

**BIODISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS AMAZÔNICOS: UM ESTUDO DAS FRAÇÕES LÁBIL E MODERADAMENTE LÁBIL**

**PHOSPHORUS BIOAVAILABILITY IN AMAZONIAN AGROFORESTRY SYSTEMS: A STUDY OF LABILE AND MODERATELY LABILE FRACTIONS**

**BIODISPONIBILIDAD DEL FÓSFORO EN SISTEMAS AGROFORESTALES AMAZÓNICOS: UN ESTUDIO DE FRACCIONES LÁBILES Y MODERADAMENTE LÁBILES**

 <https://doi.org/10.56238/arev7n9-187>

**Data de submissão:** 17/08/2025

**Data de publicação:** 17/09/2025

**Ana Paula Cunha Nascimento**

Discente de Ciências Biológicas

Instituição: Instituto Federal do Pará

E-mail: anapaula2brasil@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7757929482967338>

**Heloinna Lauren Ferreira dos Santos**

Discente de Engenharia Sanitária e Ambiental

Instituição: Instituto Federal do Pará

E-mail: heloinnalaurens@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0868130906270699>

**Osnar Obede da Silva Aragão**

Doutor em Ciência do solo

Instituição: Instituto Federal do Pará

E-mail: osnar.aragao@ifpa.edu.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8319904997869194>

**Rodrigo da Silva Maia**

Doutor em Ciências Ambientais

Instituição: Instituto Federal do Pará

E-mail: rodrigo.maia@ifpa.edu.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6372892449629548>

## **RESUMO**

O fósforo (P) é um dos nutrientes mais restritivos à produção agrícola nos trópicos. Na Amazônia, a baixa disponibilidade desse elemento limita significativamente a agricultura familiar. Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) surgem como alternativa sustentável e de menor custo para suprimento e manutenção de reservas de P no solo amazônico. No entanto, ainda há escassez de informações sobre como os SAFs influenciam a distribuição e a labilidade do P nesse ambiente. O presente estudo buscou avaliar as frações lábeis e moderadamente lábeis de P (orgânico e inorgânico) em solos cultivados com palma de óleo (*Elaeis guineensis*) inserida em dois SAFs orgânicos com composições vegetais distintas. A determinação das frações de P foi realizada por extração sequencial. Os resultados revelaram que, embora os SAFs não tenham diferido do cultivo convencional quanto ao fornecimento

de P lável, promoveram incremento de 20% no P moderadamente lável em relação ao monocultivo. A adoção de SAFs orgânicos no cultivo da palma de óleo na Amazônia configura uma estratégia promissora tanto para o aporte imediato de P quanto para a manutenção de reservas no solo

**Palavras-chave:** Manejo do Solo. Agricultura Amazônica. Agroecologia. Diversificação da Palma de Óleo.

### **ABSTRACT**

Phosphorus (P) is one of the most restrictive nutrients for agricultural production in the tropics. In the Amazon, the low availability of this element significantly limits family farming. Agroforestry Systems (AFS) have emerged as a sustainable and lower-cost alternative for supplying and maintaining P reserves in Amazonian soils. However, there is still a lack of information on how AFS influence P distribution and lability in this environment. This study sought to evaluate the labile and moderately labile P fractions (organic and inorganic) in soils cultivated with oil palm (*Elaeis guineensis*) within two organic AFSs with distinct plant compositions. P fractions were determined by sequential extraction. The results revealed that, although AFS did not differ from conventional cultivation in terms of labile P supply, they promoted a 20% increase in moderately labile P compared to monoculture. The adoption of organic AFS in oil palm cultivation in the Amazon represents a promising strategy for both immediate P input and soil reserve maintenance.

