ReGeo ISSN: 2177-3246

EFICIÊNCIA DO USO DO FÓSFORO E PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA POR HÍBRIDOS DE MILHO EM SOLO DO SUDESTE PARAENSE

PHOSPHORUS USE EFFICIENCY AND DRY MATTER PRODUCTION OF MAIZE HYBRIDS IN SOIL FROM SOUTHEASTERN PARÁ

EFICIENCIA DEL USO DEL FÓSFORO Y PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA POR HÍBRIDOS DE MAÍZ EN SUELO DEL SUDESTE PARAENSE

https://doi.org/10.56238/revgeov17n8-144

Data de submissão: 14/07/2026 **Data de publicação:** 14/08/2026

Carlos Alberto Costa Veloso
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: carlos.veloso@embrapa.br

Eduardo Jorge Maklouf Carvalho
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: eduardo.maklouf@embrapa.br

Raimundo Cosme de Oliveira Junior
Doutor em Geoquímica Ambiental
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: raimundo.oliveira-junior@embrapa.br

Francisco Ronaldo Sarmanho de Souza
Mestre em Genética e Melhoramento de Plantas
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: ronaldo.sarmanho@embrapa.br

Arystides Resende Silva
Doutor em Solos e Nutrição de Plantas
Instituição: Embrapa Milho e Sorgo
E-mail: arystides.silva@embrapa.br

Austrelino Silveira Filho
Doutor em Agronomia
Instituição: Embrapa Amazônia Oriental
E-mail: austrelino.silveira@embrapa.br

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de doses de fósforo (P) sobre o crescimento e a produção de matéria seca de diferentes híbridos de milho cultivados em um Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa do Estado do Pará. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando vasos com 3 dm3 de capacidade. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, em esquema fatorial 4×5, correspondendo a quatro híbridos de milho recomendados para a região (Sol da Manhã, Agroceres-AG4051, BR-5102 e BR-5107) e cinco doses de P (0, 100, 150, 200 e 250 mg kg⁻¹

de P, utilizando como fonte o superfosfato triplo), com quatro repetições. A colheita foi realizada aos 45 dias após a emergência. Os resultados evidenciaram que a aplicação de fósforo influenciou de forma mais acentuada o desenvolvimento da parte aérea do que o sistema radicular. O incremento das doses de P promoveu um aumento linear e significativo no acúmulo de fitomassa seca. O híbrido BR-5107 destacou-se dos demais por apresentar maior eficiência de absorção e conversão do fósforo em matéria seca da parte aérea, caracterizando-se como um genótipo altamente responsivo à fertilização fosfatada nas condições avaliadas. Os híbridos de milho avaliados exibem ampla variação genotípica quanto à sensibilidade e eficiência de uso do fósforo adicionado, demandando estratégias diferenciadas de recomendação de fertilizantes.

Palavras-chave: Zea Mays. Adubação Fosfatada. Nutrição de Plantas. Solos Tropicais. Eficiência Nutricional.

ABSTRACT
The objective of this study was to evaluate the effect of phosphorus (P) doses on the growth and dry matter production of different maize hybrids grown in a clayey Oxisol from the State of Pará, Brazil. The experiment was carried out in a greenhouse using 3 dm3 pots. The experimental design was randomized blocks in a 4×5 factorial scheme, with four maize hybrids recommended for the region (Sol da Manhã, Agroceres-AG4051, BR-5102, and BR-5107) and five P doses (0, 100, 150, 200, and 250 mg kg^{-1} of P, as triple superfosfate), with four replications. Plants were harvested 45 days after emergence. The results showed that phosphorus fertilization had a more pronounced effect on shoot development than on the root system. Increasing P doses promoted a linear and significant increase in dry matter accumulation. The hybrid BR-5107 stood out, presenting higher absorption efficiency and conversion of phosphorus into shoot dry matter, positioning it as a highly responsive genotype to phosphate fertilization under the evaluated conditions. The evaluated maize hybrids exhibit wide genotypic variation regarding sensitivity to and efficiency of use of added phosphorus, requiring differentiated fertilizer recommendation strategies.

Keywords: *Zea mays*. Phosphate Fertilization. Plant Nutrition. Tropical Soils. Nutrient Efficiency.

RESUMEN
El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de dosis de fósforo (P) sobre el crecimiento y la producción de materia seca de diferentes híbridos de maíz cultivados en un Latosol Rojo distrófico de textura arcillosa del Estado de Pará. El experimento fue conducido en casa de vegetación, utilizando macetas con 3 dm^3 de capacidad. El delineamiento experimental fue el de bloques al azar, en esquema factorial 4×5, correspondiendo a cuatro híbridos de maíz recomendados para la región (Sol da Manhã, Agroceres-AG4051, BR-5102 y BR-5107) y cinco dosis de P (0, 100, 150, 200 y 250 mg kg^{-1} de P, utilizando como fuente el superfosfato triple), con cuatro repeticiones. La cosecha fue realizada a los 45 días después de la emergencia. Los resultados evidenciaron que la aplicación de fósforo influyó de forma más acentuada en el desarrollo de la parte aérea que en el sistema radicular. El incremento de las dosis de P promovió un aumento lineal y significativo en la acumulación de fitomasa seca. El híbrido BR-5107 se destacó de los demás por presentar mayor eficiencia de absorción y conversión del fósforo en materia seca de la parte aérea, caracterizándose como un genotipo altamente responsivo a la fertilización fosfatada en las condiciones evaluadas. Los híbridos de maíz evaluados exhiben amplia variación genotípica en cuanto a la sensibilidad y eficiencia de uso del fósforo añadido, demandando estrategias diferenciadas de recomendación de fertilizantes.

Palabras clave: *Zea mays*. Fertilización Fosfatada. Nutrición de Plantas. Suelos Tropicales. Eficiencia Nutricional.

1 INTRODUÇÃO

O milho é cultivado em todo o território brasileiro, o que faz com que assuma expressiva importância, tanto pelo volume de produção e extensão da área plantada, como pelo papel socioeconômico que representa, constituindo-se como fonte alternativa da renda para o agricultor. No ano agrícola 2024/2025, a área total cultivada com milho no Brasil foi de 21,9 milhões de hectares e a produção foi estimada de 138,4 milhões de toneladas (IBGE, 2025).

