

JEFFERSON LUIZ DE AGUIAR PAES

**CRESCIMENTO E ACÚMULO DO FÓSFORO EM MILHO, EM RESPOSTA À
ADUBAÇÃO LOCALIZADA DO NUTRIENTE E À DISPONIBILIDADE DE ÁGUA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para
obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Paes, Jefferson Luiz de Aguiar, 1983-
P126c Crescimento e acúmulo do fósforo em milho, em resposta à
2016 adubação localizada do nutriente e à disponibilidade de água /
Jefferson Luiz de Aguiar Paes. – Viçosa, MG, 2016.
viii, 59f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Edson Marcio Mattiello.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.42-45.

1. Solos - Teor de fósforo. 2. Plantas e solo. 3. Solos -
Umidade. 4. Milho - Efeito do fósforo. 5. Planta - Crescimento.
6. Planta - Nutrição. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Solos. Programa de Pós-graduação em Solos e
Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 631.4

JEFFERSON LUIZ DE AGUIAR PAES

**CRESCIMENTO E ACÚMULO DO FÓSFORO EM MILHO, EM RESPOSTA À
ADUBAÇÃO LOCALIZADA DO NUTRIENTE E À DISPONIBILIDADE DE ÁGUA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para
obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 23 de fevereiro de 2016

Hugo Alberto Ruiz
(Coorientador)

Renato Ribeiro Passos

Renildes Lúcio Ferreira Fontes

Fernanda Schulthais

Edson Marcio Mattiello
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

A minha família, principalmente a minha mãe Maria Suely, as minhas irmãs Mylena e Pâmara, a minha avó Maria madalena, o meu avô Antônio Aguiar, a minha sobrinha Heloísa e a minha tia Lia.

A minha namorada Mari, pelo convívio e parceria.

Ao professor Hugo Ruiz, pela orientação e amizade.

Ao professor Mattiello, pela orientação e amizade.

Aos meus coorientadores, o professor Raphael e o professor Victor Hugo, pela ajuda na condução do trabalho e pela amizade.

À professora Fatima Barros, da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), pela amizade.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), principalmente ao Departamento de Solos (DPS).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pelo fornecimento da bolsa de estudo.

Aos funcionários da UFV.

Aos amigos do Departamento de Solos e de Viçosa.

BIOGRAFIA

JEFFERSON LUIZ DE AGUIAR PAES, filho de Joaquim Paes Filho e Maria Suely de Aguiar Paes, nasceu no dia 03 de setembro de 1983, em Garanhuns, Pernambuco.

Em Abril de 2004, iniciou o curso de Agronomia na Universidade Federal Rural de Pernambuco, graduando-se em 2010 e obtendo diploma de aluno com melhor desempenho.

Em Março de 2010, iniciou o curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em Fevereiro de 2012.

Em Março de 2012, iniciou o curso de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em Fevereiro de 2016.

Entre maio a outubro de 2014, foi professor efetivo no Instituto Federal de Roraima – IFRR.

Desde 2014, atua como Fiscal Federal Agropecuário no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA.

ÍNDICE

	Página
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vii
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Água no solo e transporte de nutrientes.....	3
2.2 Localização de fósforo.....	6
2.3 Uso da irrigação na agricultura.....	7
3.0 MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3.1 Condução do ensaio.....	12
3.2 Análises estatísticas.....	15
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
4.1 Consumo de água pelas plantas.....	18
4.2 Produção de raízes.....	23
4.3 Fósforo nos tecidos vegetais.....	27
4.4 Exsudato xilemático.....	33
4.5 Fluxo de massa e difusão do fósforo.....	36
5.0 CONCLUSÕES.....	41
6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
APÊNDICES.....	46

RESUMO

PAES, Jefferson Luiz de Aguiar, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Crescimento e acúmulo do fósforo em milho, em resposta à adubação localizada do nutriente e à disponibilidade de água.** Orientador: Edson Marcio Mattiello. Coorientadores: Hugo Alberto Ruiz, Raphael Bragança Alves Fernandes e Victor Hugo Alvarez Venegas.

Devido às variações climáticas, ocasionando baixa disponibilidade de água em alguns períodos do ano, torna-se necessária a busca de técnicas que possibilitem maior tolerância das plantas ao estresse hídrico. Diante disso, objetivou-se avaliar, em condições de casa de vegetação, o efeito da localização de fosfato em profundidade e da variação simultânea do potencial matricial no crescimento e na absorção de P por plantas de milho, cultivadas em sistemas de vasos geminados, com partição de raízes. Utilizaram-se amostras de um Latossolo Vermelho, coletadas em Três Marias, MG. O experimento foi montado em esquema fatorial $2 \times 3 + 4$, sendo: 2 localizações de 300 mg dm^{-3} de P: PS e PI, com incorporação nas metades superior e inferior dos vasos, respectivamente; 3 combinações de potenciais matriciais nas duas unidades dos vasos geminados (-9/-9; -9/-50 e -50/-50 kPa); e 4 combinações de potenciais matriciais (-9/-9; -9/-50; -50/-9 e -50/-50 kPa), com localização PS no vaso da esquerda e PI no vaso da direita. O controle do potencial matricial foi realizado pelo uso de um tensiômetro em cada unidade do vaso geminado. Mudanças de milho foram transplantadas, subdividindo as raízes em partes iguais, nas duas unidades do vaso geminado. Decorridos 40 d, cortaram-se as plantas, determinando-se a área foliar. Coletou-se o exsudato xilemático de cada parcela durante 2 h. Na parte aérea e nas raízes foram determinadas a produção de matéria seca e o teor e o conteúdo de P. Coletou-se a solução do solo em cada potencial matricial de trabalho, antes e após o término do experimento, para determinar a concentração média de P na solução do solo fertilizado (P300) e do solo do tratamento controle (P0). Calculou-se a contribuição do fluxo de massa e da difusão no transporte de P.

Os resultados experimentais permitiram concluir que o crescimento do sistema radicular respondeu à porção de solo que recebeu a incorporação do adubo fosfatado, independentemente da localização na unidade experimental, PS ou PI. A localização na porção inferior contribuiria para minorar efeitos negativos de eventual estresse hídrico. Em ensaio com vasos geminados constituídos por duas unidades justapostas, o fornecimento adequado de água às duas unidades, neste caso representado pelos potenciais matriciais -9/-9 kPa, permitiram o incremento da área foliar, da produção de matéria seca e da absorção de P, frente ao tratamento em que as duas unidades apresentaram potenciais matriciais de -50 kPa. O fornecimento adequado de água utilizado apenas em uma unidade do vaso geminado, representado pelos tratamentos -9/-50 kPa, permitiu produção de matéria seca semelhante àquela conseguida no sistema -9/-9 kPa. Isso indica a possibilidade de consumo menor de água com aplicação localizada, pois o tratamento -9/-50 apresentou resultados mais próximos a -9/-9 que a -50/-50 kPa. Os resultados mostraram que a difusão, principal mecanismo de transporte de P na solução do solo, em termos proporcionais, foi mais afetada que o fluxo de massa quando diminuiu a quantidade de água fornecida às plantas, de -9/-9 para -50/-50 kPa.

ABSTRACT

PAES, Jefferson Luiz de Aguiar, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2016. **Growth and phosphorus accumulation in maize in response to phosphate location and water availability.** Adviser: Edson Marcio Mattiello. Co-advisers: Hugo Alberto Ruiz, Raphael Bragança Alves Fernandes and Victor Hugo Alvarez Venegas.

Due to climatic variations, which result in low water availability in some periods of the year, it is necessary to find techniques that increase the tolerance of plants to drought. The current study evaluated, in a greenhouse experiment, with germinated pots, using a split root technique, the effect of phosphate location in depth and water availability on the growth and P uptake by maize. Samples of an Oxisol, from Três Marias, Minas Gerais, were used. The experiment corresponded to a 2 x 3 + 4 factorial scheme: 2 placement of 300 mg dm⁻³ P, with top (PS) and deep (PI) fertilizer application; 3 matric potentials in the two units of the split pots (-9/-9, -9/-50 and -50/-50 kPa); and 4 matric potentials (-9/-9, -9/-50; -50/-9 and -50/-50 kPa), with top P in the left pot and deep P in the right side. Each single pot had one tensiometer to control water potential. Corn seedlings were transplanted, splitting equally the roots in the two pots of the experimental unit. After 40 d, the plants were harvest, the leaf area was determined and the xylem exudate was collected during 2 h. Dry matter production and P content were determined in shoots and roots. Soil solution was collected in each potential of control (P0) and fertilized (P300) soil before and after the experiment. Mass flow and diffusion contributions to P transport were calculated. It can be concluded that root yield was greater in P300 than in P0, regardless P placement. Deep placement of P can reduce water stress. Leaf area, dry matter production and P uptake was greater in the -9/-9 treatment, compared to -50/-50 kPa. Adequate water supply to a single unit of the split pot, (-9/-50 kPa), had a dry matter production similar to -9/-9 kPa system. This

indicates water economy consumption to plant growth. Diffusion of P was more affected by water potential than mass flow.

1.0 INTRODUÇÃO

O aumento da produção de alimentos torna-se a cada dia mais importante, tendo em vista o grande crescimento populacional. Nesse sentido, o manejo adequado das propriedades do solo é indispensável para obtenção de maiores produtividades.

As regiões tropicais apresentam com frequência problemas edáfico-climáticos que interferem na produção agrícola. Dentre as principais limitações, destaca-se a baixa disponibilidade de P e de água.

No que se refere ao P, sua eventual deficiência é ocasionada, geralmente, pelo baixo teor e pela elevada capacidade de adsorção do nutriente nos solos tropicais, cuja composição mineralógica apresenta presença marcante de oxidróxidos de Fe ou Al.

Já em relação à água, verificam-se dois problemas: o primeiro diz respeito ao elevado consumo de água na agricultura, responsável por cerca de 70 % da água utilizada no planeta; o segundo refere-se à elevada variabilidade climática, que favorece a formação de períodos secos, em épocas imprevisíveis, levando ao estresse hídrico.

Enfatiza-se que a limitação hídrica, atualmente, é o maior responsável por reduções na produtividade agrícola. Isso ocorre porque o déficit de água afeta vários processos fisiológicos da planta, tais como: abertura estomática, fotossíntese, síntese de proteínas e atividade enzimática e hormonal. Também afeta o transporte dos nutrientes no solo e conseqüentemente, a absorção pelas plantas.

Uma das maneiras de minimizar o estresse hídrico é favorecer o crescimento radicular, em especial o de raízes finas, que atuam intensamente na absorção de água e nutrientes pelas plantas. Esse sistema cria um ambiente único no solo, no qual se processam, de forma dinâmica, numerosas reações químicas, físico-químicas e biológicas.

O manejo adequado da adubação reduz perdas e favorece a absorção de nutrientes pelas plantas. Em relação ao P, a técnica mais importante para diminuir a adsorção de P nos solos tropicais é a sua localização próxima à planta. Todavia, é possível que essa localização favoreça o crescimento radicular superficial, tornando a planta mais susceptível à restrição hídrica. Portanto, em cultivos de sequeiro ou aqueles irrigados com menor frequência, a aplicação localizada de P em profundidade poderia possibilitar maior crescimento radicular, permitindo exploração de maior volume de solo e, conseqüentemente, incremento na absorção de água e nutrientes.

Com intuito de mitigar os efeitos do estresse hídrico às culturas, vários estudos têm sido realizados. Contudo, poucas pesquisas relatam o comportamento das plantas quando estas se encontram com o sistema radicular submetido, ao mesmo tempo, a diferentes condições no suprimento de água e P.

Diante disto, objetivou-se neste trabalho avaliar, em casa de vegetação, o efeito da localização em profundidade de fosfato e da variação simultânea do potencial hídrico no crescimento e na absorção P por plantas milho cultivadas em sistemas de vasos geminados com partição de raízes.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Água no solo e transporte de nutrientes

O suprimento adequado de água e de nutrientes, essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, influencia diretamente a produtividade das culturas. A água participa de todo o metabolismo, com destaque para numerosas reações químicas. Uma redução do volume de água absorvida compromete o desenvolvimento da planta, afetando diretamente os mecanismos de crescimento (Ruiz-Eraza, 2009).

De forma similar, a restrição nutricional interfere negativamente sobre o desenvolvimento das culturas. Pode ser causada tanto por baixos teores de elementos essenciais disponíveis no solo, como por limitações hídricas que dificultam o crescimento radicular e o transporte dos nutrientes para as raízes (Ruiz et al., 1988b; Procópio et al., 2002).

O transporte de nutrientes na solução do solo até a superfície das raízes é realizado de duas formas: fluxo de massa, ocasionado pela resposta à diferença do potencial hídrico no solo, na planta e na atmosfera; e a difusão, em resposta ao gradiente de concentração (Meurer, 2007). O fluxo de massa ocorre sempre que a planta absorve água. Já a difusão é um mecanismo complementar e ocorre quando a quantidade de nutrientes transportados por fluxo de massa é insuficiente para o normal crescimento e desenvolvimento vegetal.

O mecanismo predominante no transporte de um nutriente é determinado pela sua concentração na solução do solo que se desloca em direção às raízes, em resposta à diferença de potencial. Quando a quantidade do nutriente que chega até as raízes é igual ou excede a absorvida, o fluxo de massa é o único mecanismo presente. Nesse caso, o excesso de nutriente iria se acumular na rizosfera (Barber, 1974).

Quando a exigência nutricional da planta excede a quantidade transportada por fluxo de massa, a difusão torna-se o mecanismo complementar, que pode até superar em importância o fluxo de massa (Araújo et al., 2003). A diminuição da disponibilidade de água no solo reduz o movimento dos nutrientes por fluxo de massa e por difusão. Nessas condições, ocorre o fechamento dos estômatos e a consequente redução do fluxo transpiratório e do fluxo de massa. Em acréscimo, diminui também a quantidade de CO₂ que entra pelos estômatos, bem como a absorção de água e nutrientes pelas raízes. Assim, o crescimento da planta é reduzido e a quantidade de água disponível à planta torna-se fator limitante ao crescimento (Barros & Comerford, 2002).

Oliveira et al. (2010), trabalhando com Latossolos de Minas Gerais, relatam que a contribuição porcentual do fluxo de massa e da difusão ao transporte de nutrientes permitiu estabelecer a seguinte ordem para o fluxo de massa: Ca > Mg > N > S > K > P ≈ Mn ≈ Zn ≈ Fe ≈ Cu. A média para os cinco primeiros foi de 99, 63, 56, 45 e 10 %, respectivamente. A difusão foi o principal mecanismo de transporte de P, K, Fe, Mn, Zn e Cu até a superfície das raízes do milho, sendo responsável por valores superiores a 99 %, exceto para K, cujo valor foi de 90 %.

