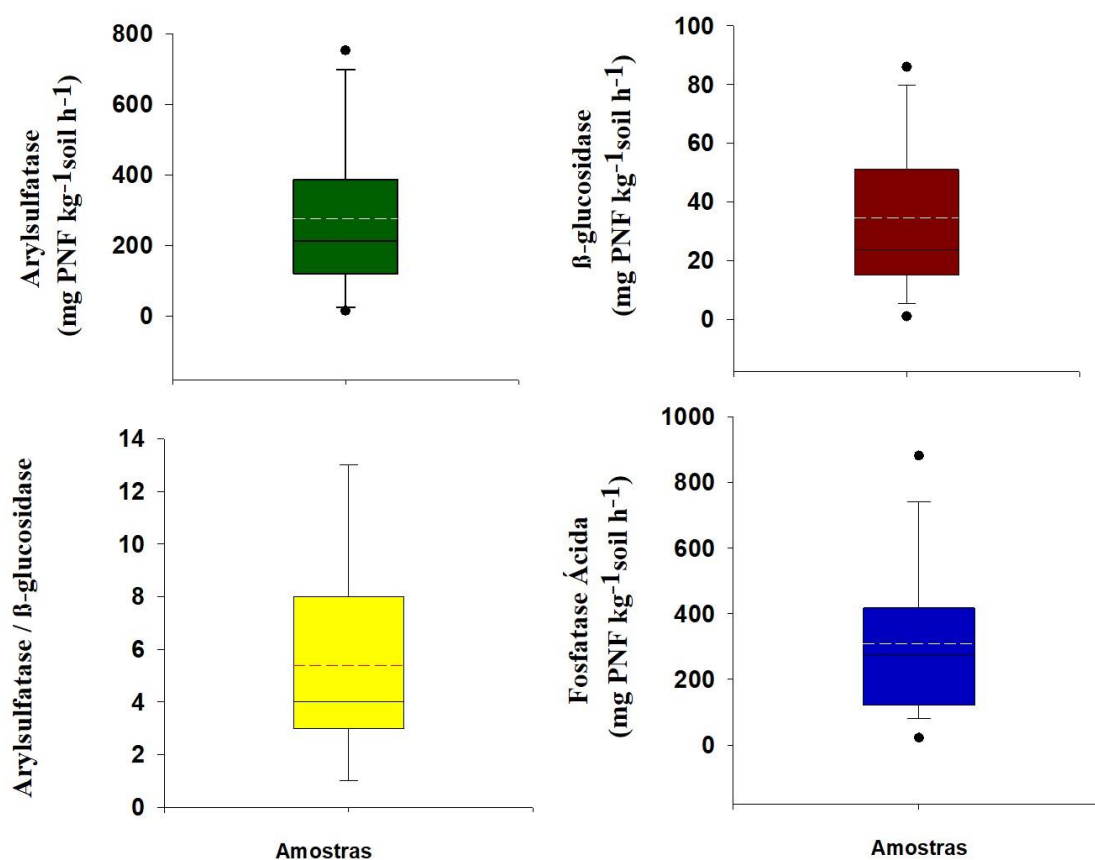


Figura 25.1. Representação *box plot* da atividade das enzimas arilsulfatase, β-glicosidase, fosfatase ácida e da relação arilsulfatase/ β-glicosidase nos solos da XV RCC.

As linhas tracejadas representam os valores médios, as linhas sólidas representam os valores medianos, os *whiskers* representam os percentis 10 e 90, e as caixas representam os percentis 25 e 75.

As relações entre os níveis de atividade das enzimas ARIL/GLI variaram de 1,5 (médias dos perfis AM-09 e AM-06) até 13,7 (perfis PA-05 e PA-17), com mediana de 5,3 evidenciando predominância de ARIL em relação a GLI nos solos amazônicos.

As correlações entre os níveis de atividade enzimática, granulometria e alguns parâmetros de química de solo (pH, H⁺+Al³⁺, P, K⁺ e Ca²⁺) são apresentadas no correlograma da Figura 25.3.

