

MARCO HUGO RUIZ-ERASO

**CRESCIMENTO E ACÚMULO DE FÓSFORO EM SORGO EM
RESPOSTA À LOCALIZAÇÃO DE FOSFATO, AO POTENCIAL DA
ÁGUA DO SOLO E À FREQUÊNCIA DE IRRIGAÇÃO**

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
2009

T

R934c
2009

Ruiz-Eraso, Marco Hugo, 1960-

Crescimento e acúmulo de fósforo em sorgo em resposta à localização de fosfato, ao potencial da água do solo e à frequência de irrigação / Marco Hugo Ruiz-Eraso.

– Viçosa, MG, 2009.

xi, 77f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Hugo Alberto Ruiz.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 63-69.

1. Solos - Potencial matricial. 2. Solos - Teor de fósforo.
3. Sorgo - Irrigação. 4. Fertilidade do solo. 5. Sorgo -
Crescimento. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.422

MARCO HUGO RUIZ-ERASO

**CRESCIMENTO E ACÚMULO DE FÓSFORO EM SORGO EM
RESPOSTA À LOCALIZAÇÃO DE FOSFATO, AO POTENCIAL DA
ÁGUA DO SOLO E À FREQUÊNCIA DE IRRIGAÇÃO**

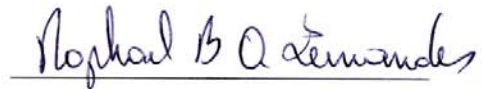
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 18 de dezembro de 2009.



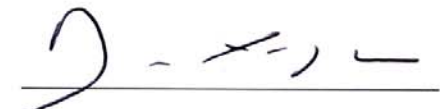
Prof. Víctor Hugo Alvarez V.

(Co-orientador)



Prof. Raphael B. A. Fernandes

(Co-orientador)



Prof. Demetrius D. da Silva



Dr. João Herbert M. Viana



Prof. Hugo Alberto Ruiz

(Orientador)

À minha mãe *Romelia* e ao meu pai *Marco Antonio*,
pelo exemplo de vida.

Especialmente para: *Melissa, Daniela Alejandra,*
Paulin Andréa e Hugo Andrés, por serem minha
motivação.

Aos meus irmãos *Carlos, Franco e Edgar*, pelo
carinho e pelo incentivo.

A *Yenith* pela colaboração e pela motivação.

A *Helia*, pelo carinho e pela força positiva.

A toda a minha família, pelo amor, pelo incentivo e
pela confiança, durante todos esses anos.

A *Sidnéa*, pelo amor, pela paciência e pelos
cuidados.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua infinita bondade e estar sempre presente na minha vida.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Solos e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela formação recebida.

À Universidade de Nariño, na Cidade de Pasto, na Republica de Colômbia, pelo apoio e por manter meu emprego.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro.

Ao professor Hugo Alberto Ruiz, pela orientação, pelos valiosos ensinamentos durante esses anos e pela dedicação a este trabalho.

Ao professor Víctor Hugo Alvarez V., pela participação tão valiosa no trabalho realizado.

Aos professores Júlio César Lima Neves, Nairam Félix de Barros e Raphael B. Alves Fernandes, pela colaboração.

Aos professores Liovando Marciano da Costa e Carlos Ernesto G. R. Schaefer, pela amizade e pelos ensinamentos.

Ao professor Demetrius D. da Silva, pelas valiosas sugestões e pela atenção.

Ao Doutor João Herber M. Viana, pelas valiosas sugestões.

Aos professores do Departamento de Solos, pela atenção recebida e pela participação na minha formação profissional.

Aos estudantes estagiários de Engenharia Agrícola Marina e Rogério e ao estudante de Agronomia Gustavo, pela ajuda na condução do experimento.

A todos os funcionários do Departamento de Solos que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial aos laboratoristas Cláudio, Benedito, Carlos Fonseca, Fabio, Carlinho, Geraldo e Jorge.

A secretaria do Departamento de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Luciana Castro, pela colaboração e atenção sempre dada.

A Julcemir, pela amizade e colaboração recebida na PPG.

A todos os funcionários das diferentes dependências da UFV, onde sempre encontrei ajuda e vontade de colaboração durante meu experimento.

Aos amigos de república Samuel, Fernando, Rondinelli e Cristiano, pela amizade e convivência.

Ao Marcio Mattiello, pela sua valiosa amizade e colaboração na parte pessoal e no experimento.

A todos os colegas de Pós-Graduação, especialmente a Arlicelio, Rogério, Arlindo, Joaquim, André e Igor, pela amizade e pelos momentos.

A todos que, de alguma forma contribuíram para a concretização de mais uma etapa em minha vida, meu sincero agradecimento.

BIOGRAFIA

MARCO HUGO RUIZ ERASO, filho de Marco Antonio Ruiz Ramirez e Romelia Eraso, nasceu na cidade de Pasto, Departamento de Nariño, na Republica de Colômbia.

Em 1981, iniciou o curso de Engenharia Agronômica na Universidade de Nariño, em Pasto, Nariño.

Entre os anos de 1986 e 1996, trabalhou em diferentes plantações de culturas de clima médio e cálido (café, milho, banana, algodão, soja, sorgo, dendê) na Colômbia como engenheiro residente e diretor de plantações.

Em 1996, iniciou os estudos de Mestrado na Universidade Nacional de Colômbia, trabalhando ao mesmo tempo como pesquisador do Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

Em fevereiro de 1999, foi contratado como professor da Faculdade de Ciências Agrícolas da Universidade de Nariño, em Pasto, Departamento de Nariño, Colômbia.

Em agosto de 2005, iniciou os estudos de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Federal de Viçosa, sob a orientação do professor Hugo Alberto Ruiz, submetendo-se à defesa de tese no dia 11 de dezembro de 2009.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Água do solo	3
2.2. Água do solo e transporte de P	6
2.3. Localização de P	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1. Análise do solo após colheita	21
4.2. Consumo de água no ensaio	23
4.3. Crescimento das plantas no ensaio	28
4.4. Área foliar e produção de matéria seca na finalização do ensaio	31

4.5. Produção de matéria seca de raízes nos tratamentos com localização de P	40
4.6. Análise do exsudato xilemático	46
4.7. Conteúdo de P em folhas, colmos e raízes	49
4.8. Conteúdo de P nas raízes dos tratamentos com localização de P.....	59
5. CONCLUSÕES.....	61
LITERATURA CITADA	63
APÊNDICE	70

RESUMO

RUIZ-ERASO, Marco Hugo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2009. **Crescimento e acúmulo de fósforo em sorgo em resposta à localização de fosfato, ao potencial da água do solo e à frequência de irrigação.** Orientador: Hugo Alberto Ruiz. Co-orientadores: Víctor Hugo Alvarez V. e Raphael Bragança Alves Fernandes.

Neste trabalho, objetivou-se avaliar, em casa de vegetação; as características fitotécnicas, as características da seiva xilemática e o acúmulo de P em tecidos de sorgo em resposta à localização de P, ao potencial da água do solo e à frequência de irrigação, utilizando sistema de dois vasos geminados com partição do sistema radicular, em dois Latossolos de Minas Gerais (Três Marias, de textura média, e Viçosa, de textura muito argilosa). Os tratamentos corresponderam a um arranjo fatorial (2 x 2 x 3 x 2), sendo dois solos, duas formas de aplicação de P (localizado e uniformemente distribuído), três potenciais matriciais (-15, -30 e -50 kPa) e duas frequências de irrigação (24/24: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 h e 24/120: um vaso irrigado a cada 24 h e o outro irrigado a cada 120 h). Utilizou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com três repetições. Aos 43 dias

após o transplante, o sorgo foi colhido, encerrando o ensaio. Na comparação entre os solos, a amostra retirada em Três Marias permitiu crescimento maior das plantas de sorgo que a amostra retirada em Viçosa. Constatou-se, assim, que o Latossolo Vermelho distrófico de textura média, com níveis adequados de água e nutrientes, possibilita maior crescimento de plantas que o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura muito argilosa em condições equivalentes, nutricionais e hídricas. Nas características avaliadas, a localização de P em menores volumes de solo mostrou maior eficiência nutricional que a distribuição uniforme no volume da unidade experimental. Confirma-se que essa é alternativa apropriada de fertilização fosfatada em solos com baixos teores de P e elevada capacidade de adsorção do nutriente. A resposta aos potenciais estudados foi maior no solo de textura média. Nestes solos, com menor retenção de água a elevados potenciais, as diferenças na condutividade hidráulica em meio não saturado são maiores, motivando oscilações mais acentuadas no fornecimento de água e transporte de nutrientes às plantas. No tratamento com maior disponibilidade de água, -15 kPa, praticamente não houve resposta à frequência de irrigação. Isso indica que solos com adequado fornecimento de água às plantas podem ser irrigados alternadamente, sem prejudicar o crescimento das plantas de sorgo. O manejo da irrigação foi de importância no tratamento intermediário, de -30 kPa. Nestas condições, de restrição eventual de água, o fornecimento frequente é de importância para manter o crescimento de plantas em níveis adequados. No tratamento com maior restrição de água, -50 kPa, a frequência de irrigação foi de pouca importância. Nesse potencial, a restrição de água ao crescimento das plantas foi evidenciada nas duas situações de manejo.

ABSTRACT

RUIZ-ERASO, Marco Hugo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December 2009. **Growth and accumulation of phosphorus in sorghum, in response to phosphate location, soil water potential, and irrigations frequency.** Advisor: Hugo Alberto Ruiz. Co-advisors: Víctor Hugo Alvarez V. and Raphael Bragança Alves Fernandes.

This study aimed to evaluate, under greenhouse conditions, the characteristics of plant growth, the characteristics of the xylem sap and the P accumulation in tissues of sorghum in response to the location of P, the potential of soil water and the frequency of irrigation system using two vessels with twin root partition in two Oxisols from Minas Gerais, Brazil (Três Marias, medium texture, and Viçosa, clayey soil). The treatments consisted of a factorial arrangement (2 x 2 x 3 x 2), on which there were two soils, two forms of P application (located and uniformly distributed), three matric potentials (-15, -30 and -50 kPa) and two frequencies of irrigation (24/24: two vessels of the experimental unit were irrigated every 24 hours, and 24/120: a pot that was irrigated every 24 hours, and the other was irrigated every 120 hours). We used a randomized block design with three replications. At 43 days after

transplantation, the sorghum was harvested, ending the test. When comparing the soils, the sample taken in Três Marias allowed greater growth of sorghum plants than the sample taken in Viçosa. It was noted that the Oxisol of medium texture, with adequate water and nutrients levels, enables greater growth of plants than the dystrophic Oxisol with clayey texture, under equivalent conditions, nutrition and water. In the evaluated characteristics, the location of P in smaller volumes of soil showed greater nutritional efficiency than the uniform distribution in the volume of the experimental unit. It is confirmed that this is a suitable alternative of phosphate fertilization in soils with low P content, and high capacity of nutrient adsorption. The response, to the potentials which were studied, was higher in soil of medium texture. In these soils, which have less water retention at high potentials, the differences in hydraulic conductivity in non-saturated mean are higher, encouraging wider oscillations in water supply, and transport of nutrients to the plants. In treatment with greater availability of water, -15 kPa, there was practically no response to the frequency of irrigation. This indicates that soils with adequate water supply to plants may be irrigated alternately, without harming the growth of sorghum plants. The irrigation management was important to the intermediary treatment of -30 kPa. At higher water restriction treatment, -50 kPa, the frequency of irrigation was of little importance. In this potential, the restriction of water for plant growth was brought forward in the two management situations.