Confirma-se que, em solos tropicais, a difusão é fundamental para o deslocamento de alguns nutrientes, com ênfase ao movimento de P no solo em direção à superfície radicular (Olsen & Kemper, 1968). Alterações em algumas propriedades ou condições específicas do solo refletirão sobre a difusão de nutrientes, com destaque para o conteúdo de água, a interação dos elementos

com os componentes da fase sólida e a concentração do nutriente na solução do solo (Ruiz et al., 1988b).

Ruiz et al. (1988b), em trabalho de casa de vegetação, estudando três potenciais matriciais de água no solo e quatro doses de P, em vasos geminados (solo e solução nutritiva) com raízes divididas de plantas de soja, encontraram respostas mais acentuadas às alterações de umidade do solo do que às doses de P, sendo esse efeito mais crítico no solo mais arenoso incluído no ensaio. Nesse estudo, o P foi sempre uniformemente distribuído no vaso com amostra de solo, mantendo-se a solução nutritiva sem acréscimo desse nutriente. Os autores concluíram que a incorporação de doses relativamente menores de P, com manejo adequado de água, apresentou efeito positivo mais acentuado que o decorrente da incorporação de grandes doses de P, com restrição de água.

Outra variável de bastante relevância na verificação do transporte e absorção de nutrientes pelas plantas está relacionada à análise da seiva xilemática. Essa determinação fornece informações sobre o processo de translocação de nutrientes, evidenciando-se como uma das mais importantes representações da realidade nutricional da planta (Vale et al., 1984).

Ao ser realizado um corte na base do caule da planta, para colheita de seiva xilemática, o exsudato flui em resposta à pressão radicular (Taiz & Zeiger, 2002). Epstein (1975) afirma que a movimentação do exsudato através da incisão pode ser explicada pela absorção ativa de sais nas raízes que são transferidos para o xilema. Como resultado, gera-se um gradiente osmótico interno, sendo o potencial de água no xilema menor que aquele da solução externa. Assim, a água movimenta-se osmoticamente para o xilema, instalando-se, com isso, uma pressão hidrostática sobre o mesmo, que é a pressão radicular.

Em contrapartida, quando a planta transpira, gera-se um potencial negativo no xilema e o movimento de água responde ao gradiente osmótico instalado por meio de transporte ativo de íons.

Enfatizando essa importância da análise do exsudato, Ruiz et al., (1988a) em trabalho com soja determinaram o volume e o conteúdo de P na seiva xilemática e verificaram que a disponibilidade de água no solo foi fator marcante e diferencial no volume final do exsudato da planta, constatando diminuição de até 30 vezes no exsudato recolhido a -40 kPa, quando comparado com o volume coletado a -10 kPa. Nesse trabalho, verificou-se redução acentuada no conteúdo de P nos tecidos vegetais em resposta aos tratamentos com menor disponibilidade de água.

2.2. Localização de fósforo

Geralmente os solos brasileiros apresentam problemas relacionados à fertilidade e um dos motivos disso refere-se à baixa disponibilidade de P (Sampaio et al., 1995). Conseqüentemente, para obtenção de produtividades elevadas, torna-se necessária a adição de fertilizantes fosfatados. Sabe-se que apenas uma fração do P aplicado ao solo, variando de 20 a 28 %, permanece disponível no solo após um ano (Williams & Reith, 1971). O restante permanece no solo, sendo parte adsorvida pelas argilas, parte combinada com os componentes do solo, ficando sob forma insolúvel, e, ainda, outra parte imobilizada por microrganismos (Stevenson & Cole, 1999).

No solo, a absorção de P pelas raízes resulta de interações entre características morfológicas das raízes (comprimento, massa e diâmetro) e de características do solo que determinam o fluxo de nutrientes para a interface solo-raiz (Gerloff & Gabelman, 1983).

Alves et al. (1998) observam que, dentre as respostas da planta em relação ao estresse nutricional de P, ocorre uma inibição do crescimento da parte aérea e do sistema radicular, este último em menor proporção, o que provoca a diminuição da relação parte aérea/raízes. Também observaram que o estresse é frequentemente acompanhado por redução da velocidade máxima de absorção do nutriente.

As culturas respondem de forma diferente a deficiência de P. A respeito disso, Föhse et al. (1988), trabalhando com sete espécies (cebola, azevém, trigo, canola, espinafre, tomate e feijão), verificaram que as mais eficientes foram aquelas que apresentaram maior razão raízes/parte aérea e também maior taxa de absorção de P por unidade de massa de raiz (influxo), destacando-se nesse estudo, as culturas de espinafre e trigo.

A melhoria na absorção de P e o incremento da produtividade podem ser alcançados pela utilização de técnicas que possibilitem uma maior disponibilidade do fosfato ao longo do ciclo das culturas. Dentre as técnicas utilizadas, a localização de fosfato num volume de solo, buscando aumentar o fornecimento do elemento às plantas, é alternativa destacada para solos com baixos teores e alta capacidade de adsorção de P. A aplicação localizada do fertilizante fosfatado tem como grande vantagem a proteção do elemento, diminuindo, com isso, as reações de adsorção química (Leite, 1991).

Castilhos & Anghioni (1988), em estudos de fertilização em milho, mostraram que o menor volume de solo fertilizado com P é compensado pela maior densidade de raízes. No que se refere à produtividade, Kaminski & Peruzzo (1997) apresentaram resultados para cultura da soja, em que aplicações de fosfato reativo de Arad (FR) na linha de plantio promoveram maior rendimento de grãos, comparativamente à distribuição do produto a lanço. Os resultados obtidos por esses autores podem ser atribuídos ao aumento da concentração de P próximo as raízes e também à redução da adsorção em função do menor contato do fertilizante com o solo, disponibilizando mais o nutriente às plantas, ao passo que, a aplicação a lanço tende a favorecer a adsorção pelo solo, em detrimento da absorção pela planta (Novais & Smyth, 1999). Os mesmos autores ressaltam que o efeito positivo desta localização, em um volume restrito de solo, será tanto maior quanto maior for o fator capacidade tampão de P do solo.

2.3. Uso da irrigação na agricultura

A irrigação é uma técnica muito difundida na agricultura. Uma de suas limitações é a exigência de altos investimentos relacionados às obras e aquisição de equipamentos, ao transporte, à eletricidade e à mão de obra para operação dos sistemas. Todavia, em projetos eficientes, esses custos adicionais são cobertos com excedentes na produtividade (Rodriguez, 1990).

Mantovani et al. (2006) relatam que, no Brasil, há um grande desperdício de água, fato que favorece o decréscimo de disponibilidade hídrica. Outros fatores, como o alto custo da energia, incrementam o interesse pela racionalização da água, de forma a minimizar as suas perdas e aumentar o rendimento econômico.

A água é considerada um recurso escasso e estratégico, por questão de segurança nacional e por seus valores sociais, econômicos e ecológicos (Maia Neto, 1997). Devido às mudanças climáticas, várias regiões têm apresentando problemas de estresse hídrico, necessitando da irrigação para produzir satisfatoriamente. Contudo, estima-se que, em média, a eficiência de irrigação é de 37 % a nível mundial (Paz et al., 2000). Mantovani et al. (2006) relatam que, além do incremento na produtividade, pode-se reduzir o uso de água, melhorando a eficiência, utilizando-se apenas estratégias apropriadas no manejo de irrigação.

Paz et al. (2000) relatam que perdas de água ocorrem desde os reservatórios até a sua condução e aplicação no campo. Rosegrant et al. (2002) indicam que ações para melhorar a eficiência do uso de água na agricultura irrigada devem ser focadas nos níveis técnico, gerencial e institucional. No que se refere à parte técnica, ressalta-se que os métodos e equipamentos de irrigação devem ser aprimorados com objetivo de reduzir as perdas e induzir ao manejo adequado em conjunto com o solo, a planta e o clima, maximizando a redução no uso da água (Mantovani et al., 2006)

3.0 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, com amostras de um Latossolo Vermelho distrófico, textura média, coletadas na profundidade de 0-20 cm, no município de Três Marias, MG (18° 09' 30" S e 45° 10' 20" W).

As amostras de solo foram secadas ao ar, destorroadas manualmente e passadas em peneira de 4 mm, para o ensaio em casa de vegetação e em peneira de 2 mm, para caracterização química e física (Quadro 1).

Na caracterização química, determinaram-se o pH em água (relação v v⁻¹ 1:2,5), os teores de P, K, Fe, Mn, Zn e Cu disponíveis, após extração com extrator Mehlich-1, os teores de Ca, Mg e Al trocáveis, após extração KCl 1 mol L⁻¹, e a acidez potencial (H+Al) (Embrapa, 2011). O S disponível foi determinado após extração com solução de Ca(H₂PO₄)₂ em ácido acético (Hoeft et al., 1973) e o carbono orgânico total foi analisado pelo método de oxidação via úmida com aquecimento externo (Yeomans & Bremner, 1988).

Quadro 1. Caracterização química e física inicial das amostras do Latossolo Vermelho de Três Marias, MG

pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CO ^{1/}	Zn	Fe	Mn	Cu	S
	—mg dm ⁻³ —		———cmol _c dm ⁻³ ———				g kg ⁻¹	—————mg dm ⁻³ —————				
4,74	0,20	15,00	0,10	0,02	0,49	3,20	6,00	2,90	89,30	4,80	0,36	15,20
Areia Fina		Areia Grossa		Silte		Argila		Densidade do Solo	Densidade de Partículas		Porosidade Total	
—————kg kg ⁻¹ —————								—————kg dm ⁻³ —————		m ³ m ⁻³		
0,580		0,200		0,050		0,170		1,280	2,700		0,530	
Retenção de Água												
Potencial (kPa)												
-3	-6	-9	-10	-15	-30	-50	-100	-200	-500	-1000	-1500	
Umidade (kg kg⁻¹)												
0,328	0,195	0,148	0,109	0,100	0,095	0,090	0,084	0,079	0,072	0,067	0,061	

^{1/} carbono orgânico

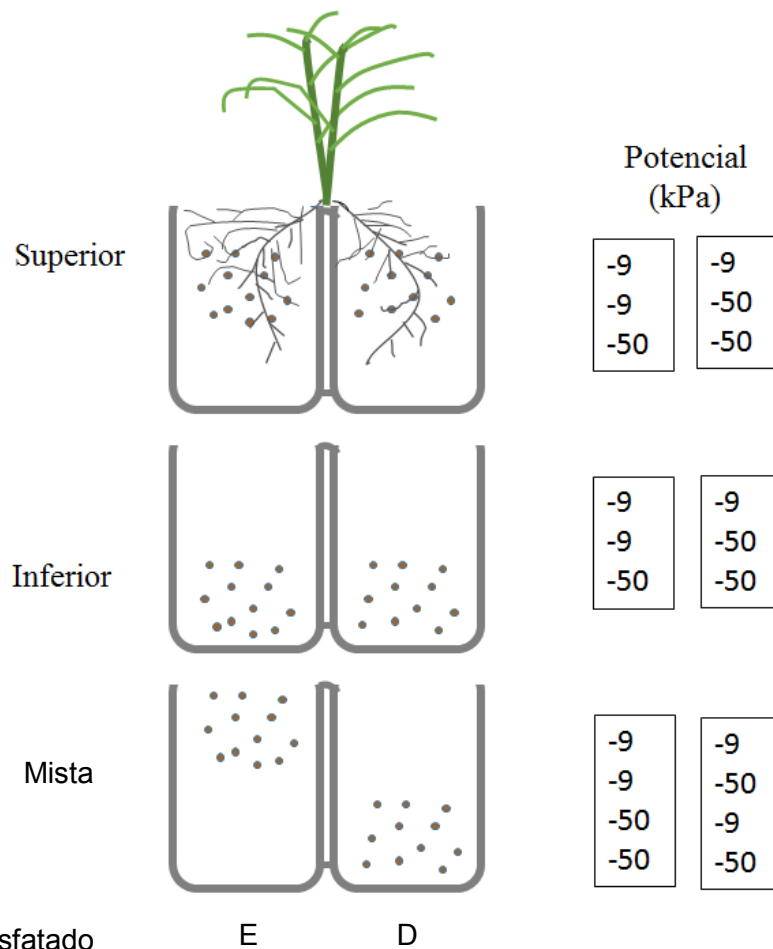
Na caracterização física, foram determinadas a composição granulométrica (Ruiz, 2005), a densidade do solo pelo método da proveta, a densidade de partículas pelo método do balão volumétrico, a porosidade total, pela relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas, e a retenção de água no intervalo de -3 a -1500 kPa, utilizando mesa de tensão (intervalo de -3 a -10 kPa) e placa de pressão (intervalo de -20 a -1500 kPa) (Embrapa 2011).

A unidade experimental (vaso geminado) foi constituída de dois vasos de base retangular, geminados, de 5 dm³ cada um (Ruiz et al., 1988b), denominados de unidade E (esquerda) e unidade D (direita) (Figura 1). Os tratamentos, dispostos em blocos casualizados com quatro repetições, corresponderam a um arranjo fatorial 2 x 3 + 4, sendo:

- 2 localizações de 300 mg dm⁻³ de P (P300): S (Superior), localização do P no volume de solo da metade superior de cada unidade do vaso geminado (0 – 10 cm), e I (Inferior), localização do P no volume de solo metade inferior de cada unidade do vaso geminado (10 – 20 cm);
- 3 combinações de potenciais matriciais nas duas unidades dos vasos geminados (S e I) (-9/-9; -9/-50 e -50/-50 kPa);

- 4 combinações de potenciais matriciais nas duas unidades dos vasos geminados quando o P foi localizado no volume de solo da metade superior da unidade da esquerda e no volume do solo da metade inferior da unidade da direita (Mista - M) (-9/-9; -9/-50; -50/-9 e -50/-50 kPa).

Os tratamentos, considerando a localização dos 300 mg dm⁻³ de P e os potenciais matriciais de trabalho, monitorados por um tensiômetro em cada unidade do vaso geminado, são mostrados na figura 1.



- Fertilizante fosfatado

Figura 1. Esquema da montagem do ensaio com milho crescido em vaso geminado com variação do potencial matricial de trabalho e localização do fertilizante fosfatado.

3.1. Condução do ensaio

Amostras de 2,5 dm³ de solo, volume correspondente à metade de cada unidade do vaso geminado, foram acondicionadas em sacos plásticos e incubadas por 30 d com mistura de CaCO₃ e MgCO₃, na relação molar 4:1, para correção de acidez. Essa correção foi realizada de acordo com o método da saturação por bases, considerando sua elevação a 60 %, adequada para cultivo do milho (Alvarez V. et al., 1999). A incubação, em aerobiose, foi realizada mantendo-se umidade na faixa de -9 kPa, com controle diário por pesagem.