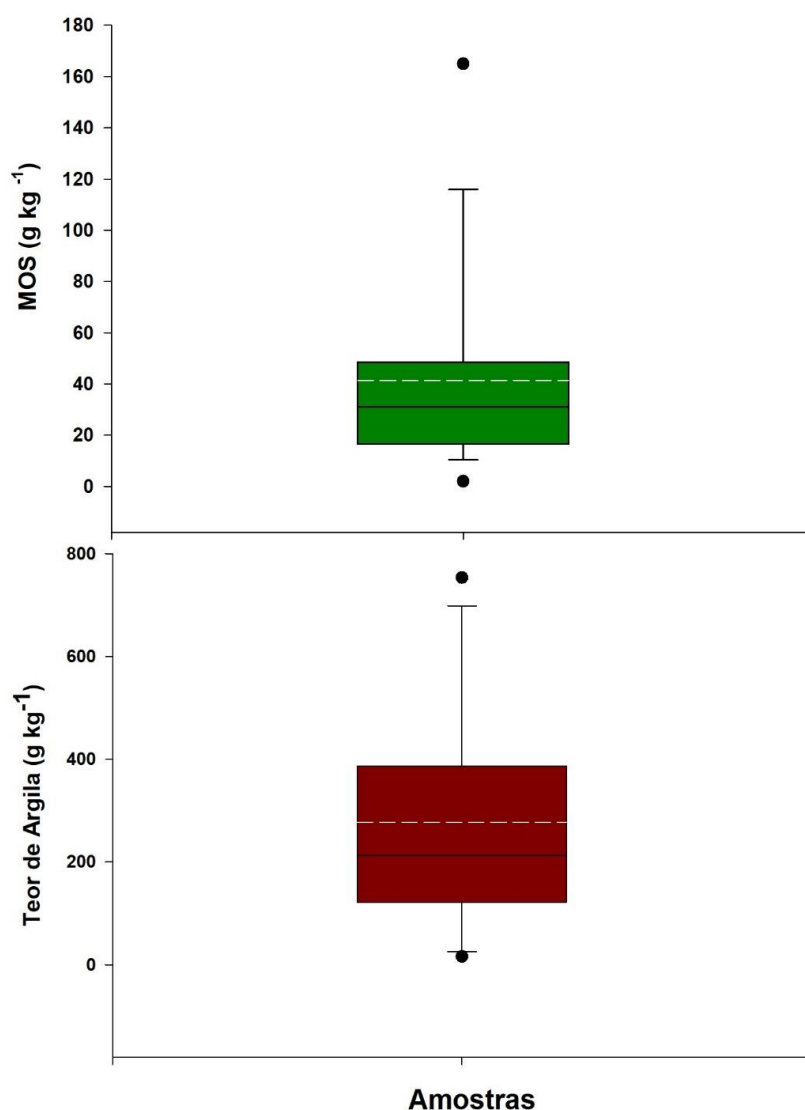


Figura 25.2. Representação *box plot* dos teores de matéria orgânica e argila nos solos da XV RCC.

As linhas tracejadas representam os valores médios, as linhas sólidas representam os valores medianos, os *whiskers* representam os percentis 10 e 90, e as caixas representam os percentis 25 e 75.

Correlações significativas e positivas foram observadas entre os níveis de atividade de ARIL e FOS com os teores de MOS, argila, $H^+ + Al^{3+}$ e Ca^{2+} . Resultados semelhantes foram obtidos para a GLI, com exceção de ausência de correlação com o Ca^{2+} . Em geral, nota-se que as atividades enzimáticas foram mais correlacionadas (0,81 a 0,94) com a MOS, a qual contém os substratos passíveis de serem metabolizados. Embora possa parecer conflitante que enzimas como a arilsulfatase e a fosfatase ácida estejam positivamente correlacionadas tanto com Ca^{2+} como com $H^+ + Al^{3+}$, essas correlações podem ser entendidas considerando-se resultantes da covariância dessas variáveis químicas do solo com a matéria orgânica. Dessa forma, é importante considerar as interações complexas resultantes das adaptações das comunidades microbianas e das plantas com os teores de nutrientes, componentes de acidez e matéria orgânica nesses solos.