**Keywords:** Soil Management. Amazonian Agriculture. Agroecology. Oil Palm Diversification.

### **RESUMEN**

El fósforo (P) es uno de los nutrientes más restrictivos para la producción agrícola en los trópicos. En la Amazonía, la baja disponibilidad de este elemento limita significativamente la agricultura familiar. Los Sistemas Agroforestales (SAF) han surgido como una alternativa sostenible y de menor costo para el suministro y mantenimiento de las reservas de P en los suelos amazónicos. Sin embargo, aún existe falta de información sobre cómo los SAF influyen en la distribución y la labilidad del P en este ambiente. Este estudio buscó evaluar las fracciones de P lágiles y moderadamente lágiles (orgánicas e inorgánicas) en suelos cultivados con palma aceitera (*Elaeis guineensis*) dentro de dos SAF orgánicos con distintas composiciones vegetales. Las fracciones de P se determinaron mediante extracción secuencial. Los resultados revelaron que, si bien los SAF no difirieron del cultivo convencional en cuanto al suministro de P lágil, promovieron un aumento del 20% en el P moderadamente lágil en comparación con el monocultivo. La adopción de SAF orgánicos en el cultivo de palma aceitera en la Amazonía representa una estrategia prometedora tanto para el aporte inmediato de P como para el mantenimiento de las reservas del suelo.

**Palabras clave:** Manejo del Suelo. Agricultura Amazónica. Agroecología. Diversificación de la Palma Aceitera.

## 1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um nutriente fundamental à vida e à produção agrícola mundial. Em ambientes tropicais, frequentemente se apresenta como o fator mais limitante para a produtividade (SCHOLZ et al., 2014; NZIGUHEBA et al., 2016). Solos altamente intemperizados da região amazônica retêm P fortemente por adsorção, o que reduz a disponibilidade para as plantas (ROY, 2016; BÜNEMANN et al., 2011). Consequentemente, agricultores recorrem a doses elevadas de fosfatos. No Brasil, as jazidas de rocha fosfática são limitadas, levando à importação de cerca de 60% do P utilizado na agricultura (WITHERS et al., 2018). Estima-se que as reservas mundiais possam se esgotar em até 90 anos (BÜNEMANN et al., 2011), configurando desafio para a agricultura global. Assim, estratégias de manejo sustentável do P tornam-se prioritárias.

A palma de óleo (*Elaeis guineensis*) demanda altos níveis de fósforo, especialmente nos estágios iniciais (PHOSRI et al., 2010). Seu cultivo, concentrado no Pará, expandiu-se em modelo de monocultivo (CÓRDOBA et al., 2019). Esse padrão, no entanto, tem sido associado à perda de biodiversidade e à ameaça a comunidades locais (BACKHOUSE, 2015; VIJAY et al., 2016).

A integração da palma em SAFs apresenta-se como alternativa viável, com potencial de reduzir a dependência de fertilizantes importados e aumentar a eficiência agrícola em solos de baixa disponibilidade de P (MCGRATH et al., 2001). Esses sistemas favorecem a ciclagem do nutriente, incorporando grande aporte de matéria orgânica e raízes diversas, que promovem absorção e liberação gradual de P (MCGRATH et al., 2000).