Decorrido o período de incubação, as amostras foram secadas ao ar, destorroadas e novamente passadas em peneira de 4 mm de malha. Em seguida, metade das amostras recebeu 300 mg dm⁻³ de P, utilizando-se o fosfato monoamônio (NH₄H₂PO₄) como fonte. A outra metade das amostras, sem acréscimo de P, recebeu NH₄NO₃ em dose equivalente ao N incorporado através do NH₄H₂PO₄ (135 mg dm⁻³ de N). Uma adubação de base foi realizada, aplicando-se mais 65 mg dm⁻³ de N; 150 mg dm⁻³ de K; 80 mg dm⁻³ de S; 0,818 mg dm⁻³ de B; 3,664 mg dm⁻³ de Mn; 4,000 mg dm⁻³ de Zn; 1,329 mg dm⁻³ de Cu; 1,556 mg dm⁻³ de Fe e 0,150 mg dm⁻³ de Mo.

As amostras de solo foram acondicionadas nos vasos, mantendo-se a umidade a -9 kPa durante 15 d. Posteriormente, permitiu-se a perda de água até o menor potencial de trabalho (-50 kPa) nas amostras correspondentes a esse tratamento, controlando-se a umidade diariamente, por pesagem. Amostras de solo foram retiradas após o período de incubação para a caracterização química e os resultados são apresentados no quadro 2.

Quadro 2. Caracterização química das amostras do Latossolo Vermelho de Três Marias, MG, após incubação com macro e micronutrientes, na presença ou ausência de 300 mg dm⁻³ de P (P300 e P0, respectivamente)

pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	Zn	Fe	Mn	Cu	S
	—mg dm ⁻³ —		—————cmol _c dm ⁻³ —————				—————mg dm ⁻³ —————				
	P300										
6,15	71,73	132,00	1,36	0,57	0	2,70	4,60	56,20	7,90	0,98	94,80
	P0										
6,20	0,76	139,00	1,38	0,41	0	2,00	6,10	61,30	7,80	1,25	58,20

Com intuito de quantificar a quantidade de P transportada por fluxo de massa e difusão, determinaram-se as concentrações de P na solução do solo. Quatro amostras compostas, correspondentes a P300 e P0 e aos potenciais de -9 e -50 kPa, foram utilizadas para análise. A determinação foi realizada após as incubações indicadas e depois da condução do experimento. Para isso, amostras de solo foram acondicionadas em sacos plásticos, durante 48 h de equilíbrio, no respectivo potencial de trabalho. Em seguida, a solução do solo foi retirada pela aplicação de 1,0 MPa em equipamento de membrana de pressão (Soilmoisture, modelo 1000), por 16 h. Determinou-se a concentração de P na solução do solo pelo método colorimétrico (Tedesco et al., 1995) (Quadro 3).

Sementes de milho, cultivar Dekalb 240, foram colocadas para germinar em estufa, a 30°C, utilizando papel germitest. Após a germinação, a raiz principal das plântulas foi cortada, favorecendo-se o crescimento de raízes secundárias em solução arejada de cloreto de cálcio (Ruiz et al., 1988b). Dez plântulas foram separadas no momento do transplante para quantificar os teores iniciais de nutrientes.

Duas plântulas foram colocadas em cada vaso geminado, com distribuição uniforme das raízes entre as duas unidades. Para reduzir o estresse dessa operação, a porção do solo com as raízes das plântulas foi molhada com frequência nos primeiros cinco dias do ensaio.

Quadro 3. Concentração de P na solução do Latossolo Vermelho de Três Marias, MG, no início e no final do ensaio, considerando o potencial de trabalho e a presença de P

Potencial	P	Concentração de P		
		Inicial	Final	Média
kPa	mg dm ⁻³	mg L ⁻¹		
-9	0	0,500	0,343	0,422
	300	0,680	0,703	0,692
	Média Geral ^{1/}			0,557
-50	0	0,478	0,423	0,451
	300	0,630	0,444	0,537
	Média Geral ^{1/}			0,494

^{1/} Valor utilizado nos cálculos considerando que cada unidade do vaso geminado foi preenchida com volumes iguais de P0 e P300 e o fluxo de massa independe da extensão do sistema radicular.

As amostras incubadas foram dispostas segundo os tratamentos indicados na figura 1. Para controle do potencial de trabalho, cada unidade do vaso geminado recebeu um tensiômetro acoplado a um manômetro de mercúrio. Em cada bloco foram acrescentados dois vasos de 5 dm³ com solo, nos potenciais de -9 e -50 kPa, respectivamente, para quantificar a perda de água por evaporação durante o ensaio.

Os 80 tensiômetros utilizados no ensaio foram escorvados diariamente, ao final do dia, ajustando-se o potencial de trabalho com água deionizada, no início da manhã (Ruiz, 1986). A água acrescentada no decorrer do ensaio foi quantificada para cada unidade (E e D), bem como para os vasos sem plantas, utilizados visando quantificar a evaporação.

Decorridos 40 d do transplante, o ensaio foi finalizado, colhendo-se um bloco por dia. A parte aérea foi cortada 1 cm acima do coleto, as folhas foram separadas do caule e a área foliar determinada imediatamente com equipamento Li-Cor modelo LI 3100. Posteriormente, folhas e caules foram

acondicionados em sacos de papel, secados em estufa com ventilação forçada a 65-75 °C, pesados e moídos para análise.

Paralelamente, após o corte da parte aérea, foi colhido o exsudato xilemático, durante 2 h, por contato direto de tubos capilares com a região do corte (Ruiz et al., 1988a). A coleta foi realizada entre 6 e 8 h da manhã. Esse horário foi estabelecido para evitar o período de maior temperatura e radiação solar. A coleta logo após o período noturno permite que o xilema apresente continuidade na condução da seiva, evidenciando a pressão radicular na planta em estudo.

O volume de exsudato foi calculado por pesagem até 0,1 mg, assumindo que a densidade da solução é igual a 1,0000 kg L⁻¹. Nesse material determinou-se a concentração de P por espectroscopia de absorção molecular (Tedesco et al., 1995).

Dois dias após o corte da parte aérea das plantas de milho, o solo foi retirado de cada unidade do vaso geminado, separando-se as porções, superior e inferior, respectivamente. Em cada uma delas coletaram-se, manualmente, as raízes que foram lavadas, levadas à estufa com ventilação forçada a 65-75 °C, pesadas e moídas para análise. Dos materiais vegetais moídos, retiraram-se amostras, nas quais, após digestão nitricoperclórica, determinou-se o teor de P (Tedesco et al., 1995).

3.2. Análises estatísticas

Os dados experimentais foram submetidos à análise variância (Quadro 4), utilizando o software Sisvar (Ferreira, 2008). As médias dos tratamentos foram comparadas por meio de contrastes ortogonais (Quadro 5). Foram realizadas correlações de Pearson ($p=0,05$). Na apresentação dos resultados, utilizaram-se contrastes médios calculados dividindo-se o valor numérico dos contrastes pela soma dos módulos dos coeficientes divididos por dois (Alvarez V. & Alvarez, 2006).

Quadro 4. Esquema da análise de variância do experimento considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial matricial de trabalho

Fonte de Variação	Graus de Liberdade
Blocos	3
Localização	2
Potencial d/localização na metade superior	2
Potencial d/localização na metade inferior	2
Potencial d/localização mista	3
Resíduo	27

Quadro 5. Coeficientes dos contrastes analisados, considerando a localização de 300 mg dm⁻³ P e o potencial de trabalho (ψ)

P ^{1/}	ψ ^{2/}		Contraste ^{3/}								
	E	D	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	—kPa—										
PS	-9	-9	2	1	1	1	0	0	0	0	0
	-50	-9	2	1	1	-1	0	0	0	0	0
	-50	-50	2	1	-2	0	0	0	0	0	0
PI	-9	-9	2	-1	0	0	1	1	0	0	0
	-50	-9	2	-1	0	0	1	-1	0	0	0
	-50	-50	2	-1	0	0	-2	0	0	0	0
PM	-9	-9	-3	0	0	0	0	0	1	2	0
	-9	-50	-3	0	0	0	0	0	1	-1	1
	-50	-9	-3	0	0	0	0	0	1	-1	-1
	-50	-50	-3	0	0	0	0	0	-3	0	0

^{1/} PS: localização de P na metade superior do vaso geminado; PI: localização de P na metade inferior do vaso geminado; PM: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda (E) e na metade inferior da unidade da direita (D) do vaso geminado.

^{2/} E e D: potencial de trabalho na unidade da esquerda e da direita, respectivamente.

^{3/} C1: (PS + PI) vs. PM; C2: PS vs. PI; C3: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PS; C4: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PS; C5: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PI; C6: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PI; C7: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PM; C8: $\Psi(-9/-9)$ vs. $(\Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9))$ d/PM; C9: $\Psi(-9/-50)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PM.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Consumo de água pelas plantas

Na finalização do ensaio, após 40 d, o volume de água perdido por transpiração foi calculado pela diferença entre o volume acrescentado a cada unidade (evapotranspiração) e o volume adicionado ao vaso sem planta (evaporação).

As médias (Quadro 6) mostram que o consumo de água foi maior nos tratamentos -9/-9 kPa, intermediário nos tratamentos -50/-9 e -9/-50 kPa e menor no tratamento -50/-50 kPa. Em acréscimo, ainda no quadro 6, a relação AE/AD nos tratamentos -9/-9 kPa e -50/-50 kPa oscilou no intervalo de 0,98 a 1,07, indicando consumo equilibrado de água nas duas unidades do vaso geminado

Quadro 6. Consumo de água nas unidades da esquerda (AE) e da direita (AD) do vaso geminado (VG), relação entre esses valores (AE/AD), consumo de água total (AT), área foliar (AF) e produção de matéria seca da parte aérea (PA), considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial de trabalho (ψ)

P ^{1/}	ψ ^{2/}		AE	AD	AE/AD	AT	AF	PA
	E	D						
	kPa		mL/C		mL mL ⁻¹	mL/VG	cm ² /VG	g/VG
S	-9	-9	4426,25	4480,00	0,99	8906,25	4550,80	48,62
	-50	-9	1686,25	4666,25	0,36	6352,50	3558,22	34,07
	-50	-50	1772,50	1801,25	0,98	3573,75	1855,35	14,32
	Médias		2628,33	3649,17	0,78	6277,50	3321,46	32,34
I	-9	-9	4303,75	4010,00	1,07	8313,75	3791,46	37,22
	-50	-9	1576,25	4355,00	0,36	5931,25	2720,83	26,00
	-50	-50	1575,00	1580,00	1,00	3155,00	1410,02	9,10
	Médias		2485,00	3315,00	0,81	5800,00	2640,77	24,11
M	-9	-9	4602,50	4710,00	0,98	9312,50	5114,04	53,11
	-9	-50	4463,75	1701,25	2,62	6165,00	3238,15	32,95
	-50	-9	1752,50	4337,50	0,40	6090,00	2904,18	27,60
	-50	-50	1670,00	1553,75	1,07	3223,75	1572,98	11,13
	Médias		3122,19	3075,63	1,27	6197,81	3207,34	31,20

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado.

^{2/} E e D: potencial de trabalho na unidade da esquerda e da direita, respectivamente.

Quadro 7. Contrastes médios do consumo de água nas unidades da esquerda (AE) e da direita (AD) do vaso geminado (VG), da relação AE/AD, do consumo de água total (AT), da área foliar (AF) e da produção de matéria seca da parte aérea (PA), considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial de trabalho (ψ)

Contraste ^{1/}	AE	AD	AE/AD	AT	AF	PA
	—mL/C—		mL mL ⁻¹	mL/VG	cm ² /VG	g/VG
C1: PS + PI vs.PM	-566*	406*	-0,47*	-159	-226	-2,98*
C2: PS vs. PI	143	334*	-0,03	478*	681*	8,23*
C3: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PS	1284*	2772*	-0,31*	4056*	2200*	27,03*
C4: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PS	2740*	-186	0,63*	2554*	993*	14,55*
C5: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PI	1365*	2603*	-0,29*	3968*	1846*	22,51*
C6: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PI	2728*	-345*	0,71*	2383*	1071*	11,22*
C7: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PM	1936*	2029*	0,26*	3965*	2179*	26,76*
C8: $\Psi(-9/-9)$ vs. $(\Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9))$ d/PM	1494*	1691*	-0,53*	3185*	2043*	22,84*
C9: $\Psi(-9/-50)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PM	2711*	-2636*	2,22*	75	334	5,35

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado. $\Psi(-9/-9)$, $\Psi(-9/-50)$, $\Psi(-50/-9)$ e $\Psi(-50/-50)$: potencial de -9/-50 kPa na sequência da unidade da esquerda para a unidade da direita, respectivamente.

*: Significativo a 5 % pelo teste F.

(VG). Os valores extremos para a relação -50/-9 kPa foram 0,36 e 0,40, evidenciando que aproximadamente 2/3 da água foi fornecida pela unidade com maior potencial hídrico.

Na caracterização do solo (Quadro 1), a retenção de água foi 0,090 e 0,148 kg kg⁻¹ para -50 e -9 kPa, respectivamente, o que leva a uma relação -50/-9 kPa de 0,61. Porém, de acordo com Reichardt (1988), calculando-se a água disponível e considerando uma capacidade de campo próxima a -9 kPa, valor compatível com a textura franco arenosa do solo utilizado no presente trabalho, os valores são 0,029 e 0,087 kg kg⁻¹, respectivamente, e a relação -50/-9 kPa é reduzida a 0,33, valor coerente com os encontrados experimentalmente (Quadro 6).

O consumo de água foi maior nas unidades da esquerda (AE) no tratamento M frente à soma de S + I, e inferior no AD para o mesmo contraste (Quadros 6 e 7). Essas diferenças surgem, simplesmente, do desenho experimental do ensaio. Para o AE, houve proporção de 1:2 entre -9/50 kPa para S e I e de 1:1 para M. Já a AD, a proporção foi de 2:1 entre -9/50 kPa para S e I e 1:1 para M, ocorrendo maior consumo naquele lado que possui maior número de unidades ajustadas com -9 kPa. Essas diferenças entre AE e AD foram compensadas e, quando verificado AT, o consumo de água foi igual na comparação de M com S + I.