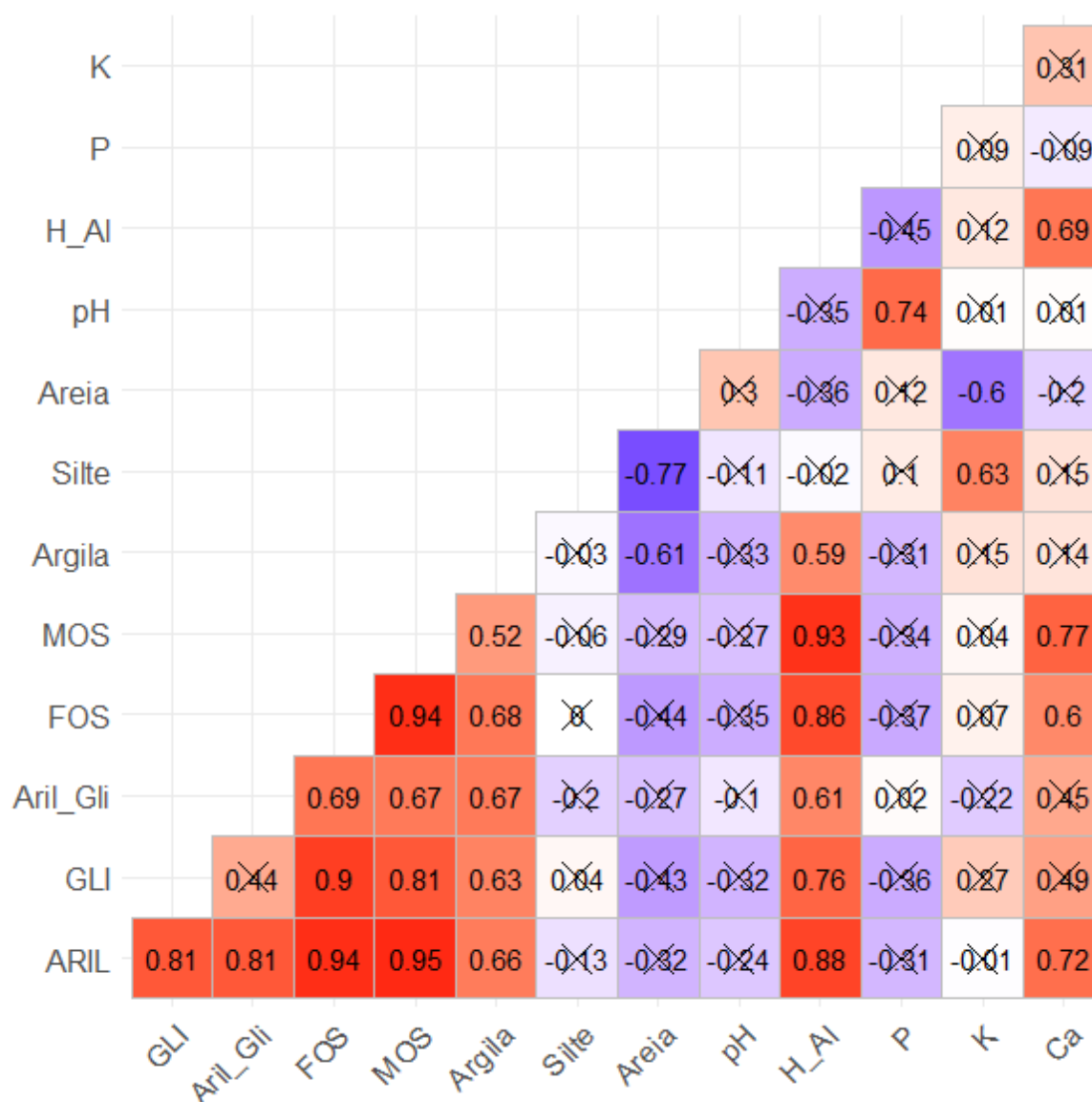


Figura 25.3. Matriz de correlação com as interações entre os atributos biológicos, os teores de argila, silte e areia e os atributos químicos nos 16 perfis de solo da XV RCC.