1. INTRODUÇÃO

A produção de alimentos e fibras nos sistemas produtivos extensivos e intensivos exige um conhecimento adequado do manejo das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, a fim de fazer o uso adequado do sistema solo-planta nas explorações agropecuárias.

Nas plantas, as raízes são os órgãos de maior importância na absorção de água e nutrientes. Elas criam um ambiente único no solo, no qual se processam, de forma dinâmica, numerosas reações químicas, físico-químicas e biológicas.

Para que um nutriente seja absorvido, é necessário seu transporte até as raízes, pelos mecanismos de fluxo de massa, e, de forma complementar, para alguns elementos essenciais, de difusão. A absorção de água e nutrientes, assim como o transporte na planta, responde à disponibilidade de água no solo. O suprimento adequado de água garante o equilíbrio dinâmico no sistema solo-água-planta-atmosfera.

Geralmente, em campo, o suprimento de água pelo solo sofre eventuais restrições. Assim, a transpiração da planta é limitada pela falta de água, afetando o transporte por fluxo de massa. Como o transporte por difusão responde à extensão do sistema radicular, esse mecanismo também é limitado.

O fornecimento adequado de água a uma porção do sistema radicular, dependendo do potencial da água do solo, permitiria, eventualmente, nutrição apropriada às exigências da planta.

Em acréscimo à disponibilidade de água, o fornecimento de nutrientes é determinado pela disponibilidade no solo, que depende da interação dos fatores quantidade, intensidade e capacidade-tampão. Solos característicos de regiões tropicais e úmidas apresentam geralmente disponibilidade reduzida de alguns nutrientes, com ênfase no P. Em acréscimo ao reduzido teor em decorrência do intemperismo, a presença de óxidos de ferro e alumínio resulta em alta capacidade de adsorção de P, transformando este nutriente em limitante para o crescimento das plantas.

Objetivou-se neste trabalho avaliar, em casa de vegetação, o crescimento e acúmulo de fósforo em sorgo e características da seiva xilemática em resposta à localização de fosfato, ao potencial da água do solo e à frequência de irrigação, utilizando sistema de dois vasos geminados com partição do sistema radicular, em dois Latossolos de Minas Gerais: um de textura média e outro muito argiloso.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Água do solo

A disponibilidade de água nos Latossolos oxidicos microestruturados é normalmente baixa, originada pelas características estruturais desses solos, como a presença de estruturas microgranulares típicas, que produzem uma desuniformidade na distribuição do tamanho de poros no perfil do solo, apresentando predominância de poros grandes e pequenos em detrimento dos poros médios (Ruiz & Carvalho, 1998).

A determinação da água necessária para irrigação é importante no planejamento e manejo dos sistemas produtivos, por ser componente fundamental no rendimento das culturas. Lâminas de água superestimadas levam à perda de nutrientes por lixiviação e danos ambientais. Por sua vez, lâminas subdimensionadas provocam queda na produtividade.

É necessário o estudo quantitativo da água do solo para se estimar a disponibilidade para as plantas. Também é importante o conhecimento das propriedades hidráulicas do solo para entender o processo dinâmico dos movimentos de água e de solutos no solo (Bernardo et al., 2006).

O movimento de água no solo inclui a taxa de infiltração, a condutividade hidráulica, o conteúdo e o potencial da água no solo (Jury et al., 1991; Reynolds & Elrick, 1991). A relação entre o conteúdo de água, e a energia de retenção é representada, geralmente, pela curva de retenção da água no solo. Por ser o solo um corpo tridimensional e heterogêneo, a condutividade e o movimento da água dependem da variabilidade espacial do solo e da posição no relevo. Em condições de campo, é possível considerar o fluxo de água como um fenômeno de equilíbrio dinâmico. Com a diminuição do conteúdo de água, seu deslocamento é mais tortuoso, produzindo retenção de água em pequenos poros, os quais retêm água em menores potenciais (maiores tensões) (Jury et al., 1991).

A retenção de água do solo, em elevados potenciais (baixas tensões), depende da geometria do sistema poroso. Assim, é influenciada diretamente pela estrutura do solo e relacionada ao tamanho e arranjo das partículas minerais e orgânicas. Alterações nessas características produzem mudanças na retenção de água do solo nas proximidades do conteúdo de água correspondente à capacidade de campo (Maclean & Yager, 1972; Reeve et al., 1973; Shetron, 1974; Jury et al., 1991; Ruiz & Carvalho, 1998).

A determinação do momento da irrigação pode ser feita por métodos que estabeleçam valores-limite para variáveis de solo ou da planta (Hoffman et al., 1990; Steele et al., 1997). O solo constitui reservatório que recebe periodicamente reposição da água retirada, principalmente, pelas culturas. Estabelecendo um valor-limite inferior para a disponibilidade de água, Ritchie (1981) mostra que, embora bastante criticado, o conceito de água disponível, determinado pela diferença entre o conteúdo de água na capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, continua sendo muito utilizado nesse contexto. Nesse caso, não é utilizado o intervalo integral de água disponível, mas o segmento próximo à capacidade de campo. Doorenbos & Pruitt (1977)

propuseram para projetos de irrigação determinar quantitativamente a disponibilidade porcentual (p) de água do solo que potencialmente poderia ser utilizada pela planta, descontada da disponibilidade total de água no solo. O cálculo desse fator p, para projetos de irrigação, é baseado na necessidade da cultura e na evapotranspiração no local (Denmead & Shaw, 1962). A proposta é útil para definir o momento de irrigar, com base no monitoramento da umidade do solo (Steele et al. 1997).

Dos vários métodos para definir o momento de irrigar (Kramer & Boyer, 1995), o controle do potencial da água no solo encontra-se entre os mais utilizados (Taylor, 1965; Campbell, 1988; Hendrickx & Wierenga, 1990). Na medição indireta da água do solo *in situ*, os tensiômetros são instrumentos adequados e extensamente utilizados na mensuração do potencial da água do solo, permitindo trabalhar de 0 até aproximadamente -80 kPa (Taylor, 1965; Campbell, 1988; Hendrickx & Wierenga, 1990; Kramer & Boyer, 1995).

A relação entre o rendimento de uma cultura e o suprimento de água pode ser determinada quantificando-se a necessidade da cultura, a resposta ao déficit hídrico, a produtividade máxima e a produtividade real (Doorenbos & Kassan, 1994). Esses autores acrescentam que o déficit hídrico afeta a produtividade de forma diferenciada, variando de acordo com a espécie vegetal e o estado fisiológico das plantas. Nesse sentido, Martin & Valero (1993) afirmam que, quando a irrigação é limitante, o rendimento da cultura está condicionado ao suprimento das necessidades hídricas durante todo o seu ciclo fisiológico. Embora a água seja fator fundamental na produção agrícola, outros fatores ligados ao clima e ao solo são fundamentais, entre os quais destaca-se a adubação, que permite complementar o adequado fornecimento de nutrientes às plantas.

Begg & Turner (1976) associam a eficiência do uso da água à razão entre a produção e a evapotranspiração da cultura. Hillel (1972) define a eficiência, numa forma mais abrangente, como a razão entre a produção da cultura e o volume total de água aplicado durante o ciclo do cultivo. Os

processos fisiológicos da planta são alterados com a redução da disponibilidade de água, afetando os componentes de crescimento (Paez et al., 1995). Assim, a diminuição no fornecimento de água reduz a divisão e o alongamento das células, gerando plantas menores e redução de área foliar (Jones, 1992; Taiz & Zeiger, 2002). Da mesma forma, Griffin et al. (1989) e Procópio et al. (2002) afirmam que a água é recurso fisiológico essencial ao crescimento e à produção das culturas e, também, fator fundamental no transporte de nutrientes no solo.

2.2. Água do solo e transporte de P

Água e nutrientes são componentes fundamentais que definem, em grande parte, a produtividade das culturas. Como o homem tem a possibilidade de manejar, ao menos parcialmente, esses recursos, a disponibilidade e o transporte de nutrientes podem ser modificados pela ação antrópica. A água participa da maioria dos processos nutricionais da planta, fazendo parte de numerosas reações químicas. Uma redução do volume de água absorvida compromete esses processos fisiológicos, afetando os componentes de crescimento (Páez et al., 1995).

Assim, pode-se afirmar que a água é fator essencial no desenvolvimento da cultura e determinante na produção e no transporte de nutrientes no solo (Griffin et al., 1989; Procópio et al., 2002). O crescimento das plantas é a consequência dos processos de divisão e alongação celular (Jones, 1992). Taiz & Zeiger (2002) afirmam que a alongação da planta é direcionada pelo potencial hídrico foliar, particularmente pelo componente da pressão de turgência.

Existem duas formas de transporte de nutrientes até a superfície das raízes: o fluxo de massa, gerado pela transpiração como resposta à ação da diferença de potencial hídrico no solo e na planta; 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 mecanismo complementar,

quando a quantidade dos nutrientes transportados por fluxo de massa é insuficiente para o normal crescimento e desenvolvimento do vegetal.

O P é um dos nutrientes que se deslocam fundamentalmente por difusão (Olsen & Kemper, 1968; Barber, 1974; Nye & Tinker, 1977). Alterações em algumas propriedades ou condições específicas do solo refletirão sobre o coeficiente de difusão de P, com destaque para o conteúdo de água, a interação do P com os componentes da fase sólida e a concentração do nutriente na solução do solo (Wild, 1981; Ruiz et al., 1988b).

Segundo Rosolem et al. (1994), os principais fatores que afetam a absorção de P pelas plantas são a taxa de crescimento radicular, a concentração de P na solução do solo e o raio médio das raízes, como indicativo da superfície radicular. Previamente, Taylor & Arkin (1981) afirmam que o padrão de enraizamento responde ao controle genético; contudo, o crescimento das raízes pode ser modificado pelas características químicas e físicas do solo. A influência direta desses fatores sobre as características fisiológicas das plantas tem reflexo na produção final da cultura.

A difusão pode ser quantificada por meio da equação (Wild, 1981):

$$D_S = D_1 f_1 \theta_1 \frac{dC_1}{dC} + D_S^0$$

em que:

D_S : coeficiente de difusão de um soluto no solo ($m^2 s^{-1}$);

D_1 : coeficiente de difusão do mesmo soluto numa solução pura ($m^2 s^{-1}$);

f_1 : fator de impedância que depende da tortuosidade, viscosidade, etc. ($m m^{-1}$);

θ_1 : conteúdo volumétrico de água no solo ($m^3 m^{-3}$);

dC_1/dC : valor inverso de capacidade-tampão ($kg m^{-3}$) ($kg m^{-3}$)⁻¹; e

D_S^0 : difusão junto à superfície do sólido ($m^2 s^{-1}$).

Na equação, observa-se que qualquer modificação de uma ou mais variáveis terá sua influência sobre a difusão de P no solo. Assim, essa difusão será regulada por diversos fatores, com destaque para o teor de água do solo, a interação do P com as partículas da fase sólida e a distância a percorrer até atingir as raízes.