Na comparação de S com I, com a mesma distribuição de potenciais nas unidades do vaso geminado, a localização superior do P levou ao maior consumo de água (Quadros 6 e 7). A localização de P na parte mais superficial, como é realizada na maioria dos cultivos agrícolas em solos tropicais, favorece um maior crescimento da planta quando comparado à adubação uniforme (Novais & Smyth, 1999). Todavia, uma localização apenas na camada inferior (10-20 cm), causando uma deficiência inicial em relação ao P, aliada a um menor potencial matricial (-50 kPa), fez com que a planta restringisse seu crescimento inicial, levando às diferenças entre PS e PI (Quadro 7).

Os contrastes que compararam o consumo de água, com relação ao potencial, para cada localização de P, apresentaram a seguinte a sequência: -9/-9 > -50/-9 > -50/-50. Na localização mista, não houve diferença no consumo total de água, na comparação de -50/-9 com -9/-50 (Quadros 6 e 7).

Discussão semelhante pode ser estendida para a área foliar e a produção de matéria seca da parte aérea das plantas de milho (Quadros 6 e 7). Já no que se refere aos potenciais dentro de cada localização (Quadro 7), nota-se que o fornecimento adequado de água nas duas unidades permite um maior crescimento da planta. Esse fato é comprovado em todas as comparações relacionadas à área foliar e produção de matéria seca. Nesse sentido, verifica-se correlação positiva e significativa entre o consumo de água total (AT) e as variáveis matéria seca da parte aérea e área foliar, com o mesmo valor: $r = 0,98^*$.

Os contrastes referentes à área foliar e à produção de matéria seca indicam que, apesar da utilização simultânea de diferentes potenciais matriciais, mantendo uma unidade com fornecimento adequado de água (-9 kPa), diminuir o estresse hídrico, não se observa similaridade em relação ao crescimento com o fornecimento adequado de água nas duas unidades (-9/-9 vs -9/-50 kPa) (Quadro 7).

Todavia, a despeito desse maior crescimento quando a planta recebe água de forma adequada em ambas as unidades do vaso geminado, a relação entre consumo de água e produção de matéria seca permanece a mesma para -9/-9 vs -9/-50 kPa, fato que não ocorre quando se compara -9/-9 a -50/-50 kPa.

Nesse sentido, em termos numéricos, dividindo-se a quantidade de água transpirada pela produção de matéria seca, observa-se que, em média, para os vasos geminados que apresentavam simultaneamente os potenciais -9/-9 kPa, foram consumidos 194 mL de água para se produzir um grama de matéria seca. Esse valor foi muito semelhante aos vasos geminados com potenciais -9/-50 kPa, que apresentaram média de 205 mL para cada grama de matérias seca.

Contudo, para os vasos geminados que foram conduzidos com menos água em ambas as unidades (-50 /-50 kPa), a média foi de 296 mL para grama de matéria seca. Assim, verifica-se que foram consumidos, para cada grama, mais de 100 mL de água quando se comparam esses vasos àqueles com potenciais de -9/-9 kPa e mais de 90 mL em relação àqueles com -9/-50 kPa.

Verifica-se que, apesar de produzir menos matéria seca e área foliar, o fornecimento de água adequado a uma unidade do vaso geminado, representado por -9/-50 e -50/-9 kPa, apresenta a mesma eficiência no consumo quando comparado a -9/-9 kPa, fato que pode preservar o crescimento e desenvolvimento da planta em condições de campo, quando submetidas a estresse hídrico. A partir desses resultados, pode ser quantificada a máxima eficiência econômica no uso da água, utilizando-se, para isso, relações com o consumo de energia e com a mão de obra.

4.2. Produção de raízes

Na comparação das três formas de localização do P para produção de raízes (Quadro 8) e em concordância com o observado para o consumo de água, não houve diferenças significativas quando contrastada a soma das localizações superior e inferior com a localização mista (Quadro 9).

Para aplicação de P na metade superior (S) ou inferior (I) de cada unidade da unidade experimental, quando houve diferenças significativas, como resumido no contraste da produção de raízes do vaso geminado (Quadro 9), a aplicação superficial de P levou a maior crescimento do sistema radicular.

Quadro 8. Produção de matéria seca de raízes na metade superior (S) e na metade inferior (I) das unidades da esquerda (E) e da direita (D), raízes da unidade esquerdo (RE), raízes da unidade direita (RD) (RE = S + I da esquerda e RD = S + I da direita), no vaso geminado (VG) (RVG = RE + RD) e relações S/I de E e D, considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial de trabalho (ψ)

P ^{1/}	ψ ^{2/}		Esquerda			Direita			Total		
	E	D	S	I	S/I	RE	S	I	S/I	RD	RVG
	kPa		g/C				g/C			g/C	g/VG
S	-9	-9	3,39	1,71	2,19	5,10	6,19	7,32	0,87	13,51	18,60
	-50	-9	2,82	1,79	1,58	4,61	4,87	4,57	1,04	9,43	14,04
	-50	-50	2,38	0,58	5,56	2,96	3,12	1,31	2,38	4,43	7,40
	Médias		2,86	1,36	3,11	4,22	4,73	4,40	1,43	9,12	13,35
I	-9	-9	3,77	6,01	0,63	9,78	1,80	3,78	0,48	5,58	15,36
	-50	-9	1,48	2,42	0,73	3,90	3,68	4,53	0,75	8,21	12,12
	-50	-50	0,73	0,85	0,77	1,58	0,97	0,72	1,26	1,69	3,27
	Médias		1,99	3,09	0,71	5,09	2,15	3,01	0,83	5,16	10,25
M	-9	-9	3,33	2,38	1,06	5,71	3,87	5,35	1,14	9,22	14,93
	-9	-50	4,28	1,97	2,53	6,25	3,62	4,83	0,95	8,45	14,71
	-50	-9	3,70	2,85	1,14	6,55	2,99	4,12	0,77	7,11	13,66
	-50	-50	2,13	0,74	3,13	2,87	0,51	0,59	0,68	1,10	3,96
	Médias		3,36	1,99	1,97	5,35	2,75	3,72	0,89	6,47	11,82

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado.

^{2/} E e D: potencial de trabalho na unidade da esquerda e da direita, respectivamente.

Quadro 9. Contrastes médios da produção de matéria seca de raízes nas metades superior (S) e inferior (I) da unidade da esquerda (E), na metade superior (S) e na metade inferior (I) da unidade da direita (D), em cada unidade (RE = S + I de E e RD = S + I de D), no vaso geminado (VG) (RVG = RE + RD) e relações S/I para unidades E e D, considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial de trabalho (ψ)

Contraste ^{1/}	Esquerda			RE	Direita			RD	RVG
	S	I	S/I		S	I	S/I		
	—g/C—		g g ⁻¹	—g/C—		g g ⁻¹	g/C	g/VG	
C1: PS + PI vs. PM	-0,93	0,24	-0,05	-0,69	0,69	-0,02	0,25	0,67	-0,02
C2: PS vs. PI	0,87	-1,73*	2,40*	-0,86	2,58*	1,39	0,60*	3,96*	3,10*
C3: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PS	0,73	1,17	-3,68*	1,89	2,41*	4,64*	-1,43*	7,04*	8,93*
C4: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PS	0,57	-0,08	0,61	0,48	1,32	2,75	-0,17	4,08	4,56
C5: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PI	1,90	3,36*	-0,09	5,26*	1,77	3,44*	-0,65	5,21*	10,47*
C6: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PI	2,29	3,59*	-0,10	5,88*	-1,88	-0,75	-0,27	-2,63	3,24
C7: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PM	1,64	1,66	-1,55	3,30	2,98*	4,18*	0,27	7,16*	10,47*
C8: $\Psi(-9/-9)$ vs. $(\Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9))$ d/PM	-0,66	-0,03	-0,78	-0,69	0,57	0,88	0,28	1,44	0,75
C9: $\Psi(-9/-50)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PM	0,58	-0,88	1,39	-0,30	0,63	0,71	0,18	1,34	1,05

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado. $\Psi(-9/-9)$, $\Psi(-9/-50)$, $\Psi(-50/-9)$ e $\Psi(-50/-50)$: potencial de -9/-50 kPa na sequência da unidade da esquerda para a unidade da direita, respectivamente.

*: Significativo a 5 % pelo teste F.

Chaib et al., (1984) relatam que maior crescimento de raízes ocorre nas profundidades do solo que recebem adubação fosfatada e, à medida que se aprofunda a aplicação do fertilizante, ocorre aumento de massa de raízes. Nesse sentido, a aplicação na forma de PS é satisfatória em condições de cultivo irrigado, sem restrições de água, mas pode trazer riscos quando o cultivo de sequeiro, com baixa disponibilidade de água, é focalizado, devido ao menor crescimento de raízes em profundidade, ocasionado pela adubação de forma superficial.

A aplicação de P na metade superior da unidade favoreceu a maior produção das raízes neste compartimento, como mostrado pelas relações S/I, para as unidades E e D, com valores maiores que um. Todavia, nos tratamentos onde o P foi localizado na metade inferior da unidade, observa-se uma inversão na distribuição do sistema radicular, com valores das relações S/I geralmente menores que a unidade (Quadro 8). Isso mostra o maior crescimento de raízes em profundidade, situação favorável, como apontado, em condições de restrição de água para as plantas. Com valores de relações relativamente próximos, os contrastes correspondentes não apresentaram significância (Quadro 9).

Ainda sobre o crescimento de raízes, ressalta-se o fato de a condução do ensaio ter sido realizada por 40 d e que, de acordo com Schenk & Barber (1980), a distribuição radicular é modificada pelo estágio de crescimento. Para plantas de milho, esses autores verificaram que aos 47 d de emergência, 2/3 da área radicular de genótipos de milho estavam concentrados na camada superficial do solo, valor muito superior ao encontrado no presente estudo quando se utilizou PI, indicando sua importância para o crescimento radicular em profundidade.

Outro fator importante é a maior disponibilidade de água na porção superior da unidade, setor de aplicação do fluido (água), que pode compensar a menor disponibilidade de P no solo (Ruiz et al., 1988b). O crescimento de raízes

respondeu positivamente à disponibilidade de água na comparação com o tratamento de menor potencial hídrico (Quadros 8 e 9).

Não houve diferenças na comparação de RVG entre os potenciais -9/-9 vs -9/-50 kPa (Quadro 9). Esse fato foi observado independentemente da forma de localização, seja superior, inferior ou mista, o que indica que a produção de raízes, ao menos no que se refere à produção de matéria seca, foi preservada quando ocorreu fornecimento de água adequado em apenas um lado do vaso geminado.

Houve diferença na produção de raízes quando se compararam os potenciais -9/-9 e -9/-50 a -50/-50 kPa (Quadro 9). Esses resultados foram observados independentemente da forma de localização de P. Nesse sentido, Souza et al. 2007 relata que o que o baixo fornecimento de água leva a uma menor produção de matéria seca das raízes, inibindo o crescimento radicular, fato que ainda dificulta a absorção de nutrientes.

Na aplicação de P no tratamento denominado misto, a maior produção de raízes respondeu ao potencial hídrico na comparação dos tratamentos (-9/-9 + -9/-50 + -50/-9 kPa) vs -50/-50 kPa (Quadros 8 e 9). Na comparação do potencial de água -9/-50 e -50/-9 com a localização de P em diferentes setores da unidade, não foram observadas diferenças, como mostra o último contraste do quadro 9.

4.3. Fósforo nos tecidos vegetais

Para a determinação do teor de P nos tecidos vegetais, as raízes, coletadas nos setores superior e inferior de cada unidade do vaso geminado, foram analisadas de forma conjunta. Os resultados experimentais, acrescidos dos teores de P da parte aérea, são apresentados no quadro 10. Considerando que as unidades experimentais apresentavam disponibilidade de P semelhante, independentemente da localização, os teores de P nos tecidos vegetais não foram sensivelmente alterados, como mostrados nos contrastes analisados

(Quadro 11). Diferenças estatísticas ocasionais não indicaram tendência definida em resposta aos tratamentos.

O conteúdo de P mostrou diferenças acentuadas (Quadro 12). Esses valores ratificam a dependência da disponibilidade de água, evidenciada na produção de matéria seca da parte aérea e das raízes (Quadros 6, 7, 8 e 9). Nesse contexto, Taiz & Zeiger (2002) indicam que a diminuição no fornecimento de água reduz a divisão e o alongamento das células, obtendo-se plantas menores e redução de área foliar.

Quadro 10. Teor de P da parte aérea (TPPA), das raízes na unidade da esquerda (TPRE) e das raízes na unidade da direita (TPRD), considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial de trabalho (ψ)

P ^{1/}	ψ ^{2/}		TPPA	TPRE	TPRD
	E	D			
	kPa		g kg ⁻¹		
S	-9	-9	1,74	1,38	1,16
	-50	-9	1,65	1,20	1,29
	-50	-50	1,88	1,24	1,51
		Média	1,76	1,27	1,32
I	-9	-9	1,66	1,28	1,14
	-50	-9	1,27	1,31	1,06
	-50	-50	1,32	1,10	1,27
		Média	1,43	1,23	1,16
M	-9	-9	1,56	1,06	1,10
	-9	-50	1,64	1,18	1,26
	-50	-9	1,62	1,31	1,19
	-50	-50	1,64	1,55	1,24
		Média	1,62	1,28	1,20

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado.

^{2/} E e D: potencial de trabalho na unidade da esquerda e da direita, respectivamente.

Quadro 11. Contrastes médios do teor de P da parte aérea (TPPA), das raízes na unidade da esquerda (TPRE) e das raízes na unidade da direita (TPRD), considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial de trabalho (ψ)

Contraste ^{1/}	TPPA	TPRE	TPRD
	—————g kg ⁻¹ —————		
C1: PS + PI vs. PM	-0,03	-0,02	0,04
C2: PS vs. PI	0,34*	0,04	0,16
C3: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PS	-0,19	0,05	-0,29
C4: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PS	0,09	0,18	-0,13
C5: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PI	0,15	0,20	-0,17
C6: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PI	0,39*	-0,03	0,08
C7: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PM	-0,03	-0,37*	-0,06*
C8: $\Psi(-9/-9)$ vs. $(\Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9))$ d/PM	-0,07	-0,19	-0,13
C9: $\Psi(-9/-50)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PM	0,02	-0,13	0,07

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado. $\Psi(-9/-9)$, $\Psi(-9/-50)$, $\Psi(-50/-9)$ e $\Psi(-50/-50)$: potencial de -9/-50 kPa na sequência da unidade da esquerda para a unidade da direita, respectivamente.

*: Significativo a 5 % pelo teste F.

Os coeficientes de correlação linear simples, calculados relacionando o consumo de água na unidade experimental com o conteúdo de P na parte aérea, nas raízes crescidas na unidade da esquerda e na unidade da direita (Quadros 6 e 12), mostraram os seguintes resultados: 0,959*, 0,702* e 0,745*, respectivamente.