Tons vermelhos indicam correlações positivas e tons azuis indicam correlações negativas. Tons claros representam ausência de correlação. 'X' indica correlações não significativas ($p > 0.05$). Siglas: ARIL (arilsulfatase), GLI (β -glicosidase), ARIL_GLI (relação arilsulfatase/ β -glicosidase), FOS (fosfatase ácida), MOS (matéria orgânica do solo).

De fato, no correlograma apresentado na Figura 25.3, se e significativas correlações da MOS com o Ca^{2+} e $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$. O Ca^{2+} , por exemplo, é importante para a agregação do solo e a estabilização da MOS, e o seu aumento diminui a toxicidade do Al^{3+} . Esse efeito pode favorecer o crescimento das raízes das plantas e, conseqüentemente, da atividade microbiana, com reflexos na atividade enzimática. Por outro lado, a relação significativa entre a matéria orgânica e $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ (acidez potencial) explicada pela dissociação de íons hidrogênio (H^+) em grupamentos do material húmico ou húmus (frações húmina, ácidos húmicos e fúlvicos). Portanto, o maior teor de Ca^{2+} pode estabilizar a matéria orgânica, a qual eleva o poder (ou potencial) de atividades de enzimas, ao mesmo tempo que contribui para o teor de $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$. Isso explica a correlação positiva de atividade enzimática com a acidez potencial e o teor de Ca^{2+} .

Os níveis de atividade das três enzimas não se correlacionaram com o pH, P, K⁺ e nem com os teores de silte e areia. Também não foram observadas correlações com o Ca²⁺+Mg²⁺ (dados não apresentados).

Deve ser destacado que, na faixa de pH contemplado para os 16 perfis de solos avaliados (4,1 a 5,7), não houve nenhuma relação significativa desse indicador com os níveis de atividade enzimática e nem com os teores de MOS. Por exemplo, as maiores atividades de ARIL e GLI, observadas no perfil PA-17, ocorreram num pH 4,5. Esse dado contrasta com dados de solos de climas temperados que indicam reduções na atividade GLI em solos ácidos. Por outro lado, é necessário ressaltar que o perfil PA-17 é um Organossolo, com maior concentração de material orgânico metabolizável em relação aos outros perfis estudados. Assim, mesmo com pH baixo, a disponibilidade de substrato foi suficiente para aumentar a atividade enzimática em relação aos outros solos.

Os diferentes fatores de formação e processos pedogenéticos agindo em cada solo resultam em diferentes propriedades físicas, químicas e biológicas que acabam por definir o pH, a qualidade e a quantidade de matéria orgânica. Por exemplo, entre a diversidade dos solos avaliados, há os perfis de solos cauliniticos, ácidos pela dessilicação, ferralitização e decomposição da matéria orgânica, como o Argissolo Amarelo Distrófico latossólico (AM-01), o Latossolo Amarelo Distrófico típico (PA-05) e o Latossolo Amarelo Distrófico húmico (PA-07). Por outro lado, há solos formados a partir de sedimentos aluviais, e com profundo redoximorfismo, como os Gleissolos e o Plintossolo Argilúvico Alumínico gleissólico (AM-08). E ainda há o Organossolo Háptico Hêmico típico, com paludização - acúmulo de matéria orgânica devido à estagnação de água e diminuição da atividade microbiana imposta pela anaerobiose. Dessa forma, os processos que influenciam o pH, o acúmulo e a diversificação de moléculas orgânicas do solo, mesmo considerando apenas a camada 0-10 cm, são variados, próprios de cada solo, o que resultou em ausência de correlação entre teores de MOS e pH quando se utilizam os dados dos diferentes perfis da RCC. Outro ponto a ser observado é que os solos de várzeas às margens do Rio Amazonas recebem sedimentos periódicos nos ciclos de cheias do rio, sofrendo cumulização relativamente rápida. Essa entrada de material predominantemente mineral e a saída de parte da serrapilheira no fluxo da água nas cheias do rio diminuem a capacidade de acumular material orgânico ao longo do tempo. Nas várzeas do Médio Rio Amazonas, esse processo gera solos com material mineral pouco intemperizado e, por vezes, com relativo baixo teor de matéria orgânica. Esse efeito também pode contribuir para a redução do impacto da matéria orgânica sobre o pH dos solos avaliados na RCC.