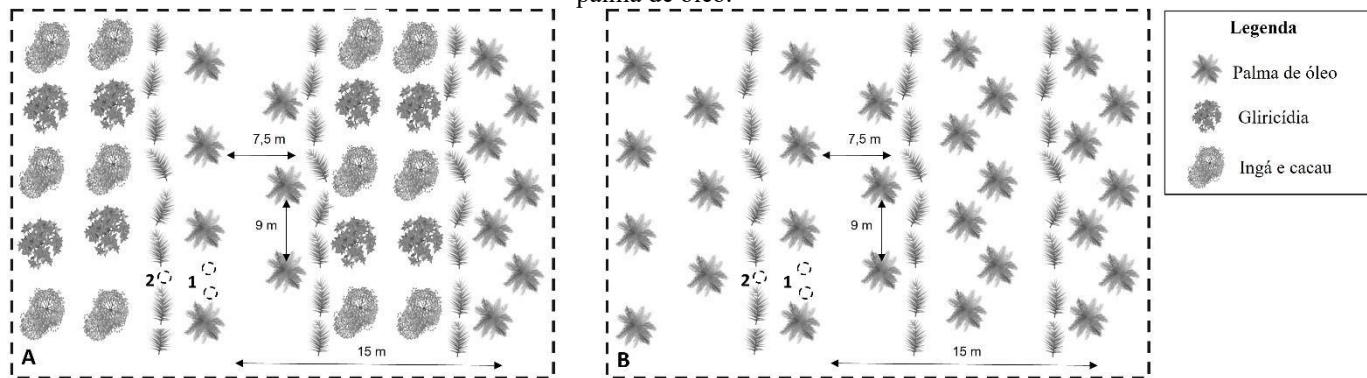
Dessa forma, este estudo objetivou avaliar as frações de fósforo orgânico e inorgânico em SAFs de palma de óleo sob manejo orgânico, comparando-os a um sistema convencional em monocultivo.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi conduzida em Tomé-Açú, Pará. O solo é classificado como Latossolo Amarelo argiloso (BAENA; FALESI, 1999). O clima, segundo Köppen, é Ami, com temperatura média anual de 26,2 °C e precipitação de 2400 mm (PACHECO; BASTOS, 2008). Foram avaliados dois SAFs com palma de óleo como cultura principal. O SAF de baixa diversidade incluía duas espécies leguminosas (*Gliricidia sepium* e *Inga edulis*). O SAF de alta diversidade reunia 13 espécies, incluindo frutíferas e madeireiras. Ambos receberam adubação orgânica (farinha de osso, torta de mamona e fosfato natural), além de biomassa oriunda de podas.

Figura 1. Área experimental do estudo, onde A representa uma parcela de SAF e B uma parcela de monocultivo de palma de óleo.



Fonte: os autores, 2025.

## 2.2 COLETA E ANÁLISE DE SOLO

Foram estabelecidas 6 parcelas em cada sistema. Em novembro de 2017, amostras compostas de solo (0-10 cm) foram coletadas sob copa da palma, a 2,5 m do estipe e sob pilhas de folhas podadas (Figura 1). Após preparo laboratorial, as amostras foram submetidas a análises físico-químicas conforme EMBRAPA (2017). Como controle, foi selecionado um monocultivo convencional com idade semelhante, adubado mecanicamente com NPK (12-2-20).

## 2.3 FRACIONAMENTO DE FÓSFORO

As frações de P foram determinadas por extração sequencial (HEDLEY et al., 1982; CONDRON et al., 1985). Agruparam-se as frações em P lábil (resina + NaHCO<sub>3</sub>) e P moderadamente lábil (NaOH), diferenciando formas orgânicas e inorgânicas.

## 2.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Utilizou-se ANOVA de medidas repetidas com teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Dados foram verificados quanto à normalidade e homogeneidade, sendo transformados quando necessário. As análises foram conduzidas nos programas Bioestat 5.3 e SigmaPlot 12.0.

Tabela 1. Densidade, altura e diâmetro à altura do peito (DAP) de espécies de plantas no Sistema agroflorestal.

Nome científico	Família	AGROFLORESTA							
		Baixa diversidade		Alta diversidade					
		D abs	DAP (cm)	h (m)	Ind	D abs	DAP (cm)	h (m)	Ind
<i>Acacia mangium</i> Willd	<i>Fabaceae</i>					5,56	15,55	10,05	2
<i>Adenanthera pavonina</i>	<i>Fabaceae</i>					2,78	17,40	8,60	
<i>Bertholletia excelsa bonpl</i>	<i>Lecythidaceae</i>								
<i>Bixa orellana</i> L.	<i>Bixaceae</i>								
<i>Calophyllum brasiliensis</i>	<i>Calophyllaceae</i>					33,33	5,61	6,98	12