O milho em função de seu uso na alimentação humana, animal e ultimamente utilizado como matéria prima para biocombustível, é o mais importante cereal cultivado e comercializado no mundo. A expansão da produção de grãos no Estado do Pará, historicamente posicionado na 8ª colocação nacional, teve uma participação modesta, embora tenha registrado uma produção de 425 mil toneladas, cultivadas em uma área próxima a 37 mil hectares (IBGE, 2025).

O milho (*Zea mays* L.) consolida-se como uma das commodities agrícolas mais estratégicas para a segurança alimentar global e para a balança comercial brasileira. A produção nacional de grãos atingiu patamares recordes, impulsionada pelo avanço das tecnologias de manejo, uso de híbridos de alto potencial produtivo e a consolidação de novas fronteiras agrícolas, com destaque para a expansão da cultura nas regiões Centro-Oeste e Norte do país. No Estado do Pará, o cultivo do milho tem demonstrado forte expansão tanto na safrinha quanto como componente essencial em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária (ILP), demandando ajustes rigorosos no manejo da fertilidade do solo regional.

Os solos predominantes na Amazônia Oriental, na maioria são Latossolos e Argissolos, que apresentam avançado estado de intemperismo. Quimicamente, caracterizam-se pela elevada acidez, alta saturação por alumínio e, sobretudo, por teores criticamente baixos de fósforo (P) disponível. Além da reduzida reserva natural deste macronutriente, estes solos possuem alta capacidade de fixação ou adsorção de fosfatos na fração mineralógica — constituída principalmente por óxidos de ferro (goethita e hematita) e de alumínio (gibbsita) —, o que restringe severamente a eficiência dos fertilizantes fosfatados convencionais.

Os híbridos modernos apresentam maior ren-dimento e são mais resistentes a condições desfavo-ráveis, como deficiência hídrica e competição entre plantas, pois são mais adaptados a maiores densidades populacionais (Serpa *et al.*, 2012). Esses híbridos pos-suem características importantes para o adensamento, como menor estatura de planta e altura de inserção de espiga, menor esterilidade de plantas, menor duração do subperíodo pendoamento-espigamento, angulação mais ereta das folhas, e elevado potencial produtivo (Modolo *et al.*, 2010).

Entre os diversos fatores condicionantes da produtividade, o uso de cultivares de alto valor agronômico, o emprego de fertilizantes e populações adequadas de plantas, mostram-se capazes de proporcionar altos rendimentos.

Nesse sentido, o sistema plantio direto com diversificação de espécies e maior produção de palhada, associado a um manejo de solo que favoreça o aprofundamento radicular e o equilíbrio nutricional, constitui importante estratégia para convivência com as inconstâncias climáticas, estabilidade de produção e otimização do retorno aos investimentos na lavoura. Uma grande limitação é que, embora existam alternativas tecnológicas para ganhos de eficiência nos sistemas de produção de grãos no Brasil, ainda são insuficientes os esforços no sentido de se desenvolverem recomendações integradas, envolvendo combinações de espécies vegetais e práticas de manejo agronômico, de modo a demonstrar as vantagens de sistemas intensificados e difundi-los para o universo de produtores.

No Sistema Plantio Direto, a rotação de culturas e a conservação da matéria orgânica influenciam os estoques e padrões de ciclagem de P no solo de modo a melhorar o seu aproveitamento pelas culturas. Silva *et al.* (2000) verificaram que a estratificação em SPD tem sido comum originada pela deposição superficial de resíduo vegetal de parte aérea, bem como pelo crescimento radicular mais pronunciado em camadas superficiais, inclusive de espécies gramíneas, como o milho (Silva *et al.*, 2000)

A maioria dos estudos com adubação fosfatada, em condições de campo e em solos com alto poder de fixação de P, foi desenvolvida nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. Na literatura são raros os estudos, com a cultura do milho, relacionados à adubação fosfatada no estado do Pará.

Avanços tecnológicos no cultivo de milho, como a utilização de híbridos de melhor desempenho, alterações em espaçamento e densidade de semeadura, aliados a melhorias na fertilidade do solo e práticas de adubação, vêm proporcionando incrementos significativos em produtividade (Von Pinho *et al.*, 2008).

A produtividade da cultura depende da interação de três componentes: genótipo, fenótipo e a variabilidade de fatores bióticos e abióticos do meio (pragas, doenças, temperatura, umidade relativa, irradiação, disponibilidade hídrica) (Souza & Barbosa, 2015). Os fatores que podem ser alterados visando elevar a produtividade do milho destaca-se a densidade populacional, podendo proporcionar melhor uso do ambiente pelos genótipos atuais (Dourado Neto *et al.*, 2003).

Resende *et al.* (2006) observaram que as densidades de 70 e 90 mil plantas ha^{-1} foram mais promissoras para produtividade de grãos de milho, em relação a densidade de 55 mil plantas ha^{-1}, independentemente do espaçamento utilizado.

Com o surgimento de híbridos de milho de ciclo mais curto, estatura reduzida, menor número de folhas, sendo estas mais eretas, aumentou o potencial de resposta Um dos nutrientes que se caracteriza por possuir um dos maiores índices de perdas é o nitrogênio, as quais podem ocorrer por lixiviação, escorrimento superficial, erosão, volatilização de amônia e desnitrificação (Queiroz, 2011). Nesse aspecto, é necessário buscar técnicas que possibilitem a redução das perdas, aumentando a eficiência da fertilização com fosforo e, consequentemente, a produtividade da cultura (Kappes *et al.*, 2014).

Avanços tecnológicos no cultivo de milho, como a utilização de híbridos de melhor desempenho, alterações em espaçamento e densidade de semeadura, aliados a melhorias na fertilidade do solo e práticas de adubação, vêm proporcionando incrementos significativos em produtividade (VON PINHO *et al.*, 2008).

Considerando as características locais e a escassez de informações nas condições do oeste do Pará, há necessidade de maiores estudos sobre a adequação de doses e práticas de manejo da adubação, para o aumento da eficiência de uso de fertilizantes fosfatada (Veloso *et al.*, 2012), principalmente diante da expansão do cultivo agrícola de grãos no estado do Pará. Tais estudos permitirão maximizar a eficiência do uso de fertilizantes, especialmente no SPD, diminuindo custos para o produtor e minimizando os impactos ambientais.