A relação causal entre os níveis de atividade enzimática com os teores de MOS e argila foi avaliada por meio de regressões entre esses parâmetros. Valores elevados de R² (0,91, 0,89 e 0,66, para ARIL, FOS e GLI, respectivamente) evidenciaram a forte correlação dessas enzimas com a MOS nos solos amazônicos (Figuras 25.4A, B e C). Os menores valores de R² nas regressões com os teores de argila (0,43, 0,47 e 0,36, para ARIL, FOS e GLI, respectivamente) indicam ajustes moderados (Figuras 25.4D, E e F), sugerindo que a relação das três enzimas com o teor de argila não é tão forte quanto com a matéria orgânica do solo (MOS).

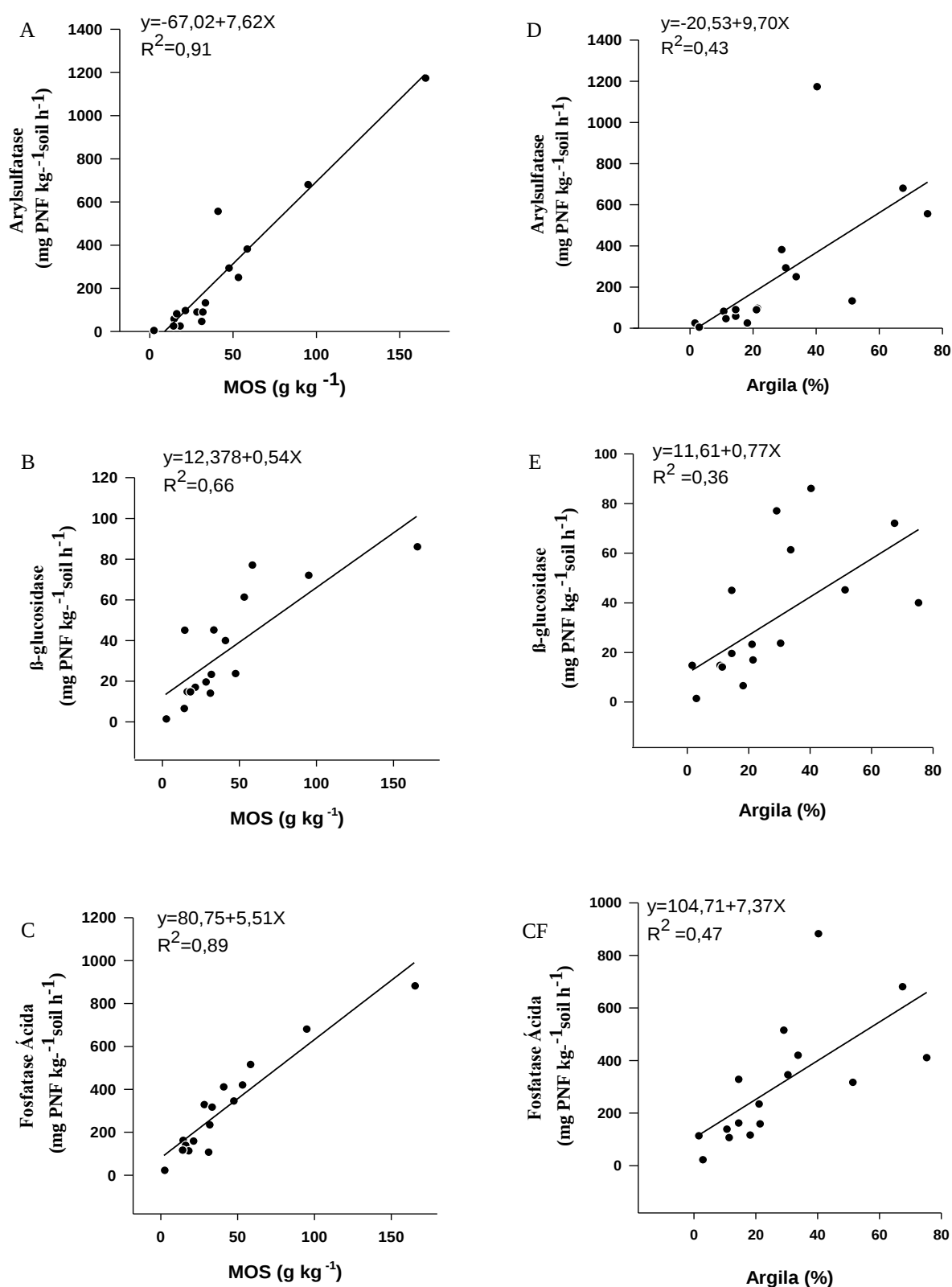


Figura 25.4. Regressões entre os níveis de atividade das enzimas Arilsulfatase, β-glucosidase e fosfatase ácida com os teores de MOS e argila nos 16 perfis de solo da XV RCC.

A textura do solo, definida pela fração granulométrica, influencia o funcionamento do solo e promove, em geral, maior retenção de carbono por meio de associações organominerais (Lützow et al., 2006; Razafimbelo et al., 2013). Assim, solos com concentrações mais altas de argila estão associados à maior atividade enzimática (Vinhali-Freitas et al., 2017) e à matéria orgânica (Amsili et al., 2021). Entretanto, a ausência de relações positivas entre GLI e ARIL e o teor de argila também tem sido reportada na literatura (Gianfreda et al., 2005; Passinato et al., 2021; Carneiro et al., 2024), assim como correlações negativas, efeito atribuído à alta afinidade das enzimas pelas superfícies de argila, resultando em redução da atividade catalítica (Bonanomi et al., 2011).