Quadro 12. Conteúdo de P da parte aérea (CPPA), das raízes na unidade da esquerda (CPRE), das raízes na unidade da direita, das raízes no vaso geminado (CPR = CPRE + CPRD) e relações entre essas variáveis, considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial de trabalho (ψ)

P ^{1/}	ψ ^{2/}		CPPA	CPRE	CPRD	CPR	CPPA/CPR	CPRE/CPR	CPRD/CPR
	E	D							
	kPa		mg			mg mg ⁻¹			
S	-9	-9	84,00	7,35	16,16	23,51	3,98	0,33	0,67
	-50	-9	56,34	4,80	12,03	16,83	3,61	0,29	0,71
	-50	-50	27,10	3,48	6,50	9,99	3,19	0,28	0,72
		Média	55,81	5,21	11,56	16,78	3,59	0,30	0,70
I	-9	-9	60,81	12,23	6,19	18,42	3,63	0,64	0,36
	-50	-9	33,16	4,88	7,94	12,82	2,80	0,35	0,65
	-50	-50	12,28	1,64	2,19	3,83	3,48	0,47	0,53
		Média	35,42	6,25	5,44	11,69	3,30	0,49	0,51
M	-9	-9	83,07	6,19	10,31	16,50	5,45	0,43	0,53
	-9	-50	54,45	6,47	10,19	16,67	3,91	0,34	0,66
	-50	-9	44,36	8,17	7,84	16,01	3,16	0,49	0,51
	-50	-50	18,16	4,44	1,37	5,81	3,15	0,78	0,22
		Média	50,01	6,32	7,43	13,75	3,92	0,51	0,48

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado.

^{2/} E e D: potencial de trabalho na unidade da esquerda e da direita, respectivamente.

No cálculo do conteúdo de P, a produção de matéria seca foi determinante nas diferenças registradas no resultado final. A correlação entre conteúdo de P com a produção de matéria seca da parte aérea, das raízes crescidas na unidade da esquerda e na unidade da direita (Quadros 6, 8 e 12) foi de 0,988*, 0,967* e 0,982*, respectivamente. Comprovação dessa afirmativa surge ao comparar o conteúdo de P com o teor desse nutriente nos tecidos vegetais (Quadros 6, 8 e 10). Os resultados foram de 0,314, 0,171 e -0,218, para as três variáveis, respectivamente.

A resposta indicada, com elevadas correlações entre o consumo de água, a produção de matéria seca e o conteúdo de P na parte aérea, leva à repetição da significância e sinal dos contrastes analisados para as duas primeiras

variáveis (Quadro 7) com os calculados para o conteúdo de P nessa porção da planta (Quadro 13). Em consequência, a discussão desses resultados pode ser estendida aos determinados para o conteúdo de P na parte aérea. A mesma colocação é válida para as análises de raízes, ainda que os resultados não fossem totalmente coincidentes (Quadros 9 e 13).

A movimentação de P para a parte aérea, determinada pela relação entre os conteúdos da parte aérea e o conteúdo total na planta (parte aérea + raízes) (Quadro 12), apresentou valores extremos de 72 e 83 %, respectivamente. Quando foi calculada a relação entre o conteúdo de P na parte aérea e nas raízes, os índices determinados variaram no intervalo de 2,71 a 5,03 e mostraram que essa é uma forma que permite apreciar diferenças com maior precisão.

A baixa disponibilidade inicial de P nos tratamentos com PI levou a diferenças estatísticas tanto no conteúdo de P da parte aérea (CPPA), como nas raízes do vaso geminado (CPR). Nesse estudo, a variação dos conteúdos de P nas raízes e na parte aérea foi dependente, quase que exclusivamente, da produção de matéria seca (Quadros 6 e 8), tendo em vista a similaridade nos teores de P (Quadros 10 e 11).

Nesse contexto, Rodriguez et al. (1998) relatam que o baixo suprimento de P, como aconteceu inicialmente nos tratamentos com PI, diminui a área foliar, em consequência principalmente da redução do número de folhas e, secundariamente, da limitação à expansão da folha, levando a uma menor produção de matéria seca.

Esses resultados indicam que a ausência total da adubação fosfatada na camada mais superficial limita o crescimento inicial da planta. Assim, pensando em uma maior tolerância ao estresse hídrico, haveria de se fertilizar camadas mais profundas, contudo sem eliminar a adubação superficial.

Quadro 13. Contrastes médios do conteúdo de P da parte aérea (CPPA), das raízes na unidade da esquerda (CPRE), das raízes na unidade da direita (CPRD), das raízes no vaso geminado (CPR = CPRE + CPRD) e relações entre essas variáveis, considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial de trabalho (ψ)

Contraste ^{1/}	CPPA	CPRE	CPRD	CPR	CPPA/CPR	CPRE/CPR	CPRD/CPR
	mg				mg mg ⁻¹		
C1: PS + PI vs. PM	-4,40*	-0,59	1,07	0,49	-0,47	-0,12	0,12
C2: PS vs. PI	20,40*	-1,04	6,12*	5,09*	0,29	-0,19	0,19
C3: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PS	43,07*	2,59	7,60*	10,18*	0,61	0,03	-0,03
C4: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PS	27,66*	2,55	4,13	6,68*	0,38	0,04	-0,04
C5: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PI	34,71*	6,92*	4,88*	11,79*	-0,26	0,02	-0,02
C6: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PI	27,65*	7,35*	-1,75	5,59*	0,83	0,29	-0,29
C7: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PM	42,47*	2,51	8,08*	10,58*	1,02*	-0,36*	0,36*
C8: $\Psi(-9/-9)$ vs. $(\Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9))$ d/PM	33,67*	-1,14	1,30	0,16	1,91*	0,01	-0,01
C9: $\Psi(-9/-50)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PM	10,09*	-1,70	2,35	0,65	0,75	-0,14	0,14

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado. $\Psi(-9/-9)$, $\Psi(-9/-50)$, $\Psi(-50/-9)$ e $\Psi(-50/-50)$: potencial de -9/-50 kPa na sequência da unidade da esquerda para a unidade da direita, respectivamente.

*: Significativo a 5 % pelo teste F.

4.4. Exsudato xilemático

O exsudato xilemático, colhido na finalização do ensaio, é indicativo da absorção e translocação de nutrientes para a parte aérea, no momento de corte (Taiz & Zeiger, 2002). Os valores médios em relação ao exsudato xilemático, coletado por 2 h, são mostrados no quadro 14. Nesse material, foram determinados o volume, a concentração e o conteúdo de P.

No quadro 15, que mostra os contrastes analisados, observa-se que, no momento do corte, o volume de exsudato apresenta diferenças apenas quando se comparam os maiores potenciais matriciais em relação ao menor e, também, quando se compara a localização superior de P em relação à inferior. Esses resultados corroboram os obtidos por Ruiz et al. (1988a), avaliando o volume do exsudato xilemático de soja em resposta ao potencial da água do solo. Esses autores evidenciaram dependência marcante com a disponibilidade de água, verificando incremento de até 30 vezes quando o potencial matricial passou de -40 para -10 kPa.

Ainda no quadro 15, em relação ao volume de exsudato, verifica-se que não ocorrem diferenças ao se comparar os tratamentos que receberam água de maneira adequada em ambas as unidades do vaso geminado (-9/-9 kPa) em relação aos vasos que receberam simultaneamente os potenciais -9/-50 kPa. Esses resultados ocorrem independentemente da forma de localização de P. A planta, ao menos em relação a esta característica, quando apresenta um fornecimento adequado de água em um lado do sistema radicular (-9/-50 ou -50/-9 kPa), ajusta-se osmoticamente, conseguindo absorver quantidades volumétricas similares àquelas que receberam água de forma nas duas unidades do vaso geminado.

Os valores da concentração de P foram semelhantes (Quadro 14), comportando-se de forma similar ao teor de P na planta (Quadro 10). Todavia, no que se refere ao conteúdo de P no exsudato xilemático, observam-se diferenças em relação ao potencial matricial apenas nas localizações mista e superior (Quadro 15).

Quadro 14. Volume (VE), concentração de P (CPE) e conteúdo de P (COPE) no exsudato xilemático, coletado por 2 h, considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial de trabalho (ψ)

P ^{1/}	ψ ^{2/}		VE	CPE	COPE
	E	D			
kPa			mL	mg L ⁻¹	mg
S	-9	-9	3,72	54,77	0,18
	-50	-9	2,72	40,58	0,09
	-50	-50	0,71	45,14	0,03
	Média		2,38	46,83	0,10
I	-9	-9	1,76	58,92	0,11
	-50	-9	1,11	60,72	0,07
	-50	-50	0,57	66,02	0,04
	Média		1,15	61,89	0,07
M	-9	-9	2,73	66,56	0,18
	-9	-50	1,10	58,92	0,13
	-50	-9	2,14	52,37	0,06
	-50	-50	0,67	75,33	0,05
	Média		1,66	63,30	0,11

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado.

^{2/} E e D: potencial de trabalho na unidade da esquerda e da direita, respectivamente.

Quadro 15. Contrastes médios do volume (VE), concentração de P (CPE) e conteúdo de P (COPE) no exsudato xilemático, coletado por 2 h, considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial de trabalho (Ψ)

Contraste ^{1/}	VE	CPE	COPE
	mL	mg L ⁻¹	mg
C1: PS + PI vs. PM	0,11	-8,94	-0,0183
C2: PS vs. PI	1,24*	-15,06*	0,0267
C3: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/OS	2,51*	2,54	0,1050*
C4: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/OS	1,00	14,19	0,0900*
C5: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PI	0,87	-6,20	0,0500
C6: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PI	0,65	-1,80	0,0400
C7: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PM	1,32*	-16,05	0,0733*
C8: $\Psi(-9/-9)$ vs. ($\Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9)$) d/PM	1,11	10,92	0,0850*
C9: $\Psi(-9/-50)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PM	-1,04	6,55	0,0700

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado. $\Psi(-9/-9)$, $\Psi(-9/-50)$, $\Psi(-50/-9)$ e $\Psi(-50/-50)$: potencial de -9/-50 kPa na sequência da unidade da esquerda para a unidade da direita, respectivamente.

*: Significativo a 5 % pelo teste F.

Os valores do conteúdo de P no exsudato xilemático são também apresentados no quadro 14. Como observado para outras variáveis associadas a conteúdo, neste ensaio, os resultados mostraram marcada dependência do volume e não da concentração de P no exsudato. Comprova-se essa afirmativa pelos valores dos coeficientes de correlação linear simples entre o conteúdo de P e o volume e o teor de P no exsudato, de 0,767* e 0,065, respectivamente.

4.5. Fluxo de massa e difusão do fósforo

Para estimar a contribuição do fluxo de massa e da difusão para o transporte de P em sistema de vaso geminado com duas unidades, os cálculos foram realizados segundo esta seqüência:

a) Inicialmente determinou-se o conteúdo total de P na planta, pela soma do conteúdo de P na parte aérea e nas raízes (Quadro 12). Esses valores são mostrados no quadro 16.

b) A contribuição do fluxo de massa originado nas unidades da esquerda e da direita, respectivamente, foi determinada pelo produto entre o volume de água acrescentado a cada unidade (Quadro 6) e a concentração média de P na solução do solo (Quadro 3). Essas concentrações médias foram calculadas considerando que cada unidade do vaso geminado foi preenchida com volumes iguais de P0 e P300 e o fluxo de massa independe da extensão do sistema radicular.

c) A contribuição do fluxo de massa no vaso geminado foi determinada pela soma das contribuições em cada uma das unidades (Quadro 16).

d) A contribuição da difusão no vaso geminado foi calculada subtraindo, do conteúdo total de P na planta, o valor correspondente do fluxo de massa (Quadro 16).

e) A contribuição para a difusão de P em cada unidade foi calculada considerando que a difusão responde à extensão do sistema radicular. Assim, multiplicaram-se os valores correspondentes à difusão de P no vaso geminado (Quadro 16) e a proporção de raízes em cada unidade do sistema. Essas proporções foram calculadas pelo quociente entre a produção de raízes na unidade e a produção total de raízes no vaso geminado (Quadro 8).

Observa-se, para o conteúdo total de P na planta (Quadro 16), que seus resultados assemelham-se ao conteúdo de P da parte aérea. Esse fato pode ser explicado pela similaridade nos teores de P para os tratamentos (Quadros

12 e 13) e pela diferença apresentada na produção de matéria seca parte aérea (Quadros 6 e 7).

Assim, essas diferenças foram fundamentais nas definições das significâncias dos contrastes em relação ao conteúdo total de P na planta. Todos os contrastes foram significativos (Quadro 17), excetuando-se o C1. Com isso, os resultados do conteúdo total de P na planta ratificam que a maior absorção de P por plantas de milho ocorre nos maiores potenciais matriciais e na localização superior (C2 a C9).

Verifica-se, independentemente da forma de localização, que a contribuição para o fluxo de massa de P, geralmente, foi maior nos tratamentos onde a planta recebia água de forma adequada nos dois lados da unidade (C4 a C9, Quadro 16). O fluxo de massa responde à transpiração da planta, logo a planta, em qualquer indicio de restrição hídrica, tende a reduzir a abertura estomática diminuindo, com isso, a absorção de água e nutrientes por esse mecanismo (Brestic et al., 1995).

A difusão foi maior nos tratamentos que receberam PS em comparação àqueles com PI (Quadros 16 e 17). No que se refere à comparação dos potenciais matriciais, verifica-se comportamento similar ao apresentado pelo fluxo de massa, apresentando os vasos com fornecimento adequado de água em ambas as unidades maiores valores de difusão de P, verificado nos C3 a C9, para DVG. Na difusão de P, existe uma relação direta entre o coeficiente de difusão de fósforo no solo e o conteúdo volumétrico de água (Novais & Smyth, 1999). Assim, verifica-se que, à medida que se aumenta a umidade, o filme de água em contato com as partículas sólidas do solo torna-se mais espesso, diminuindo a interação do nutriente com os coloides.