<i>Carapa guineenses</i> Aubl.	<i>Meliaceae</i>					25,00	18,31	9,26	9
<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	<i>Arecaceae</i>	75,00	87,93	3,27	27	75,00	76,39	4,06	27
<i>Euterpe oleracea</i>	<i>Arecaceae</i>					244,44	9,72	6,30	88
<i>Gliricidia sepium</i>	<i>Fabaceae</i>	438,89	8,30	4,49	158				
<i>Inga edulis</i>	<i>Fabaceae</i>	177,78	6,87	2,60	64	8,33	7,18	1,08	3
<i>Jacaranda copaia</i> (Aubi.)	<i>Bignoniaceae</i>					2,78	54,40	19,20	1
<i>Lecythis pisonis</i>	<i>Lecythidaceae</i>								
<i>Mangifera indica</i> L.	<i>Anacardiaceae</i>					16,67	5,04	2,95	6
<i>Oenocarpus bacaba</i>	<i>Arecaceae</i>								
<i>Platonia insignis</i> Mart.	<i>Clusiaceae</i>								
<i>Sclerolobium paniculatum</i>	<i>Fabaceae</i>					11,11	30,39	16,18	4
<i>Spondias lutea</i> L.	<i>Anacardiaceae</i>					5,56	26,15	15,50	2
<i>Swietenia macrophylla</i> King	<i>Meliaceae</i>								
<i>Tabebuia</i> spp.	<i>Bignoniaceae</i>					47,22	21,19	9,40	17
<i>Theobroma cacao</i>	<i>Malvaceae</i>					447,22	9,54	4,63	161
<i>Theobroma grandiflorum</i> (Willd. ex Spreng.)	<i>Malvaceae</i>					5,56	8,40	3,95	2

Fonte: os autores, 2025.

d abs = densidade absoluta (número de indivíduos/ hectare); DAP (diâmetro à altura do peito); h (altura) e N° ind (Número total de indivíduos presentes na área). Os valores de DAP e h são médias.

Tabela 2. Propriedades físico-químicas do solo nos tratamentos da área de estudo.

Tratamentos	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	K	Fe	Mn	Zn	P	C <sub>org</sub>	N	pH	areia	silte	argila
cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>																
Baixa diversidade	3.70	1.09	0.00	6.69	10.29	56.66	85.70	20.41	1.91	6.20	37.46	2.10	6.69	333	134	199
Alta diversidade	3.80	0.96	0.00	6.47	10.27	50.54	108.27	24.14	1.86	5.60	33.31	2.03	6.47	329	138	203
Monocultivo	2.70	0.50	0.04	6.00	7.72	82.25	158.87	28.12	1.58	17.20	30.97	3.52	5.96	303	141	253

Fonte: os autores, 2025.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

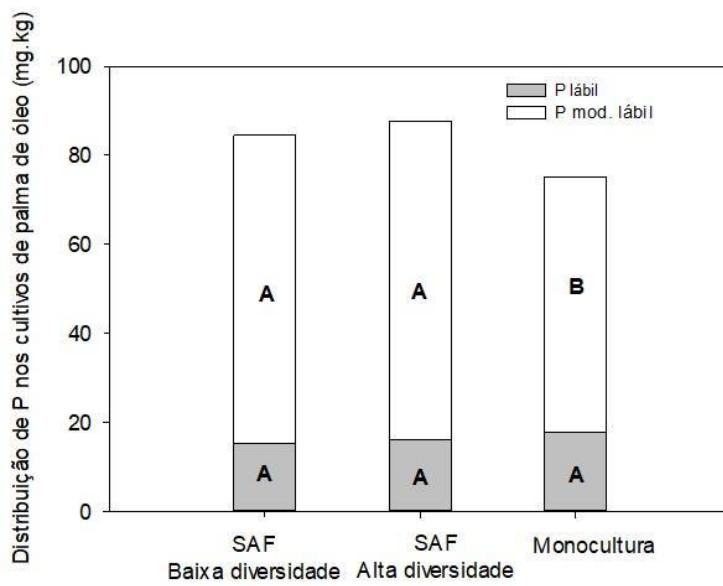
Tabela 3. Disponibilidade das frações de Fósforo inorgânico (Pi) e Fósforo orgânico (Po) lábeis e moderadamente lábeis nos três tipos de plantios da área de estudo.