Por fim, as atividades enzimáticas na camada de 0-10 cm dos perfis de solo constituem-se no início da construção de bases de dados de potencial bioquímico que servirão de padrão de comparação e monitoramento futuro. Esses padrões e futuras análises podem constituir um banco de dados de potencial enzimático do solo em diferentes condições. Apesar de não terem sido avaliados nos horizontes pedogenéticos, os dados bioquímicos da camada superficial do solo podem ser um indicador ou marcador das condições ambientais encontradas em determinado *pedon*.

4. Considerações finais /Perspectivas futuras

O presente estudo, realizado no âmbito da XV RCC, marca a inclusão pioneira de parâmetros bioquímicos (representados pelas enzimas ARIL, GLI e FOS) junto aos parâmetros químicos, físicos e mineralógicos tradicionalmente utilizados na caracterização e descrição dos perfis de solo.

Essa "estreia" adquire ainda mais relevância por se tratar de solos do bioma amazônico, cujo funcionamento é crucial para a sustentabilidade ambiental global.

O Brasil foi o primeiro país no mundo a incorporar parâmetros biológicos (enzimas GLI e ARIL) nas rotinas de análise de solo e agora se destaca também na utilização desses parâmetros em estudos de pedologia.

Como enfatizado na introdução, o objetivo deste estudo não foi avaliar a saúde dos solos nos perfis selecionados, mas, sim, fornecer subsídios para uma melhor compreensão da biogeoquímica dos solos amazônicos. Solos vivos e biologicamente ativos desempenham um papel crucial no ciclo da água e dos nutrientes e na regulação do clima, absorvendo e armazenando grandes quantidades de carbono. Assim, diante do atual cenário de mudanças climáticas e mudanças no uso da terra, o melhor entendimento dos processos biogeoquímicos dos solos amazônicos será essencial para prever e mitigar esses impactos, não apenas para a Amazônia, mas para o planeta como um todo.

Agradecimentos

Os autores agradecem as valiosas sugestões do revisor anônimo, que contribuíram significativamente para a redação deste capítulo.