Quadro 16. Conteúdo total de P na planta (conteúdo de P da parte aérea + conteúdo de P das raízes do vaso geminado - CTPP); fluxo de massa de P na unidade esquerda (FMUE), na unidade direita (FMUD), no vaso geminado (FMVG); difusão de P no vaso geminado (DVG), na unidade esquerda (DUE), na unidade direita (DUD); relação entre (DUE e FMUE), (DUD e FMUD) e (DVG e FMVG), considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial de trabalho (ψ)

P ^{1/}	ψ ^{2/}		CTPP	FMUE	FMUD	FMVG	DVG	DUE	DUD	DUE/FMUE	DUD/FMUD	DVG/FMVG
	E	D										
	—kPa—		mg vg ⁻¹	mg						mg mg ⁻¹		
S	-9	-9	107,51	2,47	2,50	4,97	102,55	30,93	71,62	12,18	29,20	20,70
	-50	-9	73,17	0,83	2,60	3,43	69,74	21,14	48,60	24,66	18,80	20,38
	-50	-50	37,08	0,88	0,89	1,7	35,32	10,55	24,76	11,78	27,90	20,03
	Média		72,59	1,39	2,00	3,37	69,20	20,87	48,33	16,21	25,30	20,37
I	-9	-9	79,22	2,40	2,23	4,63	74,59	49,49	25,10	20,12	10,87	16,10
	-50	-9	45,98	0,78	2,43	3,20	42,77	13,72	29,05	17,16	12,03	13,36
	-50	-50	16,11	0,78	0,78	1,56	14,55	6,95	7,60	9,24	9,59	9,59
	Média		47,10	1,32	1,81	3,13	43,97	23,39	20,58	15,51	10,83	13,82
M	-9	-9	99,57	2,56	2,62	5,19	94,38	40,86	53,52	15,73	19,13	18,23
	-9	-50	71,12	2,49	0,84	3,33	67,79	23,80	43,99	9,80	51,71	20,39
	-50	-9	60,37	0,87	2,42	3,28	57,09	26,64	30,45	29,42	12,52	17,38
	-50	-50	23,97	0,82	0,77	1,59	22,38	16,44	5,94	19,97	7,60	14,17
	Média		63,76	1,69	1,66	3,35	60,41	26,94	33,48	18,73	22,74	17,54

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado.

^{2/} E e D: potencial de trabalho na unidade da esquerda e da direita, respectivamente.

Quadro 17. Contrastes médios do conteúdo total de P na planta (CTPP); do fluxo de massa de P na unidade esquerda (FMUE), na unidade direita (FMUD), no vaso geminado (FMVG); da difusão de P no vaso geminado (DVG), na unidade esquerda (DUE), na unidade direita (DUD); da relação entre (DUE e FMUE), (DUD e FMUD) e (DVG e FMVG), considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial de trabalho (ψ)

Contraste ^{1/}	CTPP	FMUE	FMUD	FMVG	DVG	DUE	DUD	DUE/FMUE	DUD/FMUD	DVG/FMVG
	mg vg ⁻¹	mg			mg			mg mg ⁻¹		
C1: PS + PI vs.PM	-3,91	-0,33*	0,24*	-0,10	-3,82	-4,80	0,98	-2,87	-5,05	-0,85
C2: PS vs. PI	25,49*	0,07	0,18	0,24*	25,23*	-2,51	27,75*	0,70	14,47*	7,35*
C3: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/OS	53,26*	0,77*	1,66*	2,50*	50,83*	15,48	35,35*	6,64	-3,90	0,52
C4: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/OS	34,34*	1,64*	-0,10*	1,54*	32,81*	9,79	23,02	-12,48	10,40	0,32
C5: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PI	46,50*	0,81*	1,55*	2,36*	44,14*	24,66*	19,47	9,40	1,86	5,14*
C6: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PI	33,25*	1,62*	-0,20*	1,43*	31,82*	35,77*	-3,95	2,96	-1,16	2,74
C7: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PM	53,05*	1,15*	1,19*	2,34*	50,71*	13,99	36,72*	-1,65	20,69*	4,50*
C8: $\Psi(-9/-9)$ vs. $(\Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9))$ d/PM	33,82*	0,88*	0,99*	1,89*	31,94*	15,64	16,30	-3,88	-11,48*	-0,66
C9: $\Psi(-9/-50)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PM	10,75*	1,62*	-1,58*	0,05	10,70*	-2,84	13,54	-19,62*	39,18*	3,01

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado. $\Psi(-9/-9)$, $\Psi(-9/-50)$, $\Psi(-50/-9)$ e $\Psi(-50/-50)$: potencial de -9/-50 kPa na sequência da unidade da esquerda para a unidade da direita, respectivamente.

*: Significativo a 5% pelo teste F.

Outra questão está relacionada ao fator de impedância (f), que está diretamente relacionado com difusão de um nutriente no solo. Nye & Tinker (1977) afirmam que o f aproxima-se de zero em solos secos e chega a valores entre 0,4 e 0,7 em solos saturados, aumentando, assim, a difusão. Ruiz (1986) cita que o aumento da umidade leva à redução da viscosidade da solução do solo, apresentando valores mais próximos aos da água pura, fato que também provoca o aumento da difusão de P nos solos.

O efeito do conteúdo de água foi bem observado também por Ruiz et al. (1988b) em trabalho com soja. O autor observou que o movimento de P era mais dependente de água do que de doses elevadas, notando, com isso, a necessidade de condições ideais no suprimento de água para evitar estresses relacionados à fisiologia da planta.

No que se referem às relações, observa-se, no quadro 16, que a relação DVG/FMVG diminui à medida que se restringe o fornecimento de água indicando que a difusão, em termos proporcionais, é mais afetada que o fluxo de massa quando se diminui a quantidade de água fornecida. O percentual de cada mecanismo demonstra bem esse fato, onde, por exemplo, a contribuição do FMVG de P, no PI, aumenta de 5,84 % para 9,68 % à medida que se diminui o fornecimento de água de -9/-9 para -50/-50 kPa. Esses dados estão de acordo com os obtidos por Oliveira et al. (2004), que trabalharam determinando a contribuição da difusão e do fluxo de massa no transporte de K em algodoeiro. Na mesma linha de pesquisa, Oliveira et al. (2010), em pesquisa com milho, relatam que a influência da água do solo nos mecanismos de transporte do P e do K foi maior em solos que continham maiores concentrações desses nutrientes em solução. Também concluíram que o fluxo de massa aumentou proporcionalmente em importância em solos com maior restrição de água.

5.0 CONCLUSÕES

- Em etapas iniciais de cultivo de milho, em casa de vegetação, a localização de fósforo na porção superior do vaso (PS) é mais eficiente que a localização na porção inferior (PI), em resposta à maior umidade nesse setor da unidade experimental.
- O crescimento do sistema radicular respondeu à porção de solo que recebeu a incorporação do adubo fosfatado, independentemente da localização na unidade experimental, na porção superior ou inferior da unidade. A localização na porção inferior contribuiu para minorar efeitos negativos de eventual estresse hídrico.
- Em ensaio com vasos geminados constituídos por duas unidades justapostas, o fornecimento adequado de água às duas unidades, neste caso representado pelos potenciais matriciais -9/-9 kPa, permite o incremento da área foliar, da produção de matéria seca e da absorção de P, frente ao tratamento em que as duas unidades apresentaram potenciais matriciais de -50 kPa.
- O fornecimento adequado de água utilizado apenas em uma unidade do vaso geminado, representado pelos tratamentos -9/-50 kPa, permitiu produção de matéria seca semelhante àquela conseguida no sistema -9/-9 kPa. Isso indica a possibilidade de consumo menor de água com aplicação localizada, pois o tratamento -9/-50 apresentou resultados mais próximos a -9/-9 que a -50/-50 kPa.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; CATARUTTI, R.B. & LOPES, A.S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G. & ALVAREZ V., V.H., eds. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª Aproximação. Viçosa, MG, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.314-316.
- ALVAREZ V., V.H. & ALVAREZ, G.A.M. Comparação de médias ou teste de hipóteses? *Contrastes! Bol. Inf. SBCS*, 31:24-34, 2006.
- ALVES, V.M.C.; NOVAIS, R.F.; OLIVEIRA, M.F.G. & SANT'ANNA, R. Cinética e translocação de fósforo em híbridos de milho. *Pesq. Agropec. Bras.*, 33:1047-1052, 1998.
- ARAÚJO, C.A.S.; RUIZ, H.A.; SILVA, D.J.; FERREIRA, P.A.; ALVAREZ V., V.H. & BAHIA FILHO, A.F.C. Eluição de magnésio, cálcio e potássio de acordo com o tempo de difusão em colunas com agregados de um Latossolo Vermelho Distrófico típico. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:231-238, 2003.
- BARBER, S.A. Influence of the plant root on ion movement in soil. In: CARSON, E.W., ed. *The plant root and its environment*. Charlottesville, University Press of Virginia, 1974. p.525-564.
- BARROS, N.F. & COMERFORD, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. *Tópicos em Ciência do Solo*. Volume 2. Viçosa, Sociedade Brasileira em Ciência do Solo, 2002. p.487-592.
- BRESTIC, M., CORNIC, G., FRYER, M.J. & BAKER, N.R. Does photorespiration protect the photosynthetic apparatus in french bean leaves from photoinhibition during drought stress? *Planta*, 126:450-457, 1995.
- CASTILHOS, D.D. & ANGHIONI, I. Influência do suprimento de fósforo a diferentes frações do sistema radicular sobre o comportamento do milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:263-267, 1988.

- CHAIB, S.L.; BULIZANI, E.A. & CASTRO, L.H.S.M. Crescimento e produção do feijoeiro em resposta a profundidade de aplicações de adubo fosfatado. *Pesq. Agropec. Bras.*, 19:817-822, 1984.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. revista. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2011. 225p.
- EPSTEIN, E. Nutrição mineral das plantas: princípios e perspectivas. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 1975. 341p.
- FERREIRA, D.F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. *R. Symposium*, 6:36-41, 2008.
- FÖHSE, D.; CLAASSEN, N. & JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. I - External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. *Plant Soil*, 110:101-109, 1988.
- GERLOFF, G.C. & GABELMAN, W.H. The search for and interpretation of genetic controls that enhance plant growth under deficiency levels of a macronutrient. *Plant Soil*, 72:335-350, 1983.
- HOEFT, R.G.; WALSH, L.M. & KEENEY, D.R. Evaluation of various extractants for available soil sulfur. *Soil Sci. Soc. Am. P.*, 37:401-404, 1973.
- KAMINSKI, J. & PERUZZO, G. Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo. Santa Maria, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 31p. (Boletim Técnico, 3)
- LEITE, B.P. Níveis críticos de fósforo para milho e eucalipto, em função de sua localização no solo. Viçosa, Universidade federal de Viçosa, 1991. 106p (Dissertação de Mestrado)
- MAIA NETO, R.F. Água para o desenvolvimento sustentável. *A Água em Revista*, 9:21-32, 1997.
- MANTOVANI, E.C., BERNARDO, S., PALARETTI, L.F. Irrigação: Princípios e Métodos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2006. 318p.
- MEURER, E.J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. Fertilidade do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.65-90.
- NOVAIS, R.F. & SMITH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- NYE, P.H. & TINKER, P.B. Solute movement in the soil-root system. Berkeley, University of California Press, 1977. 342p.

- OLIVEIRA, E.M.M.; RUIZ, H.A.; ALVAREZ V., V.H.; FERREIRA, P.A.; COSTA, F.O. & ALMEIDA, I.C.C. Nutrient supply by mass flow and diffusion to maize plant in response to soil aggregate size and water potential. R. Bras de Ci. Solo. 34:317-327, 2010.
- OLIVEIRA, R.H.; ROSOLEM, C.A. & TRIGUEIRO, R.M. Importância do fluxo de massa e difusão no suprimento de potássio ao algodoeiro como variável de água e potássio no solo. R. Bras. Ci. Solo, 28:439-445, 2004.
- OLSEN, S.R. & KEMPER, W.D. Movement of nutrients to plant roots. Adv. Agron., 20:91-151, 1968.
- PAZ, V.P.S.; TEODORO, R.E.F. & MENDONÇA, F.C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 4:465-473, 2000.
- PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A. & COSTA, L.C. Análise do crescimento e eficiência no uso da água pelas culturas de soja e feijão e por plantas daninhas. Acta Sci., 24:1345-1351, 2002.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. R. Bras. Ci. Solo, 12:211- 216, 1988.
- RODRIGUEZ, F. Custos e benefícios da irrigação no Brasil. ITEM: Irrigação e Tec. Mod., 41:6-11, 1990.
- RODRÍGUEZ, D.; KELTJENS, W.G. & GOUDRIAAN, J. Plant leaf area expansion and assimilate production in wheat (*Triticum aestivum* L.) growing under low phosphorus conditions. Plant Soil, 200:227-240, 1998.
- ROSEGRANT, M.W.; CAI, X.; CLINE, S.A. Global water outlook to 2025: averting an impending crisis. Washington, DC, International Food Policy Research Institute: International Water Management Institute, 2002. 28p.
- RUIZ, H.A. Efeito do conteúdo de água sobre o transporte de fósforo em dois Latossolos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1986. 86p. (Tese de Doutorado)
- RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte+argila). R. Bras. Ci. Solo, 29:297-300, 2005.
- RUIZ, H.A.; FERNANDES, B.; NOVAIS, R.F. & ALVAREZ, V., V.H. Efeito da umidade do solo sobre o volume e conteúdo de fósforo no exsudato xilemático de soja. R. Bras. Ci. Solo, 12: 39-42, 1988a.
- RUIZ, H.A.; FERNANDES, B.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V., V.H. & FERREIRA, P.A. Efeito do conteúdo de água sobre os níveis críticos de fósforo em dois Latossolos. R. Bras. Ci. Solo, 12: 43-48, 1988b.
- RUIZ-ERASO, M.H. Crescimento e acúmulo de fósforo em sorgo em resposta à localização de fosfato, ao potencial de água no solo e à frequência de

- irrigação. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2009, 77p. (Tese de Doutorado)
- SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; SILVA, V.M. & ALVES, G.D. Capacidade de suprimento de N e resposta à fertilização de 20 solos de Pernambuco. R. Bras. Ci. Solo, 20:269-279, 1995.
- SCHENCK, M.K. & BARBER, S.A. Potassium and phosphorus uptake by corn genotypes grown in the field as influenced by root characteristics. Plant Soil, 54:65-76, 1980.
- SOUZA, F.S.; FARINELLI, R. & ROSOLEM, C.A. Desenvolvimento radicular do algodoeiro em resposta à localização do fertilizante. R. Bras. Ci. Solo, 31:387-392, 2007.
- STEVENSON, F.J. & COLE, M.A. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. 2. ed. New York, John Wiley, 1999. 427p.
- TAYZ, L. & ZEIGER, E. Plant physiology. 3. ed. Sunderland, Massachusetts, Sinauer, 2002. 690p.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 147p. (Boletim Técnico, 5)
- VALE, F.R.; NOVAIS, R.F.; SANT'ANNA, R. & BARROS, N.F. Absorção e translocação de fosfato em milho suprido com nitrato ou amônio e pré-tratado com alumínio. R. Bras. Ci. Solo, 8:219-222, 1984.
- WILLIAMS, E. G. & REITH, J.W.S. Residual effects of phosphate and the relative effectiveness on annual and rotational dressings, In: RESIDUAL value of applied nutrients. London, Min. of Agric. Fisheries and Food, 1971. (Tech. Bull., 20)
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of carbon in soil. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 19:1467-1476, 1988.