Ruiz et al. (1988b), em estudo com três potenciais matriciais de água do 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 na umidade do solo que nas doses de P, sendo esse efeito mais crítico no solo mais arenoso incluído no ensaio. Nesse experimento, o P foi sempre uniformemente distribuído no vaso com amostra de solo, mantendo-se a solução nutritiva sem acréscimo desse nutriente, concluindo-se que a incorporação de doses relativamente menores de P com manejo adequado de água apresentaria efeito positivo mais acentuado que o decorrente da incorporação de grandes doses de P, com restrição de água.

A transpiração da planta é um processo fisiológico originado pela transpiração de água na superfície das folhas e leva à diminuição do conteúdo de água no solo. Ela responde a um gradiente de potencial hídrico que provoca o fluxo no sistema solo-água-raízes-tecidos vasculares-folhas-atmosfera (Epstein, 1975). No estudo desse processo de movimentação de água e nutrientes para a planta, a técnica usual é a avaliação da taxa de liberação do exsudato xilemático e a sua composição nutricional.

Quando é feito um corte na base do colmo da planta para colheita da seiva xilemática, o exsudato flui em resposta à pressão radicular (Taiz & Zeiger, 2002). Epstein (1975) mostra que a movimentação do exsudato através da incisão pode ser explicada pela absorção ativa de sais nas raízes que são transferidas para o xilema. Como resultado dessa situação aparece 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 aí uma pressão hidrostática, que é a pressão radicular (pressão positiva no xilema). Ao contrário, quando a planta transpira, gera-se uma pressão negativa no xilema e o movimento de água devido à pressão radicular é passivo e paralelo ao gradiente osmótico instalado por meio de transporte ativo de íons. A análise da seiva xilemática fornece informação sobre o processo de translocação de nutrientes, evidenciando-se como uma das determinações mais representativas da realidade nutricional da planta (Vale et al., 1984).

Ruiz et. al. (1988a) determinaram o volume e conteúdo de P na seiva xilemática de soja. Esses autores verificaram que a disponibilidade da água no solo é fator marcante e diferencial no volume final do exsudato da planta, constatando diminuição no volume de até 30 vezes no exsudato recolhido a -40 kPa, quando comparado com o volume coletado a -10 kPa. Houve aumento acentuado no conteúdo de P nos tecidos vegetais em resposta à disponibilidade do nutriente nos tratamentos com adequado fornecimento de água (-10 kPa). Esse incremento foi mínimo nos tratamentos com menor disponibilidade de água.

Por sua vez, Oliveira (2006), em trabalho em casa de vegetação utilizando agregados de diferentes tamanhos, observou que o volume de exsudato xilemático colhido de plantas de milho aumentou com a diminuição do tamanho dos agregados e com o aumento da disponibilidade de água do solo. O conteúdo de nutrientes, entre eles o P, acompanhou essa tendência.

2.3. Localização de P

Os Latossolos, devido ao seu elevado grau de intemperismo, apresentam baixa fertilidade natural, elevada acidez, alta capacidade de adsorção de fosfatos e baixa capacidade de troca catiônica. Nesses solos, as limitações nutricionais estão associadas tanto à própria escassez de nutrientes quanto às restrições no transporte dos nutrientes na solução do solo até as raízes das plantas (Carvalho, 1998).

A aplicação superficial de fertilizantes leva a indagações em torno do aproveitamento, por parte da planta, dos nutrientes adicionados. Esse questionamento é da maior importância no uso de adubos fosfatados, dada a baixa mobilidade do P no solo (Alvarez V. & Fonseca, 1990).

Uma possível solução para esse problema seria a aplicação de elevadas doses de P no solo, aumentando as reservas internas do nutriente, que poderiam ser utilizadas posteriormente (Pozza et al., 2002). No entanto, essa medida pode ser meramente paliativa se o teor de P no solo for baixo, pois em solos com elevada capacidade de fixação a transformação de P lábil em P não lábil é apreciável (Novais & Smyth, 1999).

Assim, a localização de fertilizantes fosfatados num volume restrito de solo, buscando a otimização no fornecimento do elemento às culturas, é alternativa destacada em solos com baixos teores de P e alto poder-tampão, como é o caso da maioria dos solos brasileiros.

A aplicação de P localizado tem a vantagem de proteger o elemento, diminuindo as reações de adsorção. Por outra parte, a mesma dose de P incorporada em menor volume incrementará apreciavelmente a disponibilidade nessa região (Leite, 1991). Na zona sem fertilização, manter-se-ão praticamente inalterados os teores originais.

Estudos de fertilização em milho realizados por Anghioni & Barber (1980) e Castilhos & Anghioni (1988) mostraram que o menor volume de solo fertilizado com P é compensado pela maior densidade de raízes nessa área. Esses autores também observaram maior taxa de absorção do nutriente pelas raízes nessa zona fertilizada.

Trabalhos com eucalipto evidenciaram que aplicações da mesma quantidade de P, em volumes decrescentes de solo, estimularam o crescimento da porção radicular em contato com o solo fertilizado, levando ao incremento da área radicular exposta ao P (Neves et al., 1987).

Leite (1991) afirma que, na aplicação de P em forma localizada, deve existir determinada proporção de solo adequada à fração do nutriente

aplicado, de modo a permitir máxima disponibilidade para as plantas, visando atingir máximas produções. Quanto menor a mobilidade do P no solo e maior sua capacidade-tampão, maior a importância da localização do nutriente para assegurar adequado fornecimento às plantas (Noordwijk & Willigen, 1986).

Com a diminuição da mobilidade e o aumento da capacidade-tampão para o nutriente, a localização passa a ser mais importante que a sincronização entre suprimento e demanda do nutriente para a planta. Assim, a localização do P de acordo com o desenvolvimento radicular da planta é fundamental para um maior aproveitamento do nutriente; sendo que a distância da localização de P em relação à planta e a distribuição de P nessa região fertilizada alteram a eficiência dos fertilizantes fosfatados.

O fertilizante fosfatado solúvel, quando aplicado de forma localizada e pouco misturado com o solo, é mais bem aproveitado pela planta devido à menor fixação do P (Malavolta, 1989). Essa alternativa foi constatada em estudos do efeito do P no desenvolvimento radicular realizados por Miranda et al. (1995) e Krolow et al. (2004).

Kaminski & Peruzzo (1997) apresentaram resultados, para a cultura da soja, em que aplicações do fosfato reativo de Arad (FR), na linha de plantio, promoveram maior rendimento de grãos, comparativamente à distribuição do produto a lanço. Esses resultados podem ser atribuídos ao aumento da concentração de P próximo às raízes e também à redução da fixação 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 o solo e não a planta (Anghinoni, 1992; Novais & Smyth, 1999).

No tocante ao cultivo de sorgo utilizado na pesquisa, Santos et al. (2004) afirmam que a expansão do cultivo do sorgo, principalmente em plantios de sucessão a culturas de verão, tem proporcionado forte demanda por cultivares produtivas e com valor agregado para adaptação às condições predominantes nas regiões de plantio. Igualmente, esses

autores dizem que, entre as cultivares em desenvolvimento na Embrapa Milho e Sorgo, foi identificado o híbrido BBR-310 (sigla de origem 0009055 e experimental CMSXS 379), com boa performance em ensaios conduzidos em locais das Regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste. Esse híbrido tem como parentais linhagens com boa resistência às principais doenças, tolerância à toxicidade de Al e características favoráveis de porte, ciclo, potencial de produção de sementes, boa capacidade de combinação e boa tolerância a condições de estresse hídrico em pós-florescimento.

Santos et al. (2004) afirmam que o híbrido BRS-310 tem mostrado alto potencial de rendimento de grãos e adaptabilidade a ambientes desfavoráveis e favoráveis, além de apresentar baixo nível de compostos fenólicos e teor de proteína superior a 10 % no grão e ser bom competidor em relação aos híbridos lançados comercialmente. Segundo esses autores, apresenta tolerância à toxicidade de alumínio do solo, boa capacidade de rebrota, resistência às espécies de nematoides *Meloidogyne incognita* raça 3 e *M. javanica*, constituindo valores agregados importantes para o sistema de plantio em sucessão à soja.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, utilizando amostras de dois Latossolos:

- Latossolo Vermelho distrófico textura média, de Três Marias, MG, amostrado na camada de 0–20 cm. Este solo foi denominado Três Marias.
- Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura muito argilosa, de Viçosa, MG, amostrado na camada de 60–100 cm. Este solo foi denominado Viçosa.

As amostras foram secas ao ar, destorroadas manualmente e passadas por peneira de 4 mm para o ensaio e de 2 mm para a caracterização (Quadro 1).

As unidades experimentais (UE) foram vasos plásticos de base retangular, geminados, constituídos de duas unidades (A e B) de 5,4 dm³ cada. Os tratamentos corresponderam a um arranjo fatorial 2 x 2 x 3 x 2, com dois solos, duas formas de aplicação de P (localizado e uniformemente distribuído), três potenciais matriciais (-15, -30 e -50 kPa)

e duas frequências de irrigação (24/24: os dois vasos da UE irrigados a cada 24 h; e 24/120: o vaso A irrigado a cada 24 h e o vaso B a cada 120 h). Utilizou-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com três repetições.

Amostras de solo foram incubadas com calcário dolomítico (PRNT 98 %), nas doses de 2,40 e 3,70 t h⁻¹ CaCO₃, para Três Marias e Viçosa, respectivamente (Alvarez V. & Ribeiro, 1999). A umidade foi mantida no potencial de -15 kPa.

Quadro 1. Caracterização física e química dos solos em estudo

Característica	Três Marias	Viçosa
Análise textural (kg kg ⁻¹) ^{1/}		
Areia grossa	0,390	0,110
Areia fina	0,320	0,100
Silte	0,030	0,180
Argila	0,260	0,610
Retenção de água (kg kg ⁻¹) ^{2/}		
-15 kPa	0,137	0,363
-30 kPa	0,111	0,309
-50 kPa	0,100	0,288
-1 500 kPa	0,077	0,250
Carbono orgânico (g kg ⁻¹) ^{3/}	8,90	11,89
pH em água (1:2,5) ^{4/}	4,63	4,86
P (mg dm ⁻³) ^{5/}	0,20	0,00
K (mg dm ⁻³) ^{5/}	10,0	10,0
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{6/}	0,15	0,10
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{6/}	0,00	0,00
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) ^{6/}	0,48	0,67
H + Al (cmol _c dm ⁻³) ^{7/}	3,30	5,20
P remanescente (mg L ⁻¹) ^{8/}	27,20	5,10

^{1/} Ruiz, 2005. ^{2/} Richards, 1949. ^{3/} Walkley-Black modificado (Defelipo & Ribeiro, 1997). ^{4/} Vettori, 1969. ^{5/} Extrator Mehlich-1 (Vettori, 1969). ^{6/} Extrator KCl 1 mol L⁻¹ (Vettori, 1969). ^{7/} Extrator acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ pH 7,0 (Vettori, 1969). ^{8/} Alvarez V. et al., 2000.