Embora o fósforo seja o macronutriente menos exigido em termos quantitativos pela cultura do milho, ele atua diretamente em processos vitais como a transferência de energia (ATP), divisão celular, respiração, fotossíntese e no desenvolvimento inicial do sistema radicular. Consequentemente, o suprimento inadequado de P nas fases iniciais compromete de forma irreversível o índice de área foliar, o acúmulo de matéria seca e o potencial produtivo final da cultura.

Diante do elevado custo dos fertilizantes fosfatados e da necessidade de otimização dos recursos no campo, a seleção de genótipos que apresentem maior eficiência na absorção e na utilização biológica do P constitui uma estratégia indispensável para a sustentabilidade agrícola. A resposta morfofisiológica do milho à adubação varia amplamente em função do fundo genético dos híbridos comerciais disponíveis.

Face ao exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de doses crescentes de fósforo sobre o crescimento, a altura de plantas e a produção de matéria seca da parte aérea e radicular de quatro híbridos de milho cultivados em um Latossolo Vermelho distrófico representativo do Estado do Pará.

2 METODOLOGIA

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Embrapa Amazônia Oriental, em Belém, PA (altitude de 15 m; 01º27′21″ S e 48°30′16″ W). O clima local é classificado como Af (equatorial úmido) segundo Köppen-Geiger, com precipitação média anual de 2537 mm e umidade relativa do ar em torno de 98%.

Utilizou-se como unidade experimental vasos com capacidade de 3 dm3, preenchidos com amostras de um Latossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa, coletado na camada de 0 -20 cm no município de Redenção, PA. As características químicas iniciais do solo revelaram: pH (H_2O) =4,6; M.O.=27,5 g kg^{-1}; P disponível (Mehlich-1)=1,0 mg dm^{-3}; Ca^{2+}=4,0 cmol*c*dm^{-3}; Mg^{2+}=2,0 cmol*c* dm^{-3}; K^{+}=0,8 cmol*c* dm^{-3}; Al^{3+}=4,1 cmol*c* dm^{-3}. A análise textural apresentaram os seguintes resultados: areia 240 g kg^{-1}; silte 180 g kg^{-1} e argila 580 g kg^{-1} .

A calagem foi realizada 60 dias antes da semeadura com uma mistura de $CaCO_3$ e $MgCO_3$ (Pureza Analítica, proporção 3:1) para elevar a saturação por bases (V%) para 70%. A adubação de manutenção basal seguiu as recomendações para cultivo em vasos, fornecendo (em mg kg^{-1}): 200 de N (ureia), 150 de K (KCl), 48 de S (sulfato de amônio), 0,5 de B (ácido bórico), 1,5 de Cu (CuSO4), 1,5 de Mn ($MnSO_4$) e 5,0 de Zn ($ZnSO_4$).

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, em esquema fatorial 4×5, com quatro repetições. Os fatores consistiram em quatro híbridos de milho (Sol da Manhã, Agroceres-AG4051, BR-5102 e BR-5107) e cinco doses de fósforo (0, 100, 150, 200 e 250 mg kg^{-1} de P), fornecidas via superfosfato triplo finamente moído e homogeneizado em todo o volume do vaso antes do plantio. O nitrogênio e o potássio foram parcelados em três aplicações aos 10, 20 e 40 dias após a emergência. Os vasos foram mantidos próximos à capacidade de campo via pesagem diária e reposição com água destilada.

As plantas foram colhidas aos 45 dias após o plantio, separando-se a parte aérea e o sistema radicular (este lavado em água corrente sobre peneiras). Ambas as frações foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65∘C até massa constante para a determinação da matéria seca da parte aérea (MSPA) e matéria seca da raiz (MSR), e as análises de tecido vegetal conforme (Malavolta *et al.*, 1997) foram realizadas no Laboratório de Análises de Solos da Embrapa Amazônia Oriental.

Os dados de produção de matéria seca da parte aérea, das raízes e da altura das plantas, bem como os teores de nutrientes na parte aérea obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) através do software SAS, e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e as doses de fósforo foram submetidas à análise de regressão e correlação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da variância evidenciou efeito significativo (P<0,05) para os tratamentos Variedades de milho (V) sobre a altura das plantas e matéria seca da parte aérea. Enquanto isso, para Doses de Fósforo (P), houve efeito na altura das plantas, matéria seca da parte aérea e raízes. A interação variedade x doses de fósforo (V x P) revelou efeito significativo apenas sobre a produção de matéria seca da parte aérea, conforme a Tabela 1.

A significância da interação Variedade (V) x Doses de Fósforo (P) para o parâmetro da matéria seca da parte aérea (P<0,05) indica reação diferenciada de variedades de milho a fósforo em solo sob condições de acidez corrigida. Esse efeito também foi observado por Schenk & Barber (1979) quando trabalharam com genótipos de milho.

Tabela 1. Análise de variância para efeitos de cinco doses de fósforo sobre a altura de plantas (cm), matéria seca da parte aérea e das raízes (g/vaso

		Altura de Plantas		M.S. Parte Aérea		M.S.Raízes	
F.V	G.L.	QM	F	QM	F	QM	F
Variedades(V)	3	910,6	6,7 **	18,2	3,8 *	0,4	0,5 n.s.
Doses Fósforo (P)	4	3.240,1	23,7 **	92,9	19,2 **	6,5	7,2 **
V x P	12	235,6	1,7 n.s.	10,8	2,2 *	1,3	1,5 n.s.
Residuo	19	136,8	-	4,9	-	0,9	-
C.V.		6,4		8,5		7,2	
Média		93,10		6,85		2,22	

n.s. – não significativo (p>0,05); * - significativo (p<0,05); ** - altamente significativo (p<0,01)
Fonte: Elaborada pelos autores

Os dados de produção de matéria seca da parte aérea e das raízes em g/vaso e altura das plantas (cm) encontram-se na Tabela 2. De todos os efeitos indicados, a adubação fosfatada apresentou maior incremento na produção de matéria seca (48%), seguida da interação fósforo x variedades (14%) e variedades (3,5%). As doses de fósforo propiciaram também diferenças significativas na produção de matéria seca, com a dose de 250 mg/kg de P, apresentando os melhores resultados na parte aérea da variedade BR-5107 e BR 5102. Estes resultados concordam com os obtidos por Souza *et al.*(1999) com relação ao desempenho dessa variedade.