Tipos de plantios de palma de óleo	P lábil do solo				P moderadamente lábil do solo			
	P resina (mg.kg)	Pi NaHCO <sub>3</sub> (mg.kg)	Po NaHCO <sub>3</sub> (mg.kg)	Pi NaOH 0,1M (mg.kg)	Po NaOH 0,1M (mg.kg)			
Baixa diversidade	6,27 ± 0,57 b	18,67 ± 0,58 c	21,11 ± 8,30 a	62,57 ± 6,43 b	75,77 ± 5,39 a			
Alta diversidade	7,09 ± 0,88 a	24,70 ± 2,71 b	16,13 ± 1,53 b	61,30 ± 8,67 b	82,18 ± 21,63 a			
Monocultivo	8,13 ± 0,81 a	33,86 ± 8,09 a	11,09 ± 4,69 c	87,80 ± 13,29 a	26,93 ± 13,06 b			

Fonte: os autores, 2025.

Dados são média +/- erro padrão (n=6) Letras diferentes indicam diferença significativa entre tipos de plantio pelo teste Tukey (p < 0,05).

Figura 2. Distribuição da fração total de Fósforo (P), considerando a soma Fósforo inorgânico (Pi) e Fósforo orgânico (Po) (lábil e moderadamente lábil) entre os tratamentos. Dados são médias, n=12. As letras indicam diferença significativa pelo teste Tukey a nível de 5% de probabilidade.



Fonte: os autores, 2025.

Os resultados mostraram que a quantidade total de P lábil não diferiu significativamente entre SAFs e monocultivo (Figura 2). Entretanto, observou-se distinção entre as frações: no SAF de baixa diversidade predominou a forma orgânica (Po), enquanto o monocultivo concentrou maior proporção de P inorgânico (Tabela 3). Esse comportamento sugere que os SAFs, mesmo sem aumentar o total de P lábil, diversificam as formas disponíveis do nutriente, o que pode representar uma vantagem para a ciclagem de nutrientes e para o equilíbrio ecológico do sistema. Nas frações moderadamente lábeis, os SAFs apresentaram incremento de aproximadamente 20% em relação ao monocultivo (Figura 2). O predomínio de Po nessa fração nos SAFs reforça o papel da matéria orgânica e da biomassa depositada pelas espécies arbóreas e frutíferas. Esse reservatório é fundamental para garantir disponibilidade de P em médio prazo, evitando dependência exclusiva de adubações minerais. No monocultivo, por sua vez, a maior parte do P moderadamente lábil correspondeu à fração inorgânica, reflexo do uso intensivo de fertilizantes químicos.

A diversidade de plantas nos SAFs (Tabela 1), demonstrou relação direta com a qualidade do solo. O SAF de alta diversidade, em especial, apresentou maior equilíbrio entre formas orgânicas e inorgânicas, resultado que sugere maior atividade microbiana e estímulo à mineralização da matéria orgânica. Esse efeito é coerente com o conceito de “priming effect”, em que a biomassa microbiana intensifica a liberação de nutrientes do solo. Resultados semelhantes foram reportados em agroflorestas de cacau na Amazônia (FONTES et al., 2014) e em sistemas de consórcio com

leguminosas na África (AKINNIFESI et al., 2007). Esses trabalhos reforçam que a diversidade funcional das espécies vegetais contribui para maior resiliência do solo e manutenção de nutrientes.

Ao mesmo tempo em que o monocultivo depende fortemente da adubação química, os SAFs apresentam um modelo produtivo mais autossuficiente, capaz de manter a fertilidade por meio da ciclagem biogeoquímica. Além de favorecer a sustentabilidade econômica da agricultura familiar, os SAFs reduzem riscos ambientais como erosão, lixiviação de nutrientes e perda de biodiversidade. A adoção em larga escala desses sistemas pode se constituir em estratégia relevante para alinhar produção agrícola e conservação na Amazônia.