APÉNDICE

APÊNDICE

Quadro 1A. Análise de variância do consumo de água nas unidades esquerda (AE) e direita (AD) do vaso geminado, da relação AE/AD, do consumo de água total (AT), da área foliar (AF), e da produção de matéria seca da parte aérea (PA), considerando os tratamentos aplicados

FV	GL	Quadrado Médio					
		AE	AD	AE/AD	AT	AF	PA
Blocos	3	630583*	340665*	0,017	1728211*	918361*	50,95
Tratamentos	9	8261614*	8331960*	1,687*	20675628*	6124161*	895,70*
Resíduo	27	64108	52208	0,014	96813	157811	18,12
CV (%)		50,17	41,91	63,24	36,07	40,58	50,15

*: significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 2A. Análise de variância da produção de matéria seca de raízes na metade superior e na metade inferior da unidade da esquerda (RSE e RIE), da relação RSE E RIE, na metade superior e na metade inferior da unidade da direita (RSD e RID), da relação RSD RID, na unidade da esquerda e na unidade da direita (RE = RSE + RIE e RD = RSD + RID) e no vaso geminado (RVG = RE + RD), considerando os tratamentos aplicados

FV	GL	Quadrado Médio								
		SER	RIE	RSE/RIE	RE	RSD	RID	RSD/RID	RD	RVG
Blocos	3	25*	15	1	72*	15*	33*	0,11	90*	283*
Tratamentos	9	5	13*	9*	26	12*	19*	1,10*	57*	116*
Resíduo	27	5	6	2	15	3	5	0,27	11	12
CV (%)		90	117	101	90	77	85	64	76	62

*: significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 3A. Análise de variância das relações entre a área foliar (AF), a produção de matéria seca da parte aérea (PA), de raízes na unidade da esquerda (RE) e de raízes na unidade da direita (RD), de raízes do vaso geminado (RVG), considerando os tratamentos aplicados

FV	GL	Quadrado Médio							
		AF/PA	AF/RE	AF/RD	AF/RVG	PA/RE	PA/RD	PA/RVG	RE/RD
Blocos	3	196,73	5836297*	1808452	115258*	447,12*	116,65	8,14*	5,13
Tratamentos	9	1826,72*	595423	2685663	16726*	54,24	129,80	0,25	15,05
Resíduo	27	149,23	1063835	1628348	3047	88,77	78,95	0,19	8,58
CV (%)		20,21	96,21	134,41	37,93	96,95	116,23	32,13	163,40

*: significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 4A. Análise de variância do teor de P da parte aérea (TPPA), das raízes na unidade da esquerda (TPRE), das raízes na unidade da direita (TPRD) e do teor ponderado de P do sistema radicular (TPR) e da planta (TPPlanta), considerando os tratamentos aplicados

FV	GL	Quadrado Médio				
		TPPA	TPRE	TPRD	TPR	TFPlanta
Blocos	3	0,22*	0,23*	0,13*	0,19*	0,30*
Tratamentos	9	0,13*	0,08	0,06*	0,06	0,10*
Resíduo	27	0,04	0,04	0,02	0,03	0,03
CV (%)		16,58	19,86	16,54	16,98	16,84

*: significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 5A. Análise de variância do conteúdo de P na parte aérea (CPPA), nas raízes na unidade da esquerda (CPRE), nas raízes na unidade da direita (CPRD), nas raízes no vaso geminado (CPR = CPRE + CPRD) e relações entre essas variáveis, considerando os tratamentos aplicados

FV	GL	Quadrado Médio						
		CPPA	CPRE	CPRD	CPR	CPPA/CPR	CPRE/CPR	CPRD/CPR
Blocos	3	468,38*	66,61	72,48*	210,83*	13,27*	0,05	0,05
Tratamentos	9	2504,15*	39,33	78,28*	156,15*	0,96	0,11	0,11
Resíduo	27	42,13	24,14	18,86	13,40	0,54	0,07	0,07
CV (%)		52,86	86,27	74,10	53,84	35,52	60,52	48,14

*: significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 6A. Análise de variância do volume (VE), da concentração de P (CPE) e do conteúdo de P (COPE) no exsudato xilemático coletado por 2h, do conteúdo total de P na planta (CTPP), do fluxo de massa de P na unidade esquerda (FMUE), na unidade direita (FMUD) e no vaso geminado (FMVG), considerando os tratamentos aplicados

FV	GL	Quadrado Médio						
		VE	CPE	COPE	CTPP	FMUE	FMUD	FMVG
Blocos	3	1,58	126,97	0,0114*	261*	0,18*	0,10*	0,50*
Tratamentos	9	4,61*	425,89	0,0122*	3863*	2,92*	2,94*	7,30*
Resíduo	27	1,01	373,42	0,0031	56	0,02	0,02	0,03
CV (%)		78,65	32,63	80,96	49	56	46	40

*: significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 7A. Análise de variância da difusão de P no vaso geminado (DVG), na unidade esquerda (DUE), na unidade direita (DUD), na relação entre (DUE e FMUE), (DUD e FMUD) e (DVG e FMVG), considerando os tratamentos aplicados

FV	GL	Quadrado Médio					
		DVG	DUE	DUD	DUE/FMUE	DUD/FMUD	DVG/FMVG
Blocos	3	245*	686	126,1	138	32	9
Tratamentos	9	3549*	860*	1623*	176	720*	56*
Resíduo	27	55	310	285	99	78	5
CV (%)		50	86	71	63	74	24

*: significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 8A. Teores de K, Ca, Mg, S, Mn, Zn e Cu da parte aérea (PA), das raízes na unidade da esquerda (RE), das raízes na unidade da direita (RD) e teor ponderado do sistema radicular (SR) e da planta por vaso geminado (VG), considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial de trabalho (ψ)

P ^{1/}	ψ ^{2/}		PA	RE	RD	SR	Planta
	E	D					
POTÁSSIO							
	—kPa—		g kg ⁻¹ /VG	—g kg ⁻¹ /C—		g kg ⁻¹ /VG	g kg ⁻¹ /VG
S	-9	-9	19,33	11,62	10,19	10,66	16,92
	-50	-9	19,56	15,36	14,17	14,65	17,85
	-50	-50	24,95	8,17	14,84	14,03	21,17
I	-9	-9	22,48	17,24	8,62	13,49	19,89
	-50	-9	23,83	10,23	13,71	13,27	20,19
	-50	-50	28,69	8,73	15,26	12,19	24,05
M	-9	-9	19,56	11,39	13,79	13,70	18,06
	-9	-50	20,75	10,36	7,44	7,92	17,15
	-50	-9	22,48	17,31	15,61	15,91	20,14
	-50	-50	26,82	16,51	9,23	15,48	23,86
CÁLCIO							
S	-9	-9	2,83	3,64	4,14	3,94	3,09
	-50	-9	2,68	3,38	4,20	3,90	2,99
	-50	-50	2,91	2,58	3,13	3,02	2,92
I	-9	-9	3,20	4,14	3,84	4,31	3,50
	-50	-9	3,20	4,07	4,46	4,38	3,46
	-50	-50	3,67	3,01	3,54	3,27	3,50
M	-9	-9	2,86	3,33	4,19	3,78	3,04
	-9	-50	2,70	2,94	3,05	3,05	2,78
	-50	-9	2,99	2,32	2,54	2,33	2,79
	-50	-50	3,42	3,49	3,27	2,64	3,21

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado. ^{2/} E e D: potencial de trabalho na unidade da esquerda e da direita, respectivamente.

Quadro 8A. (Continuação)

P ^{1/}	ψ ^{2/}		PA	RE	RD	SR	Planta
	E	D					
MAGNÉSIO							
	—kPa—		g kg ⁻¹ /VG	—g kg ⁻¹ /C—		g kg ⁻¹ /VG	g kg ⁻¹ /VG
S	-9	-9	2,43	2,00	2,39	2,26	2,35
	-50	-9	2,04	2,15	2,46	2,35	2,11
	-50	-50	2,15	1,63	1,91	1,87	2,02
I	-9	-9	2,35	2,80	2,72	3,00	2,54
	-50	-9	2,01	3,35	3,10	3,05	2,25
	-50	-50	2,10	2,25	2,19	2,21	2,08
M	-9	-9	2,12	2,40	2,64	2,71	2,24
	-9	-50	2,17	1,74	2,13	2,02	2,13
	-50	-9	1,98	1,49	1,74	1,53	1,84
	-50	-50	2,08	2,12	2,44	1,65	1,97
ENXOFRE							
S	-9	-9	2,24	28,00	27,20	28,47	8,43
	-50	-9	2,81	24,98	24,71	24,68	7,83
	-50	-50	3,40	23,82	27,27	26,53	9,13
I	-9	-9	2,22	33,79	34,70	34,56	11,45
	-50	-9	2,65	24,66	23,26	24,47	7,82
	-50	-50	2,87	27,79	25,98	27,88	8,48
M	-9	-9	2,90	22,50	23,09	22,79	7,34
	-9	-50	2,24	22,10	24,44	23,88	6,91
	-50	-9	2,44	26,56	26,72	26,60	8,82
	-50	-50	2,86	33,53	42,13	25,82	8,87
MANGANÊS							
			mg kg ⁻¹ /VG	—mg kg ⁻¹ /C—		mg kg ⁻¹ /VG	mg kg ⁻¹ /VG
S	-9	-9	76,56	42,64	48,11	46,38	66,88
	-50	-9	71,76	52,09	43,81	45,63	63,70
	-50	-50	101,93	47,16	49,28	48,47	83,88
I	-9	-9	84,85	49,98	47,03	49,53	74,87
	-50	-9	86,85	60,95	57,21	57,18	76,02
	-50	-50	108,59	42,73	51,61	47,18	92,37
M	-9	-9	70,85	47,13	49,73	47,05	64,27
	-9	-50	80,80	87,00	46,75	68,57	80,88
	-50	-9	82,63	47,65	47,16	48,43	70,71
	-50	-50	111,65	58,77	42,56	40,37	92,95

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado. ^{2/} E e D: potencial de trabalho na unidade da esquerda e da direita, respectivamente.

Quadro 8A. (Continuação)

P ^{1/}	ψ ^{2/}		PA	RE	RD	SR	Planta
	E	D					
ZINCO							
	—kPa—		mg kg ⁻¹ /VG	—mg kg ⁻¹ /C—		mg kg ⁻¹ /VG	mg kg ⁻¹ /VG
S	-9	-9	35,49	113,24	50,88	72,63	45,57
	-50	-9	35,50	64,29	92,21	79,55	47,98
	-50	-50	49,46	95,09	234,44	211,31	90,85
I	-9	-9	39,04	62,70	49,56	61,85	44,64
	-50	-9	41,44	75,05	63,76	76,14	49,46
	-50	-50	59,81	81,34	192,38	143,21	79,73
M	-9	-9	32,96	195,08	50,28	128,86	52,79
	-9	-50	31,86	48,74	49,79	48,26	36,37
	-50	-9	46,01	102,38	201,71	183,32	81,59
	-50	-50	48,76	163,15	124,22	132,74	70,47
COBRE							
S	-9	-9	6,08	9,26	9,48	9,64	7,00
	-50	-9	6,01	9,21	8,99	9,03	6,80
	-50	-50	6,49	9,49	9,53	9,45	7,35
I	-9	-9	6,34	8,84	9,78	9,18	7,14
	-50	-9	6,21	10,01	9,39	9,33	7,12
	-50	-50	7,04	14,69	9,57	12,40	8,45
M	-9	-9	5,81	8,61	9,43	8,96	6,57
	-9	-50	5,50	9,65	9,43	9,57	6,63
	-50	-9	6,23	9,09	9,50	9,37	7,19
	-50	-50	7,15	9,45	13,80	7,39	7,20

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado. ^{2/} E e D: potencial de trabalho na unidade da esquerda e da direita, respectivamente.

Quadro 9A. Conteúdo de K, Ca, Mg, S, Mn, Zn e Cu da parte aérea (PA), das raízes na unidade da esquerda (RE), das raízes na unidade da direita (RD), das raízes no vaso geminado (VG) (CR = RE + RD) e da planta (PA + CR), considerando a localização de 300 mg dm⁻³ de P e o potencial de trabalho (ψ)

P ^{1/}	ψ ^{2/}		PA	RE	RD	CR	Planta
	E	D					
POTÁSSIO							
	—kPa—		mg/VG	—mg/C—		mg/VG	mg/VG
S	-9	-9	929,22	57,49	147,12	204,61	1133,83
	-50	-9	663,51	59,85	134,00	193,85	857,36
	-50	-50	356,81	33,83	61,16	94,99	451,80
I	-9	-9	831,37	146,51	56,25	202,76	1034,13
	-50	-9	610,52	43,89	103,95	147,84	758,36
	-50	-50	261,31	12,51	25,76	38,26	299,58
M	-9	-9	1027,48	115,51	128,91	244,42	1271,89
	-9	-50	676,15	63,66	71,64	135,29	811,44
	-50	-9	620,07	107,46	94,60	202,06	822,13
	-50	-50	296,29	47,71	10,09	32,30	328,59
CÁLCIO							
S	-9	-9	135,97	19,46	51,66	71,12	207,09
	-50	-9	91,15	14,10	38,61	52,70	143,86
	-50	-50	41,54	7,92	13,51	21,43	62,97
I	-9	-9	117,67	42,54	20,52	63,06	180,74
	-50	-9	83,63	15,00	33,67	48,67	132,30
	-50	-50	33,02	4,54	5,80	10,34	43,36
M	-9	-9	151,08	28,41	35,60	64,01	215,09
	-9	-50	88,42	16,04	24,84	40,88	129,30
	-50	-9	82,30	15,22	17,46	32,68	114,98
	-50	-50	38,34	7,62	3,63	13,79	48,69

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado. ^{2/} E e D: potencial de trabalho na unidade da esquerda e da direita, respectivamente.