3.1 CRESCIMENTO EM ALTURA DE PLANTAS

O comportamento do crescimento em altura de plantas em função das doses de fósforo evidenciou perfis de resposta distintos entre os genótipos de milho avaliados (Tabela 1). Na ausência completa de fertilização fosfatada (dose 0 mg kg^{-1}), as plantas exibiram um crescimento severamente deprimido, apresentando médias de altura homogêneas entre os híbridos, situando-se na faixa estreita de 53,7 a 67,7 cm. Esse nivelamento por baixo demonstra que a severidade da deficiência de P atua

como uma barreira fisiológica intransponível, impedindo a manifestação do potencial genético de elongação do colmo mesmo em materiais melhorados de alto vigor (Veloso *et al.*, 2018)

Com o fornecimento da primeira dose de fósforo (100 mg kg^{-1}), observou-se um salto expressivo na estatura das plantas de quase todos os híbridos. O híbrido BR-5107 apresentou o maior incremento inicial, saltando de 53,7 cm na testemunha para 113,3 cm na dose de 100 mg kg^{-1}, o que representa um aumento de 111% em sua estrutura vertical. Os híbridos AG-4051 e BR-5102 também exibiram respostas vigorosas, atingindo 104,0 cm e 101,7 cm, respectivamente, com a aplicação de 100 mg kg^{-1} de P. O híbrido Sol da Manhã, por sua vez, demonstrou menor sensibilidade à dose inicial, crescendo de forma mais gradual e registrando 79,7 cm no mesmo nível de adubação.

Analisando a dinâmica ao longo das doses crescentes, os híbridos BR-5107 e BR-5102 mantiveram médias elevadas e estáveis de altura, com o BR-5102 atingindo seu ápice absoluto de crescimento vertical (112,0 cm) na dose máxima de 250 mg kg^{-1}. O híbrido AG-4051 manifestou uma tendência de leve declínio em sua estatura nas doses superiores de 200 e 250 mg kg^{-1} (101,3 e 93,0 cm, respectivamente). Esse decréscimo em doses muito elevadas em vasos pode estar associado a desbalanços nutricionais induzidos pelo excesso de fósforo na solução do solo, o qual é amplamente reconhecido por provocar o antagonismo por competição e inibição na absorção de micronutrientes essenciais, notadamente o zinco (Zn^{2+}), induzindo uma deficiência induzida deste elemento que atua diretamente na síntese do triptofano, precursor do ácido indolacético (AIA), hormônio responsável pela elongação celular dos entrenós (Malavolta *et al.*, 1989).

O incremento na altura das plantas em resposta à adubação fosfatada está diretamente acoplado ao papel do fósforo no metabolismo energético celular. Como o P é o componente central da molécula de ATP, seu suprimento adequado acelera os processos de divisão celular (mitose) nos meristemas apicais do colmo e potencializa a expansão das células recém-formadas através da manutenção da turgor celular. Resultados análogos foram descritos por Silva *et al.* (2014) e Lana *et al.* (2014), que observaram curvas de resposta quadráticas e lineares para a altura do milho submetido a incrementos na fertilização fosfatada em solos tropicais, confirmando a alta sensibilidade deste indicador morfológico ao status de fósforo no solo.

Tabela 2. Valores médios de altura de plantas, matéria seca da parte aérea e matéria seca das raízes de quatro híbridos de milho em função de cinco do

Altura de plantas (cm)						
Híbridos	Doses de fósforo (mg.kg-1)					**Média**
	0	**100**	**150**	**200**	**250**	
AG-4051	0,74 a	2,82 a	2,29 a	3,13 a	1,94 bc	2,18 a
SOL-MANHÃ	1,71 a	1,89 a	2,01 a	2,69 a	3,29 a	2,32 a
BR-5102	0,73 a	1,55 a	3,08 a	1,78 a	2,90 ab	2,01 a
BR-5107	0,58 a	3,47 a	2,17 a	2,75 a	2,97 ab	2,39 a
Média	0,94	2,43	2,39	2,59	2,77	2,22
	Matéria seca da parte aérea (g.vaso^{-1})					**Média**
	0	**100**	**150**	**200**	**250**	
AG-4051	2,00 a	6,67 a	5,33 a	10,67a	8,00 a	6,53 a
SOL-MANHÃ	3,33 a	3,33 a	5,33 a	6,00 a	9,33 a	5,47 a
BR-5102	2,33 a	6,00 a	10,00 a	6,67 a	12,00 a	7,40 a
BR-5107	2,00 a	9,33 a	9,33 a	9,33 a	10,00 a	8,00 a
Média	2,42	6,33	7,50	8,17	9,83	6,85
	Matéria seca da raiz (g.vaso^{-1})					**Média**
	0	**100**	**150**	**200**	**250**	
AG-4051	0,74 a	2,82 a	2,29 a	3,13 a	1,94 bc	2,18 a
SOL-MANHÃ	1,71 a	1,89 a	2,01 a	2,69 a	3,29 a	2,32 a
BR-5102	0,73 a	1,55 a	3,08 a	1,78 a	2,90 ab	2,01 a
BR-5107	0,58 a	3,47 a	2,17 a	2,75 a	2,97 ab	2,39 a
Média	0,94	2,43	2,39	2,59	2,77	2,22

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não apresentam diferença significativa, ao nível de 5%, pelo teste de Tukey.
Fonte: Elaborada pelos autores

3.2 ACÚMULO DE MATÉRIA SECA DA PARTE AÉREA (MSPA)

A variável matéria seca da parte aérea (MSPA) constitui um dos parâmetros mais fiéis para a determinação da eficiência agronômica e da resposta fitotécnica de culturas anuais ao manejo nutricional. Os dados médios obtidos revelaram um incremento substancial e generalizado na produção de biomassa aérea em resposta à elevação dos teores de P no solo (Tabela 1). Na testemunha absoluta (dose zero), o acúmulo de MSPA foi extremamente reduzido, variando de insignificantes 2,00 g vaso^{-1} (nos híbridos AG-4051 e BR-5107) a 3,33 g vaso^{-1} (no híbrido Sol da Manhã), sem diferenças estatísticas significativas entre os materiais pelo teste de Tukey (p>0,05). Essa semelhança quantitativa inicial reforça que, sob estresse agudo, as diferenças genéticas de eficiência de uso são minimizadas devido à ausência quase total do elemento essencial para dar início às rotas metabólicas básicas de crescimento.