#### **4 CONCLUSÕES**

Os SAFs orgânicos proporcionaram suprimento de P lábil comparável ao monocultivo, mas se destacaram por ampliar os estoques de P moderadamente lábil, fundamental para a sustentabilidade agrícola. Recomenda-se ampliar a adoção desses sistemas como alternativa ao monocultivo intensivo da palma de óleo na Amazônia.

## REFERÊNCIAS

- AKINNIFESI, F. K.; MAKUMBA, W.; SILESHI, G.; AJAYI, O. C.; MWETA, D. Synergistic effect of inorganic N and P fertilizers and organic inputs from *Gliricidia sepium* on productivity of intercropped maize in Southern Malawi. *Plant and Soil*, v. 294, n. 1–2, p. 203–217, 2007.
- BACKHOUSE, M., GREEN GRABBING — the case of palm oil expansion in so-called degraded areas in the eastern Brazilian Amazon. In: Dietz, K., Engels, B., Pye, O., Brunnengraber, A. (Eds.), *The Political Ecology of Agrofuels*. Routledge, Abingdon, p. 167–185. 2015.
- BAENA, A. R. C.; FALESI, I. C. Avaliação do potencial químico e físico dos solos sob diversos sistemas de uso da terra na Colônia Agrícola de Tomé-Açu, Estado do Pará. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1999. 23 p.
- BÜNEMANN, E.; OBERSON, A.; FROSSARD, E. (org.). *Phosphorus in Action: Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling*. Heidelberg: Springer, 2011.
- CONDRON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by <sup>31</sup>P-NMR analysis. *Journal of Soil Science*, v.36, p.199-207, 1985.
- CÓRDOBA, D., et al. Understanding Local Perceptions of the Impacts of Large-Scale Oil Palm Plantations on Ecosystem Services in the Brazilian Amazon. *Forest Policy and Economics*, v. 109. dez. 2019. Doi:10.1016/j.forpol.2019.102007.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 3 ed. Brasília: Informação Tecnológica, 2017. 628 p.
- FONTES, A. G.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; et al. Nutrient stocks in litterfall and litter in cocoa agroforests in Brazil. *Plant and Soil*, v. 383, n. 1–2, p. 313–335, 2014.
- HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v 46, p. 970-976, 1982.
- MCGRATH, D. A.; COMERFORD, N. B.; DURYEA, M. L. Litter dynamics and monthly fluctuations in soil phosphorus availability in an Amazonian agroforest. *Forest Ecology and Management*, v. 131, n. 1–3, p. 167–181, 2000.
- MCGRATH, D. A.; SMITH, C. K.; GHOLZ, H. L.; OLIVEIRA, F. DE A. Effects of Land-Use Change on Soil Nutrient Dynamics in Amazônia. *Ecosystems*, v. 4, n. 7, p. 625–645, 2001.
- NZIGUHEBA, G.; et al. Phosphorus in smallholder farming systems of sub-Saharan Africa: implications for agricultural intensification. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* v. 104, p. 321–340, 2016.
- PACHECO N.A; BASTOS T.X. Frequência diária de chuva em Tomé-Açu, PA. São Paulo, 2008.
- PHOSRI, C.; RODRIGUEZ, A.; SANDERS, I. R.; JEFFRIES, P. The role of mycorrhizas in more sustainable oil palm cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. v. 135. n.3. p. 187-193. 2010. Doi: 10.1016/j.agee.2009.09.006.

ROY, E. Phosphorus recovery and recycling with ecological engineering: a review. *Ecological engineering*, v. 98, p. 213-227, 2016.

SCHOLZ, R. W.; ROY, A. H.; BRAND, F. S.; HELLUMS, D. T.; ULRICH, A. E. (ORGs.). *Sustainable Phosphorus Management*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.

WITHERS, P. et al. Transitions to sustainable management of phosphorus in brazilian agriculture. *Scientific reports*, v. 8, p. 1, 2018.

VIJAY, V., PIMM, S., JENKINS, C., SMITH, S., The impacts of oil palm on recent deforestation and biodiversity loss. *PLoS One* 11 v. 7. 2016.