Passados 30 d da aplicação do calcário, procedeu-se à incubação com P, utilizando-se como fonte $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ nas doses de 200 e 300 mg dm^{-3} de P, para Três Marias e Viçosa, respectivamente. Utilizou-se o critério de solos de baixa e alta capacidade de adsorção de P para definir as doses conforme o exposto por Novais & Smyth (1999), ajustando os valores segundo o valor de P remanescente (Alvarez et al., 1999). No tratamento em que o P foi uniformemente distribuído (PUD), o fosfato foi misturado na totalidade do volume de solo do vaso da EU; e no tratamento com P localizado (PLO), ele foi misturado com 20 % do volume do solo correspondente a cada vaso. No tratamento PLO, os 20 % que receberam a dose de P foram localizados no limite entre os dois vasos geminados, como apresentado na figura 1.

As amostras foram incubadas por mais 30 d, mantendo-se a umidade correspondente ao potencial de -15 kPa, por meio de pesagem e ajuste do volume de água por cálculos feitos previamente com a curva característica de água do solo.

Decorridos 60 d do tempo da incubação (calcário e P), foram retiradas amostras de 0,2 dm^3 para análise de pH, P, Ca^{2+} e Mg^{2+} (Quadro 2). Restaram 5,2 dm^3 de solo como volume final, para a realização do ensaio.

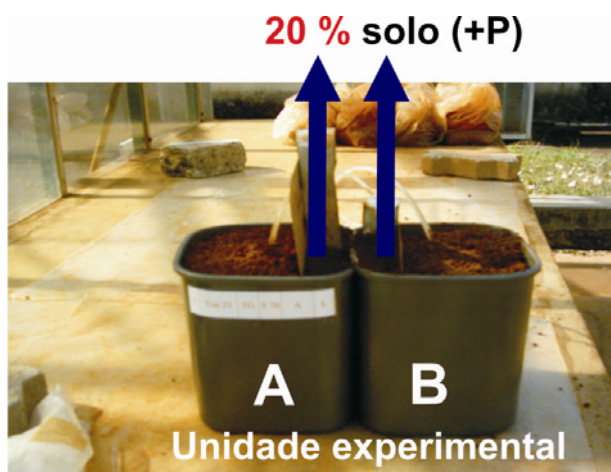


Figura 1. Vasos geminados e indicação do setor com localização de P em 20 % do volume de solo do vaso.

Quadro 2. pH e teores de P disponível e de Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis após incubação, considerando a localização de P nos solos

Característica	Três Marias			Viçosa		
	PLO ^{1/}		PUD ^{2/}	PLO ^{1/}		PUD ^{2/}
	-P	+P		-P	+P	
pH em água (1:2,5)	6,18	6,37	6,29	6,19	6,17	6,21
P (mg dm ⁻³)	2,69	148,38	10,48	1,04	129,59	9,78
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,67	2,71	1,89	2,69	4,51	2,95
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,38	0,39	0,38	0,50	0,55	0,49

^{1/} PLO: P localizado. ^{2/} PUD: P uniformemente distribuído. -P: setor da unidade experimental sem aplicação de P. +P: setor da unidade experimental com aplicação de P.

Utilizou-se sorgo híbrido BRS-310 como planta-teste. Sementes foram germinadas em papel germitest durante 10 d em estufa a 30 °C. Terminado esse período, cortou-se a raiz principal das plântulas a 2 cm do coleto, as quais, em seguida, foram colocadas em solução nutritiva específica para sorgo (Ruiz, 1997), para desenvolvimento de raízes secundárias. Após 21 d, as plantas foram transplantadas aos vasos geminados da UE, com distribuição equilibrada das raízes nos dois vasos, mantendo-se a umidade correspondente ao potencial de -15 kPa, por 15 d. Para o estabelecimento dos tratamentos de -30 e -50 kPa, deixou-se de aplicar água até que eles atingissem o potencial de trabalho. O potencial foi monitorado diariamente, utilizando tensiômetros com coluna de Hg (Ruiz, 1986) em cada vaso da UE. A reposição de água foi de 24/24 ou 24/120 h, conforme o tratamento. Os tensiômetros foram construídos com cápsulas de cerâmica porosas de 6 cm de altura por 2 cm de diâmetro, as quais apresentavam inicialmente um estreitamento no extremo aberto, que foi posteriormente eliminado para manter um diâmetro uniforme ao longo da cápsula. A extremidade aberta foi obturada por uma rolha de borracha

de aproximadamente 8 mm de altura com dois orifícios pequenos, pelos quais passaram tubos de náilon. Esses tubos tinham dois comprimentos um de 200 cm que foi o tubo manométrico; o outro de 50 cm, conectado a um tubo plástico, com diâmetro apropriado, que permitiu nele inserir uma seringa hipodérmica, para escorvar diariamente a cápsula. O sistema foi vedado com uma camada de 5 mm de adesivo epóxi, para evitar a entrada de ar. O tensiometro foi colocado no terço inferior do vaso.

Os tensiometros eram escorvados diariamente, no início da noite. De manhã cedo se procedia-se à leitura das tensões, corrigindo a umidade quando necessário. Em razão do esquema do ensaio, não houve possibilidade de fazer o rodízio dentre dos blocos com os respectivos vasos; por isso os vasos A sempre estiveram colocados pela parte externa da mesa, e os vasos B, pela parte interna da mesa.

Durante a condução do experimento foram feitas três adubações com N, sendo duas com soluções de NH_4NO_3 e a última por aplicação superficial do reagente puro $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ em pó, totalizando 200 mg dm^{-3} de N em cada vaso. Essas soluções foram preparadas de forma a acrescentar 90 e 150 mg dm^{-3} de S para os solos Três Marias e Viçosa, respectivamente. Da mesma maneira, foram feitas adubações com 150 mg dm^{-3} de K, utilizando KCl como fonte. Também foram aplicados micronutrientes após o transplântio em três adubações com B, Zn, Mn, Fe, Cu e Mo. As doses totais foram de 2,0; 6,0; 5,5; 2,33; 2,0; e $0,23 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente utilizando como fonte cloretos ou sulfatos, com exceção do Fe-EDTA. Aos 11 e 25 d da aplicação dos tratamentos, determinou-se o diâmetro do colmo com paquímetro digital.

O ensaio foi encerrado aos 43 d após o transplântio. No corte da parte aérea, 2 cm acima do coleto, separaram-se folhas e colmos, determinando-se a área foliar com equipamento Li-Cor, modelo 3100. Esse material foi levado à estufa de ventilação forçada, seco a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ por 72 h, pesado e moído para posterior análise.

Imediatamente após o corte da parte aérea, colheu-se exsudato xilemático durante 2 h, por contato direto de tubos capilares com a região do corte (Ruiz et al., 1988a). Essa coleta foi realizada entre 6 e 8 h da manhã, colhendo-se cada bloco de 24 tratamentos por dia. Foi feita nessas horas para evitar o período de maior temperatura e radiação solar. A coleta imediatamente após o período noturno permite que o xilema apresente continuidade na condução da seiva, evidenciando a pressão radicular na planta em estudo (Epstein, 1975).

O volume foi calculado por pesagem até 0,0001 g, assumindo densidade da solução igual a 1,0000 kg L⁻¹.

Decorridas 48 h do corte da parte, aérea separaram-se as raízes crescidas em cada vaso. No tratamento PLO, coletaram-se separadamente as raízes crescidas no volume de 20 %, em que o P foi aplicado (+P), e as crescidas no volume de 80 %, sem incorporação de P (-P). Esses materiais foram secos, pesados e moídos de forma semelhante à de colmos e folhas. Após separação de raízes, foram retiradas amostras de solo para análise de pH, P, Ca²⁺ e Mg²⁺.

Amostras dos tecidos vegetais foram digeridas com mistura nítrico-perclórica, determinando-se o P por colorimetria, após formação do complexo fosfomolibdico reduzido (Braga & Defelipo, 1974). Determinou-se também a concentração de P no exsudato xilemático, por espectrofotometria de emissão óptica com plasma acoplado por indução (ICP-OES).

Os resultados das determinações foram submetidos à análise de variância; comparando-se os tratamentos aplicados por meio de contrastes (Quadro 3). Da mesma forma, foram utilizados contrastes para comparar as variáveis relacionadas às raízes nos tratamentos PLO (Quadro 4). Esses resultados foram apresentados na forma de contrastes médios (Alvarez V. & Alvarez, 2006). Na comparação entre solos empregou-se a palavra *tendência* para indicar diferenças estatisticamente significativas nos limites entre 5 e 25 %.

Quadro 3. Coeficientes dos contrastes (C) analisados, em cada solo estudado, considerando a distribuição de P na unidade experimental, o potencial da água do solo (ψ) e a frequência de irrigação (F1: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 h; F2: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 e 120 h, respectivamente)

C	P localizado						P uniformemente distribuído					
	$\psi = -15 \text{ kPa}$		$\psi = -30 \text{ kPa}$		$\psi = -50 \text{ kPa}$		$\psi = -15 \text{ kPa}$		$\psi = -30 \text{ kPa}$		$\psi = -50 \text{ kPa}$	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
C1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
C2	-2	-2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
C3	-1	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
C4	0	0	0	0	0	0	-2	-2	1	1	1	1
C5	0	0	0	0	0	0	-1	-1	1	1	0	0
C6	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C7	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
C8	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0
C9	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0
C10	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0
C11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1

C1: P localizado (PLO) vs P uniformemente distribuído (PUD). C2: -15 vs -30 e -50 kPa d/PLO. C3: -15 vs -30 kPa d/PLO. C4: -15 vs -30 e -50 kPa d/PUD. C5: -15 vs -30 kPa d/PUD. C6: F1 vs F2 d/-15 kPa d/PLO. C7: F1 vs F2 d/-30 kPa d/PLO. C8: F1 vs F2 d/-50 kPa d/PLO. C9: F1 vs F2 d/-15 kPa d/PUD.. C10: F1 vs F2 d/-30 kPa d/PUD. C11: F1 vs F2 d/-50 kPa d/PUD.

Quadro 4. Coeficientes dos contrastes (C) analisados nos vasos da unidade experimental com localização de P, em cada solo estudado, considerando o potencial da água do solo (ψ) e a frequência de irrigação (F1: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 h; F2: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 e 120 h, respectivamente)

C	$\psi = -15 \text{ kPa}$		$\psi = -30 \text{ kPa}$		$\psi = -50 \text{ kPa}$	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2
C1	-2	-2	1	1	1	1
C2	-1	-1	1	1	0	0
C3	-1	1	0	0	0	0
C4	0	0	-1	1	0	0
C5	0	0	0	0	-1	1

C1: -15 vs -30 e -50 kPa. C2: -15 vs -30 kPa. C3: F1 vs F2 d/-15 kPa. C4: F1 vs F2 d/-30 kPa. C5: F1 vs F2 d/-50 kPa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise do solo após colheita

No quadro 5 encontram-se resultados das determinações de pH, P disponível e Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis após a separação das raízes, no final do ensaio. Na comparação das características dos solos em amostras quando retirados do campo (Quadro 1) e após a incubação com calcário dolomítico e P (Quadro 2) antes do cultivo, podem-se observar alterações provocadas pelo crescimento das plantas na unidade experimental.