A partir do momento em que o fósforo foi incorporado ao sistema, as trajetórias de acúmulo de fitomassa aérea divergiram nitivelmente entre os híbridos. O híbrido BR-5107 exibiu um padrão de resposta altamente eficiente: sua produção de MSPA saltou de 2,00 g vaso^{-1} para 9,33 g vaso^{-1} logo na dose inicial de 100 mg kg^{-1}. Impressionantemente, este patamar de produção manteve-se rigorosamente constante nas doses estáveis de 150 e 200 mg kg^{-1} (9,33 g vaso^{-1}), expandindo-se ligeiramente até atingir seu teto de 10,00 g vaso^{-1} na dose máxima de 250 mg kg^{-1}. Este formato de

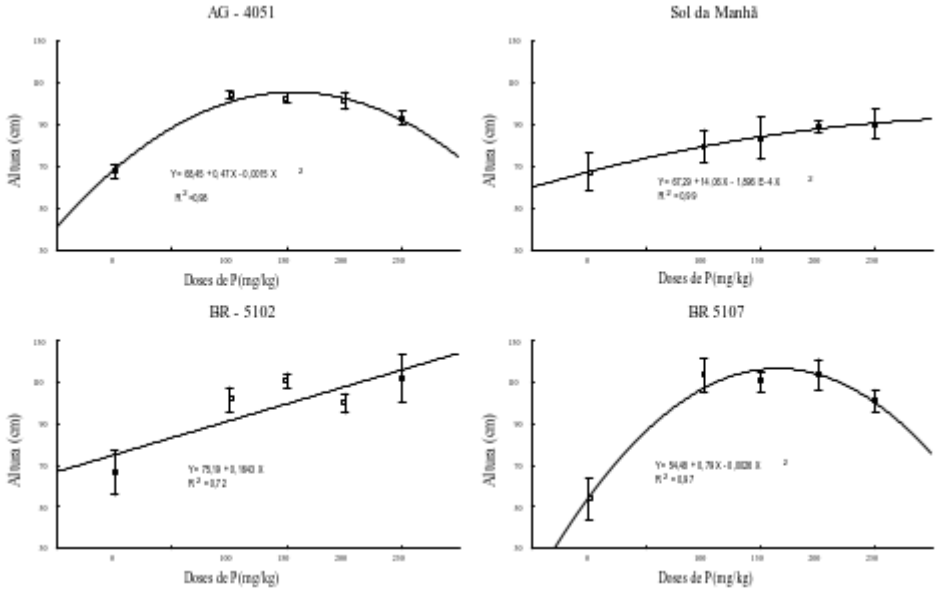
curva de resposta caracteriza o BR-5107 como um genótipo portador de alta **Eficiência de Aquisição e Utilização de Fósforo**. Ele demonstra a capacidade fisiológica de atingir o seu rendimento máximo próximo à saturação com um aporte de fertilizante significativamente menor que os demais, o que representa uma característica agronômica de enorme valor para sistemas agrícolas de baixo investimento ou para solos com alta capacidade de fixação, onde a moderação nas doses aplicadas reduz os custos operacionais.

O híbrido BR-5102, por sua vez, manifestou um comportamento típico de material **altamente responsivo à adubação**, exibindo um padrão de crescimento contínuo e escalonado. Sua MSPA evoluiu de 2,33 g vaso^{-1} (dose 0) para 6,00 g vaso^{-1} (dose 100), alcançou 10,00 g vaso^{-1} (dose 150), sofreu uma oscilação pontual para 6,67 g vaso^{-1} (dose 200) e culminou no maior valor absoluto de biomassa aérea registrado em todo o experimento: 12,00 g vaso^{-1} sob a dose de 250 mg kg^{-1}. Esse perfil indica que o BR-5102 possui um teto produtivo biológico elevado, expressando sua máxima performance sob condições de alta fertilidade e insumos abundantes.

Em contrapartida, o híbrido Sol da Manhã comportou-se de maneira tardia e menos eficiente no uso do recurso. Na dose de 100 mg kg^{-1}, sua produção permaneceu estacionada no mesmo valor da testemunha (3,33 g vaso^{-1}), mostrando-se incapaz de aproveitar o nutriente adicionado nesta concentração. Seu crescimento só começou a ser estimulado a partir da dose de 150 mg kg^{-1} (5,33 g vaso^{-1}), progredindo para 6,00 g vaso^{-1} na dose de 200 mg kg^{-1} e atingindo seu ponto máximo (9,33 g vaso^{-1}) apenas na dose limite de 250 mg kg^{-1}. Esse tipo de comportamento denota uma baixa eficiência no aproveitamento de doses baixas e médias, exigindo saturação pesada do solo com fosfatos para que a planta consiga romper a inércia do estresse e iniciar o acúmulo efetivo de matéria seca.

A adubação fosfatada aumentou significativamente a produção de matéria seca, alturas das plantas de milho e os teores de fósforo no solo e nas folhas (Tabela 3). Esse incremento de produção de matéria seca era esperado, por serem, as plantas de milho, sensíveis a baixos teores desse nutriente no solo, o que concordam os resultados de Coutinho *et al.* (1991) e Souza *et al.* (1985). A máxima produção de matéria seca de milho esteve associada a concentrações de fósforo no solo, de acordo com cada variedade (Figura 1), sendo mais evidente na variedade BR -5107 e o milho híbrido AG-4051. Observa-se na Tabela 2, que os rendimentos da matéria seca da parte aérea, matéria seca da raiz e altura das plantas de milho foram crescentes à medida que se elevou a quantidade de fósforo adicionado, em todas as variedades de milho. A diferença de comportamento entre as variedades em relação à adição de fósforo, pode ser comprovada pelos dados, onde se verifica que as variedades Sol da Manhã e BR-5107 apresentaram resposta quadrática em relação às doses de fósforo (Figura 2).