Quadro 9A. (Continuação)

P ^{1/}	ψ ^{2/}		PA	RE	RD	CR	Planta
	E	D					
MAGNÉSIO							
	—kPa—		mg/VG	—mg/C—		mg/VG	mg/VG
S	-9	-9	114,84	10,58	29,74	40,32	157,34
	-50	-9	66,23	8,69	23,34	32,02	101,42
	-50	-50	30,48	4,65	8,14	12,79	43,50
I	-9	-9	82,52	29,39	15,49	44,87	130,78
	-50	-9	40,02	10,53	22,43	32,96	85,36
	-50	-50	14,25	3,27	3,54	6,81	25,87
M	-9	-9	114,66	23,35	23,79	47,13	159,59
	-9	-50	46,06	9,75	17,35	27,10	98,92
	-50	-9	43,45	9,29	11,54	20,84	75,18
	-50	-50	21,59	4,61	10,58	8,62	29,63
ENXOFRE							
S	-9	-9	109,16	150,06	304,37	454,44	563,60
	-50	-9	95,38	79,48	190,52	270,00	365,38
	-50	-50	48,70	26,47	106,69	133,16	181,86
I	-9	-9	81,66	336,06	213,20	549,26	630,91
	-50	-9	70,46	70,98	143,09	214,07	284,54
	-50	-50	26,01	40,43	42,32	82,75	108,76
M	-9	-9	152,70	214,62	150,11	364,73	517,43
	-9	-50	74,00	67,99	170,36	238,36	312,35
	-50	-9	66,78	115,27	166,02	281,29	348,07
	-50	-50	31,85	70,18	43,47	137,05	134,64
MANGANÊS							
			mg/VG	—mg/C—		mg/VG	mg/VG
S	-9	-9	3,63	0,23	0,62	0,85	4,48
	-50	-9	2,44	0,22	0,41	0,63	3,06
	-50	-50	1,46	0,12	0,21	0,34	1,80
I	-9	-9	3,12	0,50	0,23	0,72	3,84
	-50	-9	2,25	0,23	0,43	0,66	2,90
	-50	-50	1,00	0,06	0,09	0,15	1,15
M	-9	-9	3,75	0,41	0,41	0,82	4,57
	-9	-50	2,62	0,89	0,38	1,27	3,89
	-50	-9	2,28	0,30	0,32	0,61	2,89
	-50	-50	1,25	0,13	0,03	0,16	1,41

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado. ^{2/} E e D: potencial de trabalho na unidade da esquerda e da direita, respectivamente.

Quadro 9A. (Continuação)

P ^{1/}	$\psi^{2/}$		PA	RE	RD	CR	Planta
	E	D					
ZINCO							
	—kPa—		mg/VG	—mg/C—		mg/VG	mg/VG
S	-9	-9	1,71	0,64	0,73	1,37	3,08
	-50	-9	1,22	0,25	0,85	1,10	2,32
	-50	-50	0,71	0,23	0,96	1,19	1,90
I	-9	-9	1,45	0,63	0,25	0,88	2,34
	-50	-9	1,06	0,30	0,47	0,77	1,83
	-50	-50	0,56	0,12	0,34	0,45	1,02
M	-9	-9	1,75	1,34	0,49	1,83	3,58
	-9	-50	1,03	0,27	0,43	0,70	1,73
	-50	-9	1,30	0,45	1,65	2,09	3,40
	-50	-50	0,54	0,35	0,15	0,50	1,04
COBRE							
S	-9	-9	0,29	0,05	0,13	0,18	0,47
	-50	-9	0,20	0,04	0,08	0,12	0,33
	-50	-50	0,09	0,02	0,04	0,06	0,16
I	-9	-9	0,23	0,09	0,05	0,14	0,37
	-50	-9	0,16	0,04	0,07	0,11	0,27
	-50	-50	0,06	0,02	0,02	0,04	0,10
M	-9	-9	0,31	0,07	0,09	0,16	0,47
	-9	-50	0,18	0,06	0,08	0,13	0,31
	-50	-9	0,17	0,06	0,07	0,12	0,30
	-50	-50	0,08	0,03	0,01	0,03	0,11

^{1/} S: localização de P na metade superior do vaso geminado; I: localização de P na metade inferior do vaso geminado; M: mista, localização de P na metade superior da unidade da esquerda e na metade inferior da unidade da direita do vaso geminado. ^{2/} E e D: potencial de trabalho na unidade da esquerda e da direita, respectivamente.

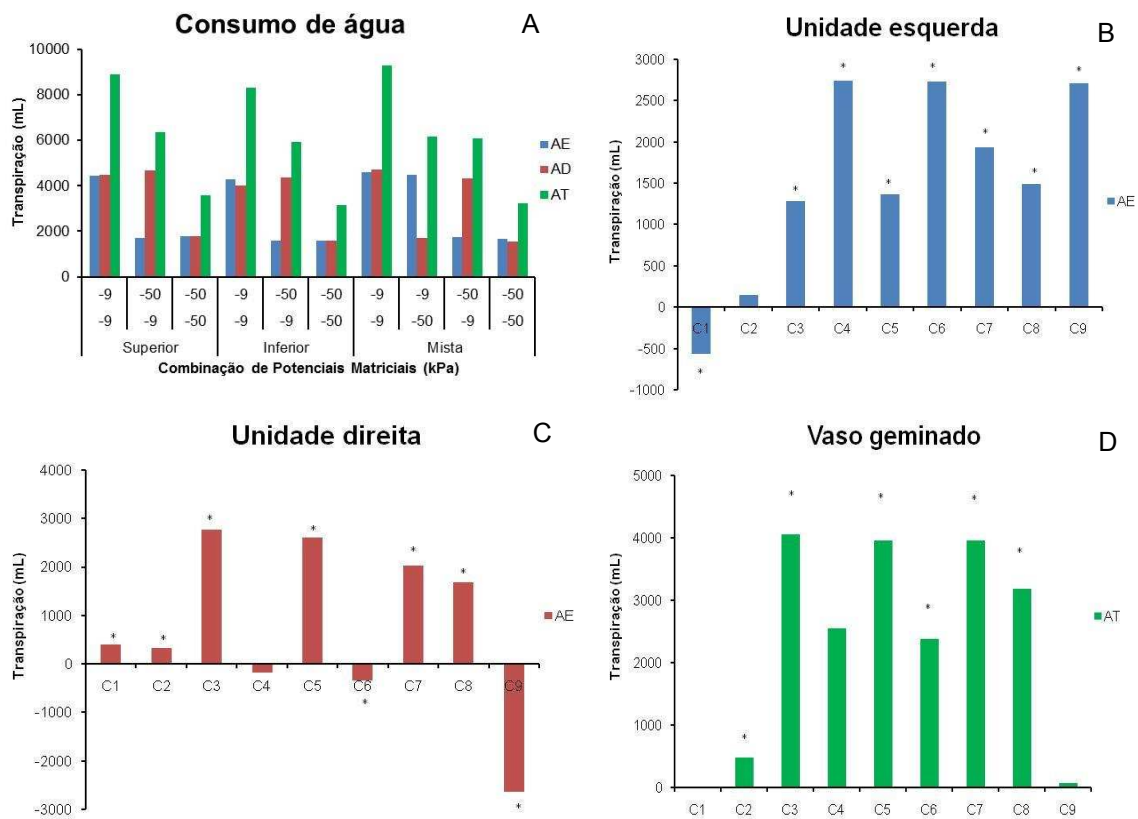


Figura 1A. Consumo de água na unidade esquerda (AE), na unidade direita (AD), no vaso geminado (AT) (A); contrastes médios para consumo de água na unidade esquerda (B); na unidade direita (C); no vaso geminado (D); produção de matéria seca (E) e área foliar (F), considerando C1: (PS + PI) vs. PM; C2: PS vs. PI; C3: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PS; C4: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PS; C5: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PI; C6: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PI; C7: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PM; C8: $\Psi(-9/-9)$ vs. $(\Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9))$ d/PM; C9: $\Psi(-9/-50)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PM.

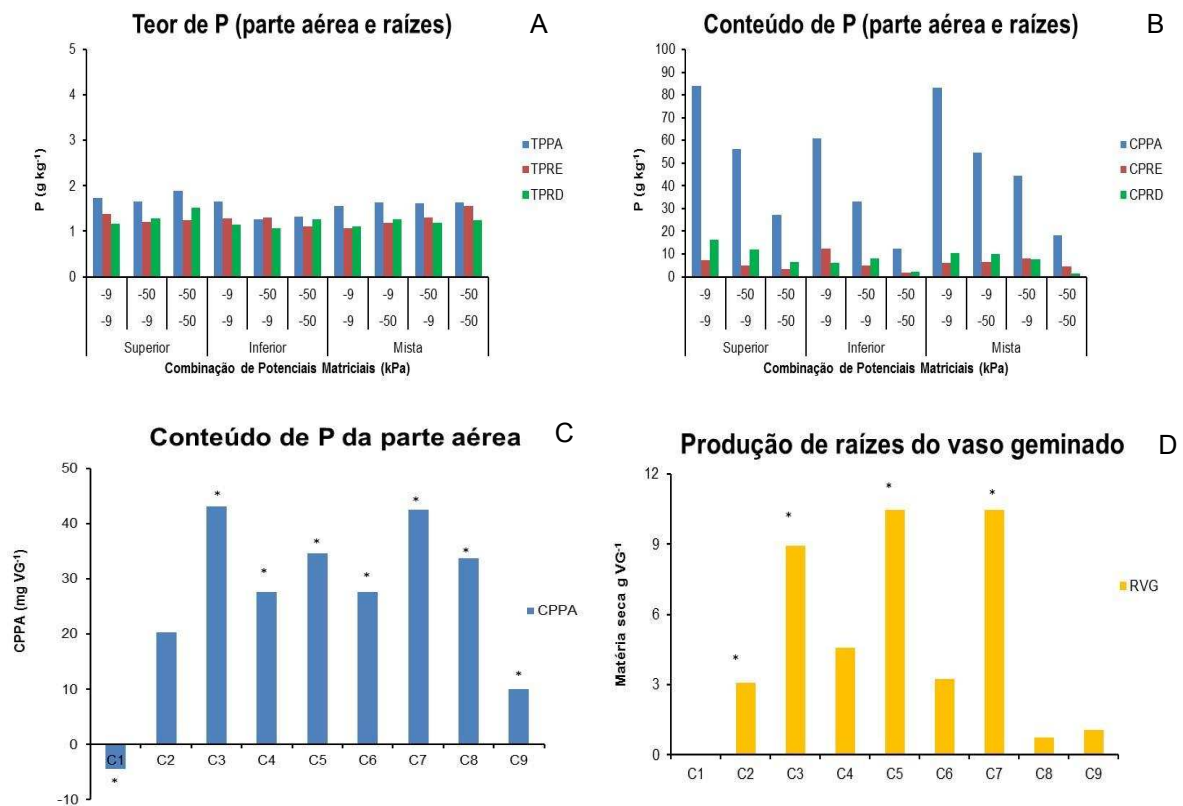


Figura 2A. Teor de P da parte aérea (TPPA), das raízes da esquerda (TPRE) e das raízes da direita (TPRD) (A); conteúdo de P da parte aérea (CPPA), das raízes da unidade esquerda (CPRE) e das raízes da unidade direita (CPRD) (B), contrastes médios para conteúdo de P da parte aérea (C); contrastes médios para matéria seca das raízes do vaso geminado (D); considerando C1: (PS + PI) vs. PM; C2: PS vs. PI; C3: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PS; C4: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PS; C5: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PI; C6: $\Psi(-9/-9)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PI; C7: $\Psi(-9/-9) + \Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9)$ vs. $\Psi(-50/-50)$ d/PM; C8: $\Psi(-9/-9)$ vs. $(\Psi(-9/-50) + \Psi(-50/-9))$ d/PM; C9: $\Psi(-9/-50)$ vs. $\Psi(-50/-9)$ d/PM.

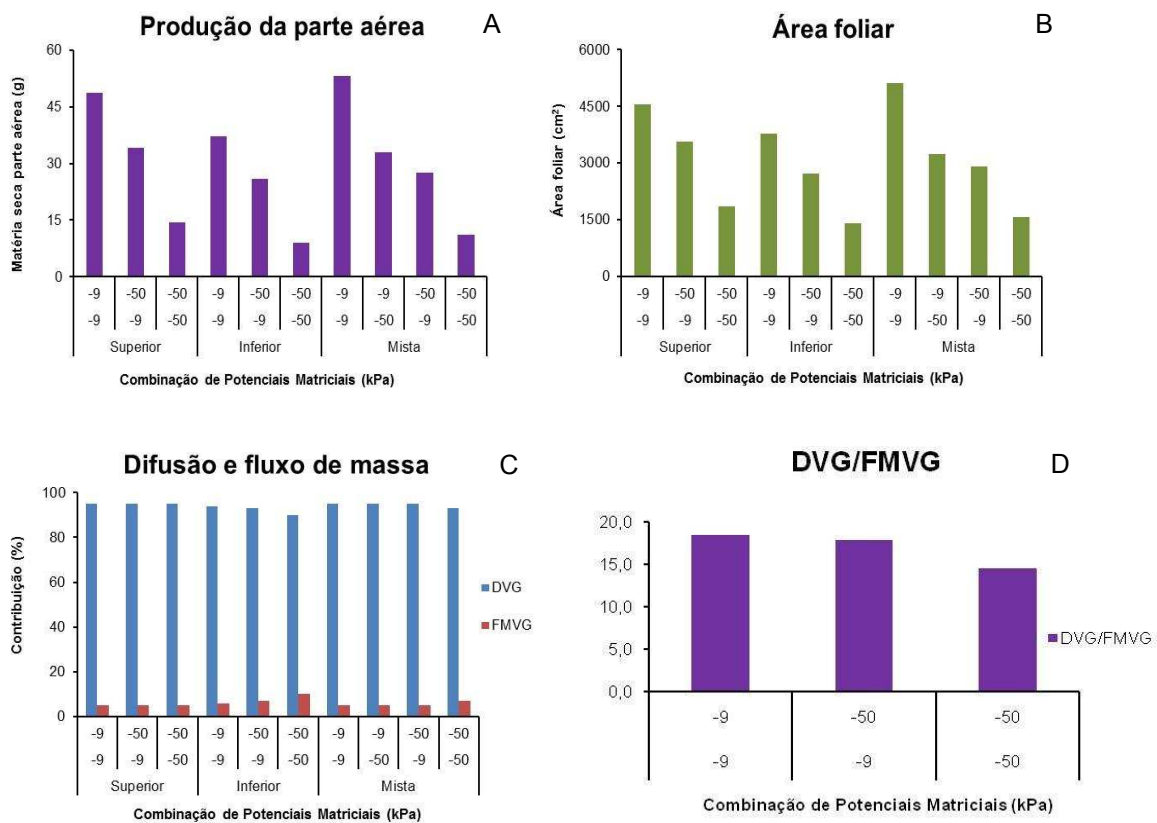


Figura 3A. Produção de matéria seca da parte aérea (A); área foliar (B); contribuição percentual da difusão e do fluxo de massa de P (C) e relação entre difusão de P no vaso geminado (DVG) e fluxo de massa de P no vaso geminado (FMVG) (D).