A aplicação do calcário elevou o pH do solo (Quadros 1 e 2), porém o crescimento do sorgo durante o ensaio, com maior absorção de nutrientes catiônicos que aniônicos e consequente liberação maior de H^+ , levou o pH a valores intermediários entre os dois extremos previamente apontados (Quadro 5).

No tratamento PLO, o P mostrou resposta à localização. Os valores determinados no início do ensaio (Quadro 2), quando comparados com os analisados após a colheita (Quadro 5), permitem inferir que a absorção de P nesse tratamento foi proporcionalmente maior no setor que recebeu aplicação do nutriente. Por outro lado, como os dois setores (+P e -P) mantiveram-se em contato, o acréscimo no teor de P na finalização do ensaio no setor

-P é indicativo do transporte entre eles. Esse transporte pode ter sido favorecido pelo crescimento de raízes, que ocuparam solo dos dois setores. No tratamento PUD houve decréscimo no teor de P nas duas determinações, em decorrência da absorção do nutriente pelo sorgo (Quadros 2 e 5).

A aplicação de calcário foi maior na amostra do solo Viçosa, em comparação ao solo Três Marias. Em acréscimo, a fonte de P utilizada foi o $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, incorporado em maior proporção no solo Viçosa. Isso levou alterações no Ca^{2+} trocável nos tratamentos PUD e PLO. No primeiro, os teores de Ca determinados foram intermediários entre os setores -P e +P do PLO (Quadro 2). Após o ensaio, os maiores decréscimos foram anotados no setor +P do PLO, devido à maior absorção de Ca pelas raízes do sorgo nesse setor. Essa afirmativa é coerente com o maior decréscimo do pH em +P (Quadro 5). A disponibilidade de Mg, com valores equivalentes nos tratamentos PUD e PLO, pois sua fonte foi a disponibilidade inicial e o aporte do calcário dolomítico, pouco foi alterada no ensaio (Quadros 2 e 5).

Quadro 5. pH e teores de P disponível e de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis após colheita, considerando a localização de P nos solos em estudo

Característica	Três Marias			Viçosa		
	PLO ^{1/}		PUD ^{2/}	PLO ^{1/}		PUD ^{2/}
	-P	+P		-P	+P	
pH em água (1:2,5)	5,56	5,41	5,53	5,73	5,59	5,66
P (mg dm ⁻³)	3,07	25,39	8,05	2,50	29,26	6,44
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,68	2,19	1,90	2,50	3,26	2,60
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,34	0,37	0,36	0,43	0,48	0,44

^{1/} PLO: P localizado. ^{2/} PUD: P uniformemente distribuído. -P: setor da unidade experimental sem aplicação de P. +P: setor da unidade experimental com aplicação de P.

4.2. Consumo de água no ensaio

O volume de água acrescentado a cada vaso da UE no decorrer do ensaio é mostrado no quadro 6. A média geral nesse quadro permite a comparação entre os dois solos em estudo. Verifica-se diferença entre solos no vaso A, mas não no vaso B e no volume total incorporado. O solo Viçosa, de textura muito argilosa, apresentou maior retenção de água nos potenciais de trabalho (Quadro 1), mostrando, em média, tendência de maior consumo no vaso A (Quadro 6).

A comparação entre os tratamentos aplicados a cada solo, por meio de contrastes, é mostrada no quadro 7. Em se tratando do solo Três Marias, observa-se que a localização de P levou a maior consumo de água, independentemente do vaso analisado, o que indica maior crescimento das plantas de sorgo neste tratamento.

Na comparação entre os potenciais, as plantas crescidas na maior disponibilidade de água (-15 kPa) consumiram volume maior que as crescidas a -30 e -50 kPa, independentemente da localização do P aplicado (C2 até C5, Quadro 7). As diferenças foram mais acentuadas no vaso A (irrigação 24/24 h) que no vaso B (irrigação média entre 24/24 e 24/120 h). O total (vaso A + vaso B) mostra a soma de duas respostas com tendência semelhante.

Respostas diferenciadas apresentam o vaso A e o vaso B quando se compara a frequência de irrigação dentro de cada um dos outros tratamentos, que incluem localização de P (PLO e PUD) e potencial da água do solo (-15, -30 e -50 kPa) (C6 até C11, Quadro 7). O vaso A sempre recebeu reposição diária de água e não mostrou diferenças na comparação de 24/24 h com 24/120 h. No entanto, o volume de água acrescentado ao vaso B, com irrigações a cada 24 h ou 120 h, foi diferente nas maiores disponibilidades de água (-15 e -30 kPa), com maior consumo no tratamento com reposição a cada 24 h. Na comparação para o potencial de -50 kPa, a baixa disponibilidade de água com baixo volume de

Quadro 6. Volume de água acrescentado a cada vaso da unidade experimental no decorrer do ensaio, considerando o solo, a distribuição de P (DP), o potencial da água do solo (ψ) e a frequência de irrigação (FI)

DP ^{1/}	Ψ	FI		Água Acrescentada		
		Vaso A	Vaso B	Vaso A	Vaso B	Total
	kPa	h		mL/vaso		mL/UE
Três Marias						
PLO	-15	24	24	2 533	2 709	5 242
		24	120	2 984	1 430	4 414
	-30	24	24	1 939	2 317	4 256
		24	120	2 150	582	2 732
	-50	24	24	200	1 041	1 241
		24	120	784	435	1 219
PUD	-15	24	24	1 939	1 821	3 760
		24	120	1 979	710	2 689
	-30	24	24	844	1 530	2 375
		24	120	424	595	1 019
	-50	24	24	597	300	897
		24	120	611	440	1 051
	Média Geral ^{2/}			1 415b	1 159a	2 575a
Viçosa						
PLO	-15	24	24	2 145	1 342	3 487
		24	120	2 700	590	3 290
	-30	24	24	2 342	2 266	4 608
		24	120	860	796	1 657
	-50	24	24	1 834	699	2 532
		24	120	953	349	1 302
PUD	-15	24	24	1 752	1 479	3 231
		24	120	1 503	740	2 243
	-30	24	24	1 861	1 512	3 373
		24	120	1 640	917	2 557
	-50	24	24	1 258	931	2 189
		24	120	1 119	710	1 829
	Média Geral ^{2/}			1 664a	1 027a	2 791a

^{1/} PLO: P localizado. PUD: P uniformemente distribuído. ^{2/} Letras minúsculas diferentes na média geral indicam diferenças estatisticamente significativas para solos a 25 % pelo teste F.

Quadro 7. Contrastes médios (C) do volume de água acrescentado a cada vaso da unidade experimental no decorrer do ensaio, considerando os tratamentos aplicados em cada solo

Contraste	Vaso A	Vaso B	Total
	mL/vaso		mL/UE
Três Marias			
C1	-699*	-520*	-122*
C2	-1 490*	-976*	-2 466*
C3	-714#	-620#	-1 334*
C4	-1 340*	-549#	-1 889*
C5	-1 325*	-203	-1 528*
C6	451	-1 280*	-829
C7	211	-1 735*	-1 525#
C8	584	-606	-22
C9	40	-1 111*	-1 071#
C10	-420	-936#	-1 356#
C11	14	140	154
Viçosa			
C1	-283#	41	-242
C2	-925*	62	-864#
C3	-821*	565#	-256
C4	-158	-92	-250
C5	123	105	228
C6	555	-752#	-197
C7	-1 482*	-1 469*	-2 951*
C8	-881#	-350	-123#
C9	-249	-739#	-988#
C10	-221	-594	-815
C11	-139	-221	-360

C1: P localizado (PLO) vs P uniformemente distribuído (PUD). C2: -15 vs -30 e -50 kPa d/PLO. C3: -15 vs -30 kPa d/PLO. C4: -15 vs -30 e -50 kPa d/PUD. C5: -15 vs -30 kPa d/PUD. C6: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PLO. C7: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PLO. C8: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PLO. C9: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PUD. C10: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PUD. C11: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PUD.

#, *: Diferenças estatisticamente significativas a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

reposição permite supor que a retirada de água foi, fundamentalmente, localizada no vaso A. Na comparação entre esses tratamentos para a UE (C6 até C11, Quadro 7) as diferenças mais acentuadas foram observadas no potencial de -30 kPa; isso indicaria que o suprimento de água suficiente (-15 kPa) permitiria maior espaçamento entre irrigações. Por outro lado, menor disponibilidade de água (-50 kPa) deixaria a planta em condições de estresse, sem diferenciação na frequência de irrigação. Tradicionalmente, atribui-se ao potencial de -1.500 kPa a denominação de ponto de murcha permanente. Observando os valores apresentados no quadro 1, verifica-se que a diferença na retenção de água entre -15 e -50 kPa foi sensivelmente maior que a registrada entre -50 e -1.500 kPa. Assim, em solos característicos de regiões tropicais e úmidas, as plantas murchariam em potenciais sensivelmente superiores a -1.500 kPa. Nesse sentido, Sykes (1969) determinou o potencial de retenção da água no solo no PMP, em dois diferentes solos e encontrou valores variando de 700 a -1.100 kPa para girassol, -1.050 a -1.610 kPa para *Nicotiana attenuata*, -1.450 a -2.140 kPa para milho, -3.470 kPa para *Cassia fasciculata* e -2.050 a -3.860 kPa para *Agropyron intermedium*. Esses resultados contrariam o conceito de que a murcha permanente é independente da espécie e não varia com as características do solo. Por sua vez, Reichardt (1988) afirma que em solos característicos das regiões tropicais e úmidas, com predominância de caulinitas e óxidos de ferro e alumínio, a CC aproxima-se mais de potenciais no intervalo de -10 a -6 kPa. Por outro lado, Procópio et al. (2004), no estudo do PMP em casa de vegetação num delineamento experimental de blocos ao acaso, em esquema fatorial 6 x 2, constituído por seis espécies, sendo duas cultivadas: soja (cv. Capinópolis) e feijão (cultivar Pérola) e quatro tipos de plantas daninhas duas da espécie *Euphorbia heterophyll*, uma de *Bidens pilosa* e outra de *Desmodium tortuosum* e duas épocas de indução de estresse hídrico (pré-florescimento e início do enchimento de grãos), determinaram que o potencial hídrico para PMP com indução de estresse hídrico em pré-florescimento foi de -325

e -283 kPa para feijão e soja, respectivamente, sendo dentro da pesquisa valores estatisticamente iguais; também determinaram que *Bidens pilosa*, com -206 kPa, foi a planta que murchou a maior potencial. No caso do estresse no início de enchimento de grãos, os autores constataram que com estatística -252 kPa em feijão e -283 kPa em soja não houve diferença no PMP nesses cultivos, sendo a espécie *Bidens pilosa*, com -983 kPa, a que murchou em menor potencial, mostrando assim que foi a espécie que conseguiu absorver a água mais fortemente retida no solo. Os cultivos de feijão e soja apresentaram PMP iguais estatisticamente, porém afastados dos 1.500 kPa usado para determinar esse ponto usualmente.