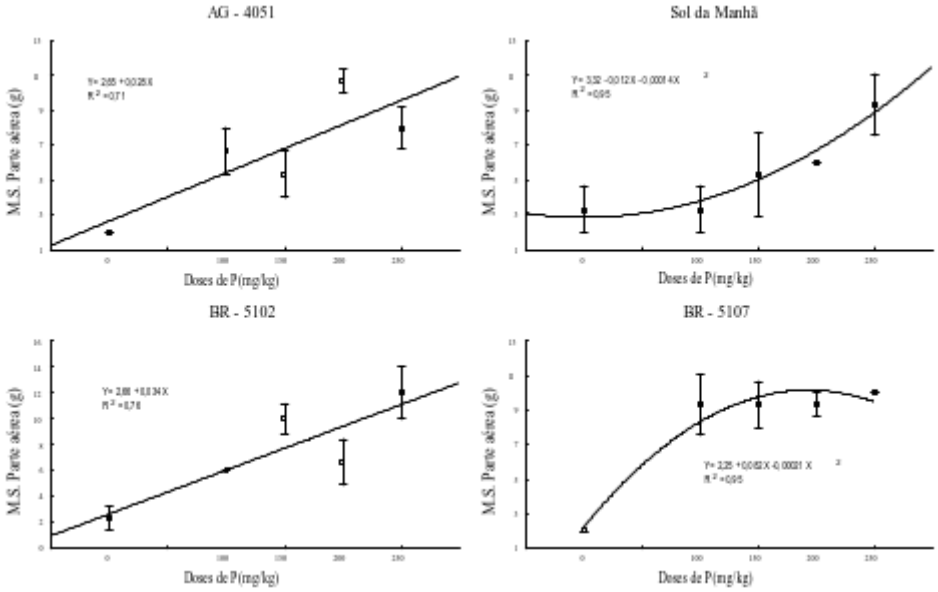
Figura 1. Ajustes dos modelos de regressão linear entre cinco doses de P (mg/kg) e os valores médios de altura (cm), em função de quatro variedades de milho.



Fonte: Elaborada pelos autores

Considerando-se os dados de altura média (Tabela 3), as diferenças entre as variedades AG-4051 e BR-5107, em função dos tratamentos, apresentaram efeito quadrático, sendo o seu ponto de máxima situado com a dose de 150 mg/kg de P, enquanto as variedades Sol da Manhã e BR-5102 apresentaram crescimento constante, com o ponto de máxima na maior dose de fósforo (250 mg/kg).

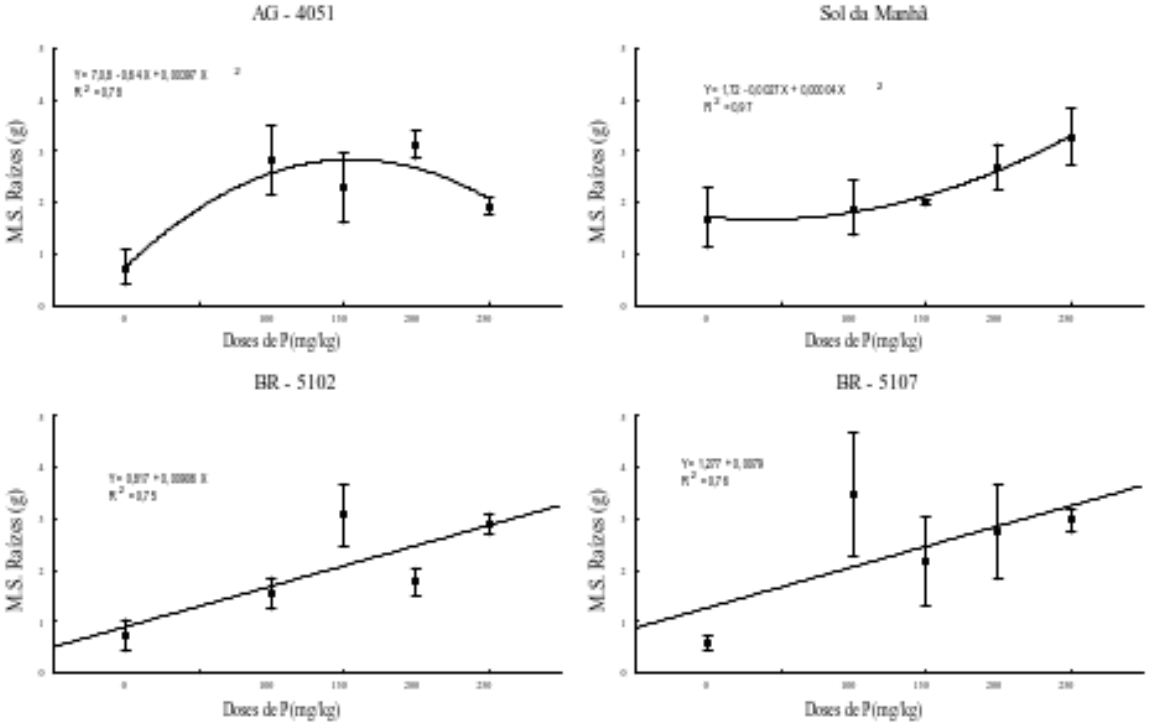
Figura 2. Ajustes dos modelos de regressão linear entre cinco doses de P (mg/kg) e os valores médios de matéria seca da parte aérea (g), em função de quatro variedades de milho.



Fonte: Elaborada pelos autores

O peso da matéria seca das raízes e parte aérea não apresentou significância na dose de 250 mg/kg de fósforo entre todas as variedades estudadas, como se verifica a Tabela 3 e Figura 3. Os parâmetros determinados na parte aérea estiveram mais correlacionados com doses e teores de fósforo no solo, quando comparados com o peso da matéria seca das raízes. Observa-se que houve uma correlação positiva entre os parâmetros altura, massa seca da parte aérea e massa seca das raízes (Tabela 3). Também observa-se uma correlação positiva entre os teores foliares de fósforo e uma correlação negativa para os teores de magnésio e cálcio encontrados na parte aérea das plantas com a massa seca da parte aérea e massa seca das raízes (Figuras 4 e 5).