Referências

- AMSILI, J. P.; VAN ES, H. M.; SCHINDELBECK, R. R. Cropping system and soil texture shape soil health outcomes and scoring functions. **Soil Security**, v. 4, 100012, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2021.100012>.
- BONANOMI, G.; D'ASCOLI, R.; ANTIGNANI, V.; CAPODILUPO, M.; COZZOLINO, L.; MARZAIOLI, R.; PUOPOLO, G.; RUTIGLIANO, F. A.; SCELZA, R.; SCOTTI, R.; RAO, M. A.; ZOINA, A. Assessing soil quality under intensive cultivation and tree orchards in Southern Italy. **Applied Soil Ecology**, v. 47, n. 3, p. 184-194, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.12.007>.
- CARNEIRO, R. G.; FIGUEIREDO, C. C.; MALAQUIAS, J. V.; MENDES, I. C. A soil health assessment tool for vegetable cropping systems in tropical soils based on beta-glucosidase, arylsulfatase, and soil organic carbon. **Applied Soil Ecology**, v. 198, 105394, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105394>.
- GIANFREDA, L.; ANTONIETTA, R. M.; PIOTROWSKA, A.; PALUMBO, G.; COLOMBO, C. Soil enzyme activities as affected by anthropogenic alterations: intensive agricultural practices and organic pollution. **Science of the Total Environment**, v. 341, n. 1/3, p. 265-279, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.10.005>.
- JACKSON, M. L. **Soil chemical analysis**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1958. 498 p.
- JENNY, H. **Factors of soil formation**: a system of quantitative pedology. New York: McGraw-Hill, 1941. 281 p.
- LÜTZOW, M. von; KÖGEL-KNABNER, I.; EKSCHMITT, K.; MATZNER, E.; GUGGENBERGER, G.; MARSCHNER, B.; FLESSA, H. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions: a review. **European Journal of Soil Science**, v. 57, n. 4, p. 426-445, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>.
- MENDES, I. de C.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. dos; SILVA, O. D. D. da; MALAQUIAS, J. V.; OLIVEIRA, M. I. L. de; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Soil Bioanalysis (SoilBio): a sensitive, calibrated, and simple assessment of soil health for Brazil. In: MENDES, I. C.; CHERUBIN, M. R. (ed.). **Soil health and sustainable agriculture in Brazil**. Nova York: SSSA; London: Willy, 2024. v. 3, cap. 10, p. 292-326.
DOI: <https://doi.org/10.1002/9780891187448.ch10>.
- 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, 2021. 50 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 369). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1133109>. Acesso em: 24 jun. 2025.
- MENDES, I. de C.; FERNANDES, M. F.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. dos. Biological functioning of Brazilian Cerrado soils under different vegetation types. **Plant and Soil**, v. 359, n. 1/2, p. 183-195, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1195-6>.
- 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, p. 399-462, 2019a.
- MENDES, I. de C.; SOUZA, L. M. de; SOUSA, D. M. G. de; LOPES, A. A. de C.; REIS JUNIOR, F. B. dos; 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>.
- 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. cap. 34, p. 961-1010.
DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>.

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 31 ago. 2024.

RAZAFIMBELO, T.; CHEVALLIER, T.; ALBRECHT, A.; CHAPUIS-LARDY, L.; RAKOTONDRA SOLO, F. N.; MICHELLON, R.; RABEHARISOA, L.; BERNOUX, M. Texture and organic carbon contents do not impact amount of carbon protected in Malagasy soils. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 3, p. 204-208, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000300009>.

PASSINATO, J. H.; AMADO, T. J. C.; KASSAM, A.; ACOSTA, J. A. A.; AMARAL, L. de. P. Soil health check-Up of conservation agriculture farming systems in Brazil. **Agronomy**, v. 11, n. 12, 2410, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11122410>.

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. cap. 37, p. 775-833. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c37>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>. Acesso em: 24 jun. 2025.

VINHAL-FREITAS, I. C.; CORREA, G. F.; WENDLING, B.; BOBULSKÁ, L.; FERREIRA, A. S. Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. **Ecological Indicators**, v. 74, p. 182-190, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.020>.

WALLENSTEIN, M. D.; BURNS, R. G. Ecology of extracellular enzyme activities and organic matter degradation in soil: a complex community-driven process. In: DICK, R. P. (ed.). **Methods of soil enzymology**. Madison: Soil Science Society of America, 2011. cap. 2, p. 35-55. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser9.c2>.