No solo Viçosa as diferenças foram menos acentuadas, evidenciando ocasionais significâncias nos contrastes analisados (Quadro 7). O cálculo das relações de retenção de água entre os potenciais -15 e -30 com -50 kPa na caracterização (Quadro 1) mostrou valores de 1,37:1,11:1 para Três Marias e de 1,26:1,07:1 para Viçosa. Por outro lado, a retenção média entre -15 e -50 kPa foi de 0,116 e 0,320 kg kg⁻¹ para Três Marias e Viçosa, respectivamente (Quadro 1), relacionando o valor 0,320 kg kg⁻¹ com a unidade; e o valor de retenção média do solo Três Marias leva a uma relação de 0,36:1 no conteúdo médio de água entre os dois solos. A menor diferenciação no conteúdo entre os três potenciais em estudo e o maior teor de água do solo Viçosa nessas condições justificam a menor diferenciação entre tratamentos neste solo.

4.3. Crescimento das plantas no ensaio

Durante o ensaio, as temperaturas na casa de vegetação tiveram altas flutuações em função da hora do dia; a mais representativa foi a temperatura obtida ao meio-dia: média de 45 °C. O crescimento das plantas durante o ensaio foi acompanhado pela medição do diâmetro dos colmos das plantas de sorgo aos 11 (DC11) e 25 d (DC25) da aplicação dos tratamentos (Quadro 8). Na primeira medida não foi observada diferença estatisticamente significativa para solo (Quadro 9). O curto

período para a primeira determinação não permitiu evidenciar resposta a esse fator de estudo. Já na segunda determinação, com 25 d de aplicação dos tratamentos, o solo Três Marias, de textura média, apresentou diâmetros médios maiores que os do solo Viçosa, muito argiloso.

Resultado semelhante foi publicado por Ruiz et al. (1988b). Esses autores compararam o crescimento de soja em dois Latossolos: um de textura média e outro muito argiloso. Na pesquisa, que incluiu doses de P e diferentes potenciais matriciais, a soja teve maior produção de matéria seca, nas mesmas condições de disponibilidade de P e água, no solo de textura média. Em solos de textura mais grosseira, com adequado suprimento de água e nutrientes, o crescimento de raízes é facilitado, levando a maiores produções do sistema radicular e da parte aérea da planta.

Quando comparado o incremento no diâmetro do colmo, nos dois períodos indicados (DC25–DC11), a tendência anotada na determinação feita a 25 d da aplicação dos tratamentos prevaleceu e o incremento foi maior no solo Três Marias em relação ao solo Viçosa (Quadro 8).

O quadro 9 mostra os valores e a significância dos contrastes médios, que permitem comparar os tratamentos aplicados a cada solo. Observando os contrastes analisados para DC11 no solo Três Marias, verifica-se a rápida resposta à localização de P e aos maiores teores de água nesse solo. Contudo, a frequência de irrigação não manifestou diferenças nesse estágio de crescimento das plantas.

Quando analisados os contrastes do DC11, no solo Viçosa, observa-se que o efeito de localização de P prevaleceu sobre os diferentes potenciais matriciais aplicados (Quadro 9). Isso indica claramente a importância da localização desse nutriente no plantio e, também, a resposta menor ao potencial da água do solo em materiais muito argilosos, com retenção elevada de água nos potenciais normalmente utilizados para definir o intervalo de água disponível às plantas (Quadro 1). Neste solo, com baixa resposta ao potencial matricial, não se deve esperar efeito significativo da frequência de irrigação (Quadro 9).

Quadro 8. Diâmetro do colmo aos 11 e 25 d da aplicação dos tratamentos (DC11 e DC25) e incremento do diâmetro entre as duas determinações, considerando o solo, a distribuição de P (DP) na unidade experimental, o potencial da água do solo (ψ) e a frequência de irrigação (FI)

DP ^{1/}	Ψ	FI ^{2/}	DC11	DC25	DC25 - DC11
	kPa	h	mm/planta		
Três Marias					
PLO	-15	24/24	10,79	15,10	4,31
		24/120	10,73	15,54	4,81
	-30	24/24	10,23	14,77	4,54
		24/120	6,41	11,64	5,23
	-50	24/24	5,40	9,18	3,78
		24/120	5,59	7,31	1,72
PUD	-15	24/24	7,72	11,45	3,73
		24/120	6,06	9,08	3,02
	-30	24/24	5,64	8,94	3,30
		24/120	4,27	5,85	1,58
	-50	24/24	4,49	5,26	0,77
		24/120	5,08	6,49	1,41
Média Geral ^{3/}			6,87a	10,05a	3,18a
Viçosa					
PLO	-15	24/24	7,79	11,22	3,43
		24/120	8,86	11,72	2,87
	-30	24/24	7,55	13,53	5,98
		24/120	7,88	9,21	1,33
	-50	24/24	6,41	12,71	6,30
		24/120	6,31	8,08	1,77
PUD	-15	24/24	6,86	8,07	1,21
		24/120	6,39	7,70	1,31
	-30	24/24	6,33	8,46	2,13
		24/120	5,63	7,54	1,91
	-50	24/24	5,41	6,51	1,10
		24/120	5,84	6,34	0,51
Média Geral ^{3/}			6,77a	9,26b	2,49b

^{1/} PLO: P localizado. PUD: P uniformemente distribuído. ^{2/} 24/24: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 h. 24/120: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 e 120 h, respectivamente. ^{3/} Letras minúsculas diferentes na média geral indicam diferenças estatisticamente significativas para solos a 25 % pelo teste F.

Quadro 9. Contrastes médios (C) do diâmetro do colmo aos 11 e 25 d da aplicação dos tratamentos (DC11 e DC25) e do incremento do diâmetro entre as duas determinações, considerando os tratamentos aplicados nas unidades experimentais de cada solo

Contraste	DC11	DC25	DC25-DC11
mm/planta			
Três Marias			
C1	-2,65*	-4,41*	-1,77*
C2	-3,85*	-4,60*	-0,75
C3	-2,44*	-2,12#	0,33
C4	-2,02*	-3,63*	-1,61#
C5	-1,94*	-2,87*	-0,93
C6	-0,05	0,44	0,50
C7	-3,83*	-3,14#	0,69
C8	0,19	-1,87	-2,06#
C9	-1,66#	-2,37#	-0,71
C10	-1,37	-3,09#	-1,73#
C11	0,59	1,23	0,64
Viçosa			
C1	-1,39*	-3,64*	-2,25*
C2	-1,29#	-0,59	0,70
C3	-0,61	-0,10	0,51
C4	-0,82	-0,67	0,15
C5	-0,65	0,12	0,76
C6	1,06	0,50	-0,56
C7	0,34	-4,32*	-4,65*
C8	-0,10	-4,64*	-4,53*
C9	-0,48	-0,37	0,11
C10	-0,70	-0,92	-0,22
C11	-1,39*	-3,64*	-2,25*

C1: P localizado (PLO) vs P uniformemente distribuído (PUD). C2: -15 vs -30 e -50 kPa d/PLO. C3: -15 vs -30 kPa d/PLO. C4: -15 vs -30 e -50 kPa d/PUD. C5: -15 vs -30 kPa d/PUD. C6: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PLO. C7: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PLO. C8: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PLO. C9: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PUD. C10: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PUD. C11: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PUD.

#, *: Diferenças estatisticamente significativas a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

As análises realizadas para DC25 acompanham, de forma geral, as respostas verificadas para DC11 (Quadro 9). Os contrastes analisados para o incremento (DC25–DC11) destacam novamente a importância da localização de P, com resultados superiores aos do P uniformemente distribuído nos vasos da UE (Quadro 9).

4.4. Área foliar e produção de matéria seca no final do ensaio

No quadro 10 é mostrada a quantificação da área foliar determinada para os diferentes tratamentos aplicados. Na comparação entre solos, novamente o solo de Três Marias apresentou valores superiores, ratificando dados referentes aos valores do diâmetro do colmo no decorrer do ensaio (Quadro 8). Reitera-se assim a constatação de que solos de textura média, com níveis adequados de água e nutrientes, permitem maior crescimento de plantas que solos de textura argilosa em condições equivalentes, nutricionais e hídricas (Ruiz et al., 1988b).

A comparação dos diversos tratamentos para o solo Três Marias (Quadro 11) permite indicar, como esperado, que a área foliar é incrementada com a localização do P e com o maior fornecimento de água.

Quadro 10. Área foliar (AF) e produção de matéria seca de folhas (MSF), colmos (MSC), parte aérea (MSPA) e raízes (MSRA + MSRB = MSR), considerando o solo, a distribuição de P (DP) na unidade experimental, o potencial da água do solo (ψ) e a frequência de irrigação (FI)

DP ^{1/}	Ψ	FI ^{2/}	AF	MSF	MSC	MSPA	MSRA	MSRB	MSR
	kPa	h	cm ² /UE	-----g/UE			-----g/vaso		g/UE
Três Marias									
PLO	-15	24/24	3 236	13,95	8,40	22,35	4,97	2,74	7,71
		24/120	3 204	14,01	8,31	22,32	3,55	2,97	6,52
	-30	24/24	2 981	12,98	7,06	20,04	2,70	4,22	6,91
		24/120	1 450	5,86	3,13	8,98	2,74	0,66	3,40
	-50	24/24	1 580	4,57	2,27	6,84	0,93	0,80	1,73
		24/120	660	2,86	1,52	4,38	0,73	0,84	1,56
PUD	-15	24/24	2 134	7,27	4,45	11,72	4,99	1,85	6,84
		24/120	1 356	7,27	2,85	10,12	2,44	0,59	3,03
	-30	24/24	995	4,31	2,58	6,89	0,86	1,47	2,33
		24/120	272	1,30	0,87	2,17	0,31	1,16	1,47
	-50	24/24	295	1,44	0,97	2,41	0,50	0,38	0,88
		24/120	421	1,85	1,18	3,04	0,79	0,25	1,04
Média Geral ^{3/}			1 549A	6,47a	3,63a	10,11A	2,13a	1,49a	3,62A
Viçosa									
PLO	-15	24/24	2 115	7,88	4,07	11,95	1,54	1,95	3,49
		24/120	2 483	9,07	5,32	14,39	3,05	1,66	4,72
	-30	24/24	2 681	11,37	6,00	17,37	3,05	2,31	5,36
		24/120	1 235	5,02	2,82	7,84	1,38	1,56	2,94
	-50	24/24	1 944	5,51	2,67	8,18	1,93	0,98	2,91
		24/120	1 046	3,50	2,33	5,83	1,64	0,75	2,39
PUD	-15	24/24	688	3,31	2,15	5,46	1,12	1,05	2,17
		24/120	480	2,52	1,99	4,52	1,73	0,47	2,20
	-30	24/24	714	3,36	2,55	5,91	0,85	1,60	2,45
		24/120	492	2,36	1,79	4,15	0,89	0,65	1,53
	-50	24/24	389	1,83	1,46	3,29	0,84	0,70	1,54
		24/120	325	1,78	1,37	3,15	0,70	0,51	1,20
Média Geral ^{3/}			1 216B	4,79B	2,88b	7,67B	1,56b	1,18b	2,74B

^{1/} PLO: P localizado. PUD: P uniformemente distribuído. ^{2/} 24/24: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 h. 24/120: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 e 120 h, respectivamente. ^{3/} Letras minúsculas e maiúsculas diferentes na média geral indicam diferenças estatisticamente significativas para solos a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 11. Contrastes médios (C) da área foliar (AF) e da produção de matéria seca de folhas (MSF), colmos (MSC), parte aérea (MSPA) e raízes (MSR = MSRA + MSRB), considerando os tratamentos aplicados nas unidades experimentais de cada solo