Figura 3. Ajustes dos modelos de regressão linear entre cinco doses de P (mg/kg) e os valores médios de matéria seca das raízes (g), em função de quatro variedades de milho



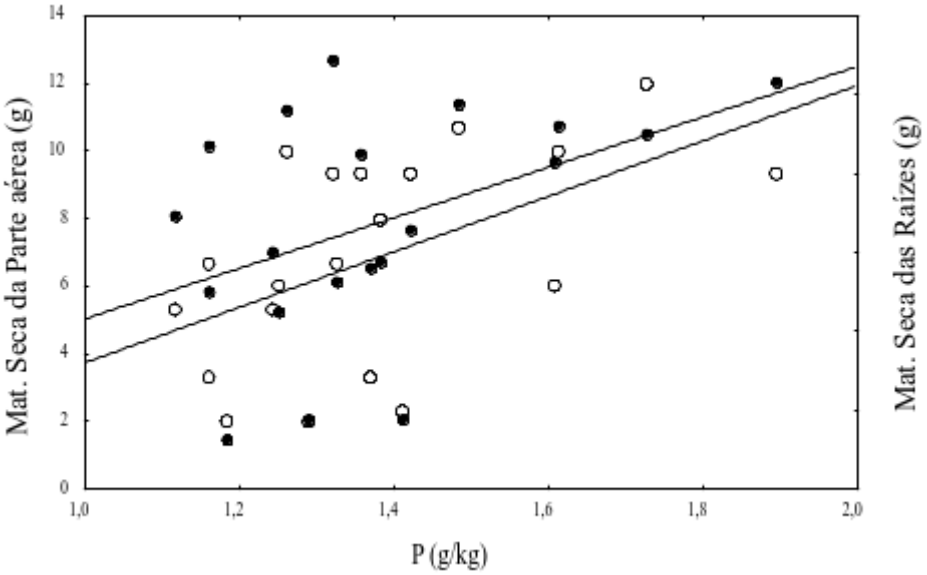
Fonte: Elaborada pelos autores

Tabela 3. Matriz de correlação linear para altura das plantas, massa seca da parte aérea, massa seca das raízes e teores dos macronutrientes. Belém, PA

Variáveis	Altura Plantas	M.S. P.Aérea	M.S. Raízes	N	P	K	S	Mg	Ca
Altura de plantas	—	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	*
M.S.Parte.Aérea	0,86	—	*	n.s.	*	n.s.	n.s.	*	*
MS.Raízes	0,78	0,85	—	n.s.	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
N	0,12	0,14	0,28	—	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.
P	0,20	0,53	0,45	0,27	—	n.s.	n.s.	n.s.	*
K	0,08	0,23	0,30	0,02	0,25	—	n.s.	n.s.	n.s.
S	-0,25	-0,33	-0,31	-0,11	0,00	-0,01	—	n.s.	*
Mg	-0,61	-0,59	-0,43	-0,46	-0,40	0,04	0,36	—	*
Ca	-0,46	-0,60	-0,44	-0,43	-0,60	0,06	0,48	0,84	—

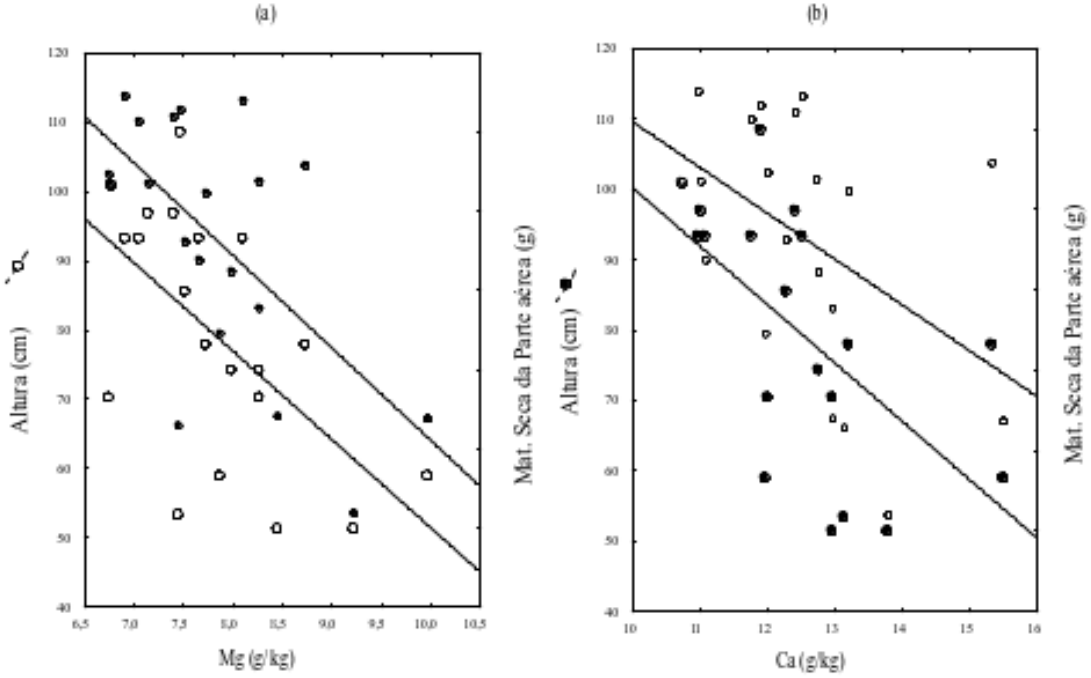
* Significativo ao nível de 5% de probabilidade, correlação de Pearson Fonte: Elaborada pelos autores

Figura 4. Relação entre os valores médios das concentrações de P (g/kg) com as médias de M.S. da parte aérea e das raízes de quatro variedades de milho.



Fonte: Elaborada pelos autores

Figura 5. Relação entre os valores médios das concentrações (g/kg) de (a) Mg e (b) Ca na matéria seca da parte aérea com as médias de altura (cm) de quatro variedades de milho.



Fonte: Elaborada pelos autores

Os resultados mostram que as cultivares de milho diferem em suas respostas à aplicação de fósforo. Portanto, são necessárias diferentes recomendações de adubação fosfatada no mesmo solo para diferentes cultivares. Fageria (1991) observou efeito semelhante na produção de matéria seca na cultura do arroz. Efeitos semelhantes foram observados por outros autores (Ben *et al.*, 1988), que

conduziram experimentos em vasos e indicaram o parâmetro produção de matéria seca da parte aérea da planta para expressar a resposta de genótipos de cevada à acidez de solo.

Esses resultados de divergência genética e plasticidade de partição foliar/radicular dão suporte direto às observações pioneiras de Souza *et al.* (1999) quanto ao comportamento dos híbridos recomendados para o Pará, e alinham-se perfeitamente com os dados de Silva em solos do Nordeste e Lana em solos do Sul do Brasil, solidificando a tese de que a resposta diferencial do milho ao fósforo é um padrão universal da espécie, mas cuja magnitude exata é modulada pela genética do híbrido e pela mineralogia específica da classe de solo local.