C	AF	MSF	MSC	MSPA	MSRA	MSRB	MSR
	cm ² /UE	g/EU			g/vaso		g/UE
Três Marias							
C1	-1 369*	-5,13*	-2,96*	-8,09*	-0,95*	-1,09*	-2,04*
C2	-1 408*	-7,41*	-4,86*	-12,3*	-2,48*	-1,23*	-3,71*
C3	-1 005*	-4,56*	-3,26*	-7,83*	-1,54#	-0,42	-1,96#
C4	-1 250*	-5,04*	-2,25*	-7,29*	-3,10*	-0,4	-3,50*
C5	-1 112*	-4,46*	-1,93#	-6,39*	-3,13*	0,1	-3,04*
C6	-32	0,06	-0,09	-0,03	-1,42#	0,23	-1,19
C7	-1 531*	-7,12*	-3,93*	-11,1*	0,04	-3,56*	3,52*
C8	-1 498*	-1,71	-0,75	-2,46	-0,21	0,04	-0,17
C9	-778#	0	-1,6	-1,6	-2,55*	-1,26#	-3,81*
C10	-723	-3,01#	-1,71#	-4,72#	-0,55	-0,31	-0,86
C11	126	0,41	0,21	0,62	0,29	-0,13	0,16
Viçosa							
C1	-1 402*	-4,53*	-1,98*	-6,51*	-1,08*	-0,71#	-1,79*
C2	-572#	-2,13#	-1,24#	-3,36#	-0,29	-0,41	-0,7
C3	-341	-0,28	-0,28	-0,56	-0,08	0,13	0,05
C4	-104	-0,59	-0,28	-0,87	-0,6	0,1	-0,5
C5	19	-0,06	0,09	0,04	-0,55	0,36	-0,19
C6	368	1,19	1,25	2,44	1,52#	-0,29	1,23
C7	-1 446*	-6,35*	-3,19*	-9,53*	-1,67#	-0,75	-2,42#
C8	-898#	-2,01	-0,34	-2,35	-0,29	-0,23	-0,52
C9	-207	-0,79	-0,16	-0,95	0,61	-0,58	0,03
C10	-222	-1	-0,76	-1,76	0,03	-0,96	-0,92
C11	-64	-0,05	-0,09	-0,14	-0,14	-0,2	-0,34

C1: P localizado (PLO) vs P uniformemente distribuído (PUD). C2: -15 vs -30 e -50 kPa d/PLO. C3: -15 vs -30 kPa d/PLO. C4: -15 vs -30 e -50 kPa d/PUD. C5: -15 vs -30 kPa d/PUD. C6: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PLO. C7: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PLO. C8: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PLO. C9: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PUD. C10: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PUD. C11: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PUD.

#, *: Diferenças estatisticamente significativas a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

A produção de matéria seca de folhas, colmos e raízes, de modo geral, apresentou valores e respostas coincidentes com as tendências anotadas para área foliar, nos dois solos em estudo, como verificado nos quadros 10 e 11. A diferença mais destacada é a não significância do contraste C8 no solo Três Marias (Quadro 11). Da verificação das significâncias dos contrastes C6 a C8, neste solo, pode concluir-se que, quando a água não é limitante, a irrigação de um setor do sistema radicular permite maior espaçamento da irrigação no setor complementar, sem prejuízo para o crescimento das plantas. O fornecimento intermediário de água exigiria maior frequência de irrigação para permitir crescimento razoável das plantas. Por último, com menor disponibilidade de água, a planta é afetada no seu crescimento, sem resposta à frequência da irrigação aplicada. Por outro lado, nessas determinações, a área foliar mostrou-se mais sensível como característica de crescimento que a produção de matéria seca das plantas de sorgo (Quadro 11).

As características mostradas no quadro 10 permitiram calcular uma série de relações entre as variáveis de crescimento. Assim, determinou-se a área foliar específica (AFE) pelo quociente entre a área foliar e a produção de matéria seca de folhas. Também foram calculadas as relações de produção de matéria seca de folhas/colmos (F/C) e da parte aérea/raízes (PA/R). Nesta última, somaram-se as produções de matéria seca de raízes crescidas nos dois vasos da UE. Finalizando, calcularam-se as densidades de raízes em cada vaso da UE (DRA e DRB). No tratamento PLO a densidade foi ponderada, considerando que as raízes crescidas no setor com o P localizado ocuparam 20 % do volume do vaso, e as restantes, os 80 % complementares. Os resultados dessas relações são apresentados no quadro 12.

Quadro 12. Área foliar específica (AFE), relações entre a produção de matéria seca de folhas e colmos (F/C) e de parte aérea e raízes (PA/R) e densidade de raízes em cada vaso da unidade experimental (DRA e DRB), considerando o solo, a distribuição de P (DP), o potencial da água do solo (ψ) e a frequência de irrigação (FI)

DP ^{1/}	Ψ	FI ^{2/}	AFE	F/C	PA/R	DRA ^{3/}	DRB ^{3/}
	kPa	h	m ² kg ⁻¹	———— kg kg ⁻¹ ————		———— g dm ⁻³ ————	
Três Marias							
PLO	-15	24/24	23,3	1,694	2,861	0,956	0,527
		24/120	22,9	1,681	3,498	0,682	0,571
	-30	24/24	23,0	1,842	2,946	0,518	0,811
		24/120	24,8	1,936	2,945	0,527	0,127
	-50	24/24	25,3	2,013	3,948	0,180	0,153
		24/120	24,2	1,820	2,541	0,140	0,161
PUD	-15	24/24	31,6	1,702	2,065	0,961	0,355
		24/120	21,8	2,261	3,215	0,470	0,113
	-30	24/24	23,2	1,690	2,998	0,165	0,283
		24/120	19,7	1,501	1,836	0,060	0,223
	-50	24/24	14,2	1,608	2,565	0,096	0,074
		24/120	21,9	1,539	2,905	0,152	0,049
Média Geral ^{3/}			23,0a	1,774A	2,860a	0,409a	0,287a
Viçosa							
PLO	-15	24/24	26,4	1,919	3,559	0,296	0,376
		24/120	26,6	1,783	2,928	0,587	0,320
	-30	24/24	24,1	1,996	3,695	0,586	0,445
		24/120	23,4	1,876	2,655	0,265	0,300
	-50	24/24	39,7	2,029	2,756	0,372	0,188
		24/120	23,5	1,425	2,503	0,316	0,143
PUD	-15	24/24	20,9	1,527	2,576	0,215	0,202
		24/120	19,3	1,284	2,104	0,332	0,091
	-30	24/24	20,8	1,320	2,345	0,164	0,308
		24/120	19,7	1,286	2,567	0,171	0,124
	-50	24/24	22,6	1,234	2,021	0,161	0,135
		24/120	18,1	1,339	2,473	0,134	0,097
Média Geral ^{3/}			23,8a	1,585B	2,682a	0,300b	0,227b

^{1/} PLO: P localizado. PUD: P uniformemente distribuído. ^{2/} 24/24: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 h. 24/120: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 e 120 h, respectivamente. ^{3/} Densidades calculadas considerando o volume do vaso, ponderada no tratamento PLO. ^{4/} Letras minúsculas e maiúsculas diferentes na média geral indicam diferenças estatisticamente significativas para solos a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

Na comparação entre solos, o de Três Marias mostrou valores superiores aos de Viçosa na área foliar e em todas as características relacionadas à produção de matéria seca de partes da planta (Quadro 10). Algumas relações foram mais equilibradas, levando a diferenças não significativas para AFE e PA/R (Quadro 12). Já na relação F/C, a produção de matéria seca de folhas foi maior que a de colmos no solo de Viçosa, obtendo-se menores valores na relação que para o solo de Três Marias (Quadro 12). A DR foi maior no solo de textura média, independentemente do vaso, pela maior facilidade de crescimento de raízes nos solos menos argilosos, com adequado fornecimento de água e nutrientes para as plantas.

Os contrastes médios que comparam as relações AFE, F/C, PA/R, DRA e DRB, para cada solo em estudo, são apresentados no quadro 13. Em geral, o destaque é a localização de P, com resultados superiores aos observados na distribuição uniforme da dose no volume integral dos vasos da UE. Por outro lado, a não significância de alguns dos contrastes indica primordialmente, acréscimos ou decréscimos proporcionalmente semelhantes dos componentes de alguns dos índices calculados.

Valores de produção de matéria seca de folhas, colmos e raízes nos dois vasos da UE, mostrados no quadro 10, foram utilizados para cálculo das proporções desses componentes das plantas de sorgo (Quadro 14). Comparando os dois solos, observa-se que o maior crescimento de folhas, em relação a colmos, no solo Três Marias levou à diferenciação da percentagem de folhas, maior neste solo de textura média. O oposto aconteceu com a proporção de colmos, na comparação desses solos. A não diferenciação na proporção de raízes pode ser atribuída a características observadas em plantas, mesmo quando há restrição de nutrientes ou água. Nesses casos, o sistema radicular cresce até ter condições de suprir, da melhor forma possível, as necessidades nutricionais desses vegetais.

A observação dos contrastes correspondentes mostra que, em geral, o incremento ou redução da produção de matéria seca afetou de forma aproximadamente equivalente o crescimento das diferentes porções das

plantas, manifestando-se na ausência de significância na maioria dos contrastes analisados (Quadro 15). Novamente, destaque para a localização de P, que permitiu crescimento proporcionalmente superior de folhas, porção de maior importância na utilização das plantas de sorgo, seja na produção de forragens ou de grãos.

Quadro 13. Contrastes médios (C) da área foliar específica (AFE), das relações entre a produção de matéria seca de folhas e colmos (F/C) e de parte aérea e raízes (PA/R) e da densidade de raízes em cada vaso da unidade experimental (DRA e DRB), considerando os tratamentos aplicados nas unidades experimentais de cada solo

Contraste	AFE	F/C	PA/R	DRA	DRB
	m ² kg ⁻¹	kg kg ⁻¹		g dm ⁻³	
Três Marias					
C1	-5,5*	-0,11#	-0,53*	-0,18*	-0,21*
C2	6,7#	0,22#	-0,084	-0,48*	-0,24*
C3	0,8	0,20#	-0,234	-0,29#	-0,08
C4	-6,9#	-0,39*	-0,065	-0,59*	-0,077
C5	-5,2#	-0,39*	-0,224	-0,60*	0,019
C6	-0,4	-0,013	0,637	-0,27#	0,044
C7	1,8	0,094	-0,001	0,009	-0,68*
C8	-23,0	-0,193	-1,41*	-0,04	0,008
C9	-9,8#	0,56*	1,15#	-0,49*	-0,24#
C10	-3,4	-0,188	-1,16#	-0,105	-0,059
C11	7,7#	-0,068	0,34	0,055	-0,025
Viçosa					
C1	-7,1*	-0,51*	-0,67*	-0,21*	-0,14#
C2	1,2	-0,019	-0,341	-0,057	-0,079
C3	-2,7	0,086	-0,069	-0,016	0,024
C4	0,2	-0,111	0,012	-0,116	0,019
C5	0,1	-0,103	0,116	-0,106	0,069
C6	0,2	-0,136	-0,63	0,29#	-0,056
C7	-0,7	-0,12	-1,041	-0,32#	-0,145
C8	-16,3*	-0,60*	-0,253	-0,056	-0,044
C9	-1,6	-0,24#	-0,472	0,117	-0,111
C10	-1,0	-0,034	0,222	0,007	-0,184
C11	-4,5	0,104	0,452	-0,027	-0,038

C1: P localizado (PLO) vs P uniformemente distribuído (PUD). C2: -15 vs -30 e -50 kPa d/PLO. C3: -15 vs -30 kPa d/PLO. C4: -15 vs -30 e -50 kPa d/PUD. C5: -15 vs -30 kPa d/PUD. C6: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PLO. C7: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PLO. C8: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PLO. C9: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PUD. C10: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PUD. C11: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PUD.