A relação entre híbridos e doses de fósforo (P) refere-se à eficiência nutricional específica de cada cultivar. Híbridos modernos (milho, sorgo, etc.) respondem de formas distintas à adubação fosfatada, sendo crucial realizar análise de solo para definir a dose ideal de fósforo.

A Eficiência Genética: cada híbrido possui uma capacidade diferente de absorver e utilizar o fósforo disponível no solo. Alguns se desenvolvem melhor em solos pobres, enquanto outros exigem maiores teores para atingir o potencial máximo de produtividade. A recomendação de adubação: a definição da quantidade exata exige a leitura da **análise de solo**. A capacidade tampão do solo e o teor de argila são determinantes para o cálculo de(P_2O_5). Em solos com teor médio, recomendações de adubação para culturas como a soja e o milho costumam oscilar entre **70 a 80 kg/ha**. (Brasil *et al.*,2020). Quanto a época de aplicação a recomendação técnica é aplicar o fósforo prioritariamente na **semeadura**. A adubação fosfatada é feita no momento do plantio (adubação de fundação) ou nos estágios iniciais, pois o fósforo é um componente chave na formação inicial das raízes (Gatiboni, *et al.*,2013).

4 CONCLUSÕES

1. A elevação do teores de fósforo na planta assinala incremento na matéria seca, enquanto a elevação dos teores de cálcio e magnésio nas plantas de milho assinalam redução na matéria seca.
2. A variedade BR-5107 destaca-se como o material de maior eficiência nutricional de aquisição, alcançando seu teto de produção de matéria seca da parte aérea em doses intermediárias de fósforo (100 mg kg^{-1}), configurando-se como opção genética prioritária para sistemas de cultivo com restrições de capital ou insumos.
3. O híbrido BR-5102 apresenta o maior potencial responsivo absoluto sob condições de alta fertilidade, alcançando a máxima produção de fitomassa aérea na dose limite de 250 mg kg^{-1} de fósforo, sendo indicado para sistemas de alta tecnologia produtiva.

4. Os híbridos de milho avaliados exibem ampla variação genotípica quanto à sensibilidade e eficiência de uso do fósforo adicionado, demandando estratégias diferenciadas de recomendação de fertilizantes.

REFERÊNCIAS

BASTOS, A. L.; COSTA, J. P. V.; SILVA, I. F.; RAPOSO,R. W. C.; OLIVEIRA, F. A.; ALBUQUERQUE, A. W.Resposta do milho a doses de fósforo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 14, n. 5, p. 485–491, mai. 2010.

BRASIL, E.C.; CRAVO, M.S.; VIÉGAS, I.J.M**. Recomendações de calagem e adubação para o Estado do Pará**. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2020. 419p.

DOURADO NETO, D.; PALHARES, M.; VIEIRA, P. A.; MANFRON, P. A.; MEDEIROS, S. L. P. & ROMANO, M. R. Efeito da população de plantas e do espaçamento sobre a produtividade de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 2, n. 3, p. 63-77, 2003.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo no solo: usos e limitações. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 8. Viçosa: SBCS, 2013. p. 141-187.

LANA, M. C.; RAMPIM, L.; VARGAS, G. Adubação fosfatada no milho com fertilizante organomineral em Latossolo Vermelho Eutroférrico. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 7, n. 1, p. 26-36, 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatídtica – Levantamento Sistemático da Produção Agrícola, 2025.

KAPPES, C.; ARF, O.; DAL BEM, E. A.; PORTUGAL, J. R.; GONZAGA, A. R. Manejo do nitrogênio em cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 2, p. 201-217, 2014.

LYNCH, J. P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 1041-1049, 2011.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafós, 1997.

MODOLO, A.J.; CARNIELETTO, R.; KOLLING, E.M.; TROGELLO, E.; SGARBOSSAAL, M. Desempenho de híbridos de milho na Região Sudoeste do Paraná sob diferentes espaçamentos entre linhas. Revista Ciência Agronômica, v. 41, n. 3, p. 435-441, jul-set, 2010.

RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; ALVES, V. M. C.; MUNIZ, J. A.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KIMPARA, D. I.; SANTOS, L. S.; CARNEIRO, F. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30 (3), 453-466, 2006.

SERPA, M. da S.; SILVA, P.R.F. da; SANGOI, L.; VIEIRA, V. M.; MARCHESI, D. R. Densidade de plantas em híbridos de milho semeados no finaldo inverno em ambientes irrigados e de sequeiro. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.47, n.4, p.541-549, abr. 2012.

SILVA, G. F.; OLIVEIRA, F. H. T.; PEREIRA, R. G.; DIÓGENES, T. B. A.; JÚNIOR, J. N.; FILHO, A. L. S. Doses de nitrogênio e de fósforo recomendadas para produção econômica de milho verde em Mossoró-RN. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 26, n. 4, p. 471-485, 2014.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular de milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. R. Bras. Ci. Solo, 24:191-199, 2000.
SOUZA, G. M.; BARBOSA, A. de M. Fatores de estresse no milho são diversos e exigem monitoramento constante**.** Visão Agrícola nº13 jul | dez 2015.

SOUZA, F. R. S.; VELOSO, C. A. C.; POLTRONIERI, L. S.; ARAÚJO, S. M. B. **Recomendações básicas para o cultivo do milho no Estado do Pará**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1999. 20 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Circular Técnica, 2).

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE - SAS. **SAS User's Guide**. Version 9.0. Cary: SAS Institute, 2002.

QUEIROZ, A. M.; SOUZA, C.H.E. de; MACHADO, V.J.; LANA, R.M.Q.; KORNDORFER, G.H.; SILVA, A. de A. Avaliação de diferentes fontes e doses de nitrogênio na adubação da cultura do milho (Zea mays L.). *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.10, n.3, p. 257-266, 2011.

VELOSO, C. A. C.; SILVA, A. R.; SOUZA, F. R. S. Dinâmica de nutrientes e manejo de fertilidade em solos da Amazônia Oriental. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 8, p. 912-925, 2018.

VELOSO, C. A. C.; FRANZINI, V. I.; SILVA, A. R. B.; SILVA, A. R. **Adubação nitrogenada no milho no Oeste do estado do Pará**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2012. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 84).

VON PINHO, R. G.; GROSS, M. R.; STEOLA, A. G.; MENDES, M. Adubação nitrogenada, densidade e espaçamento de híbridos de milho em sistema plantio na região sudeste de Tocantins. **Bragantia**, v. 67, p. 733-739, 2008.