#, *: Diferenças estatisticamente significativas a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 14. Proporção de folhas (PF), colmos (PC) e raízes em cada vaso da unidade experimental (PRA e PRB) com relação ao total de matéria seca produzida no ensaio, considerando o solo, a distribuição de P (DP) na unidade experimental, o potencial da água do solo (ψ) e a frequência de irrigação (FI)

DP ^{1/}	Ψ kPa	FI ^{2/} h	PF	%		
				PC	PRA	PRB
Três Marias						
PLO	-15	24/24	46,0	27,3	17,6	9,1
		24/120	48,7	29,0	11,9	10,4
	-30	24/24	48,3	26,3	9,2	16,3
		24/120	49,0	25,3	18,3	7,4
	-50	24/24	53,3	26,5	10,9	9,3
		24/120	46,0	25,3	15,4	13,3
PUD	-15	24/24	40,0	23,8	27,6	8,6
		24/120	50,5	22,8	21,9	4,8
	-30	24/24	47,0	28,0	8,6	16,4
		24/120	37,7	25,5	11,1	25,7
	-50	24/24	43,9	27,5	13,3	15,2
		24/120	44,4	29,2	19,8	6,7
Média Geral ^{3/}			46,2A	26,4B	15,5a	11,9a
Viçosa						
PLO	-15	24/24	51,2	26,7	11,7	10,4
		24/120	47,6	26,9	15,1	10,5
	-30	24/24	51,7	26,0	13,0	9,3
		24/120	46,5	25,5	13,1	14,8
	-50	24/24	49,1	24,2	17,7	9,0
		24/120	41,7	29,7	16,1	12,5
PUD	-15	24/24	43,4	28,5	15,3	12,8
		24/120	37,5	29,6	25,8	7,1
	-30	24/24	39,8	30,2	11,6	18,4
		24/120	40,4	31,4	17,2	11,0
	-50	24/24	36,8	29,8	22,0	11,3
		24/120	40,2	30,2	13,5	16,1
Média Geral ^{3/}			43,8B	28,2A	16,0a	11,9a

^{1/} PLO: P localizado. PUD: P uniformemente distribuído. ^{2/} 24/24: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 h. 24/120: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 e 120 h, respectivamente. ^{3/} Letras minúsculas e maiúsculas diferentes na média geral indicam diferenças estatisticamente significativas para solos a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 15. Contrastes médios (C) da proporção de folhas (PF), colmos (PC) e raízes em cada vaso da unidade experimental (PRA e PRB) com relação ao total de matéria seca produzida no ensaio, considerando os tratamentos aplicados nas unidades experimentais de cada solo

Contraste	PF	PC	PRA	PRB
% —————				
Três Marias				
C1	-5,0*	-0,5	3,0#	19,0
C2	1,8	-2,0#	-1,3	18,0
C3	1,3	-2,0#	-1,0	21,0
C4	-2,0	4,0*	-12,0*	9,0*
C5	-2,9	4,0*	-15,0*	14,0*
C6	2,7	1,6	-5,7	1,3
C7	0,7	-1,0	9,0#	-9,0#
C8	-7,0#	-1,2	4,5	4,0
C9	10,0*	-1,1	-5,6	-3,7
C10	-9,0*	-2,4	2,4	9,0#
C11	0,4	1,6	6,5	-9,0#
Viçosa				
C1	-8,0*	3,0*	3,0#	1,7
C2	-2,1	-0,4	1,6	0,9
C3	-0,3	-1,0	-0,3	1,6
C4	-1,2	1,4	-5,0#	4,0#
C5	-0,4	1,8	-6,0#	5,0#
C6	-3,6	0,2	3,4	0,1
C7	-5,0#	-0,5	0,1	5,5
C8	-7,0#	5,0*	-1,6	3,5
C9	-6,0#	1,1	10,0#	-5,7
C10	0,5	1,2	5,7	-7,0#
C11	3,4	0,3	-9,0#	4,8

C1: P localizado (PLO) vs P uniformemente distribuído (PUD). C2: -15 vs -30 e -50 kPa d/PLO. C3: -15 vs -30 kPa d/PLO. C4: -15 vs -30 e -50 kPa d/PUD. C5: -15 vs -30 kPa d/PUD. C6: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PLO. C7: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PLO. C8: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PLO. C9: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PUD. C10: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PUD. C11: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PUD.

#, *: Diferenças estatisticamente significativas a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

4.5. Produção de matéria seca de raízes nos tratamentos com localização de P

O quadro 16 mostra o crescimento de raízes nos dois vasos geminados: o vaso A, irrigado diariamente, e o vaso B, com irrigação a cada 24 ou 120 h. Na comparação entre solos, observam-se diferenças somente no setor -P, com maior produção de raízes no solo Três Marias.

Essa diferença pode ser atribuída à maior disponibilidade de P no solo Três Marias, como mostrado nas determinações realizadas na caracterização, após a incubação e na finalização do ensaio (Quadros 1, 2 e 5). No setor +P, a elevada disponibilidade de P, com a dose concentrada em 20 % do volume do vaso, não levou a diferenças estatisticamente significativas na comparação dos solos (Quadro 16).

Quadro 16. Produção de matéria seca de raízes nos vasos da unidade experimental com localização de P^{1/}, considerando o solo, o potencial da água do solo (ψ) e a frequência de irrigação (FI)

Ψ	FI ^{2/}	Vaso A		Vaso B	
		-P	+P	-P	+P
kPa	h	g/vaso			
Três Marias					
-15	24/24	2,292	2,678	1,172	1,568
	24/120	1,988	2,642	1,050	1,664
-30	24/24	1,391	1,305	1,758	2,461
	24/120	0,823	1,918	0,129	0,529
-50	24/24	0,256	0,679	0,280	0,518
	24/120	0,112	0,615	0,568	0,270
Média Geral ^{3/}		1,143a	1,639a	0,826a	1,168a
Viçosa					
-15	24/24	0,322	1,215	0,721	1,232
	24/120	1,295	1,759	0,679	0,985
-30	24/24	1,388	1,660	1,028	1,284
	24/120	0,318	1,454	0,414	1,518
-50	24/24	0,742	1,193	0,369	0,609
	24/120	0,805	1,459	0,280	0,522
Média Geral ^{3/}		0,812b	1,457a	0,582b	1,025a

^{1/} -P: setor do vaso da unidade experimental sem aplicação de P. +P: setor do vaso da unidade experimental com aplicação de P. ^{2/} 24/24: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 h. 24/120: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 (A) e 120 h (B), respectivamente. ^{3/} Letras minúsculas e maiúsculas diferentes na média geral indicam diferenças estatisticamente significativas para solos a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

Observando a produção de matéria seca de raízes do quadro 16, pelas condições experimentais, os valores de crescimento de raízes nos tratamentos em que os dois vasos receberam reposição de água a cada 24 h deveriam ser muito próximos. Contudo, a média dos três potenciais (Quadro 16) mostrou valores discrepantes para os vasos A e B, respectivamente:

- Três Marias, -P: 1,313 e 1,070 g/vaso;
- Três Marias, +P: 1,554 e 1,516 g/vaso;
- Viçosa, -P: 0,817 e 0,706 g/vaso; e
- Viçosa, +P: 1,355 e 1,042 g/vaso.

Essa discrepância deve ser atribuída, fundamentalmente, à dificuldade de trabalhar com sistemas de raízes divididas em dois vasos geminados. Na instalação do ensaio, a partição equilibrada do sistema radicular é difícil, levando a valores diferenciados de crescimento de raízes na finalização desses ensaios.

Os contrastes analisados, referentes ao crescimento de raízes no tratamento PLO, são mostrados no quadro 17. No solo Três Marias, o maior potencial matricial levou a maiores produções de matéria seca de raízes, quando comparados -15 com -30 e -50 kPa. Essa resposta também foi significativa na comparação de -15 com -30 kPa, mas somente no vaso que recebeu irrigação diária. No solo Viçosa, pelas razões já indicadas, de maior teor de água nos potenciais de trabalho, as diferenças nos valores de umidade associados a esses potenciais não levaram a diferenças estatisticamente significativas para o crescimento das raízes nos diferentes setores da UE (Quadro 17).

Com respeito aos contrastes C3 até C5 do quadro 17, que compara a frequência de irrigação para cada potencial de trabalho, os valores determinados para raízes no vaso A deveriam ser não significativos, visto que todos os vasos denominados A receberam reposição diária de água. Assim, eventuais diferenças significativas, como as mostradas no solo Viçosa (C3 e C4, Quadro 17), devem ser atribuídas a eventuais problemas na montagem do ensaio.

Quadro 17. Contrastes médios (C) da produção de matéria seca de raízes nos vasos da unidade experimental com localização de P^{1/}, considerando os tratamentos aplicados nas unidades experimentais de cada solo

C	Vaso A		Vaso B	
	-P	+P	-P	+P
g/vaso				
Três Marias				
C1	-1,495*	-1,531*	-0,427#	-0,672#
C2	-1,033*	-1,048#	-0,167	-0,121
C3	-0,304	-0,036	-0,122	0,095
C4	-0,568	0,613	-1,629*	-1,931*
C5	-0,144	-0,065	0,288	-0,248
Viçosa				
C1	0,005	-0,045	-0,177	-0,125
C2	0,045	0,07	0,021	0,292
C3	0,972#	0,544	-0,042	-0,248
C4	-1,071#	-0,206	-0,614#	0,233
C5	0,063	0,266	-0,088	-0,087

^{1/} -P: setor do vaso da unidade experimental sem aplicação de P. +P: setor do vaso da unidade experimental com aplicação de P. C1: -15 vs -30 e -50 kPa. C2: -15 vs -30 kPa. C3: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa. C4: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa. C5: 24/24 vs 24/120 d/-50) kPa.

#, *: Diferenças estatisticamente significativas a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

No vaso B, em que a frequência de irrigação foi diferenciada, verificou-se significância estatística, para o solo Três Marias, somente no contraste C4, que compara irrigação a cada 24 e 120 h no potencial intermediário de trabalho (Quadro 17). Esse resultado corrobora a discussão previamente realizada após análise dos resultados de produção de matéria seca. Também, a resposta das raízes crescidas no solo Viçosa foi coerente com a discussão previamente estabelecida.

Como forma de evidenciar a disparidade no crescimento de raízes nos setores -P e +P, respectivamente, calculou-se a densidade de raízes, pelo quociente entre a produção de matéria seca e o volume de solo em que as raízes cresceram (Quadro 18). Os valores calculados mostram a

concentração de raízes no setor em que o P foi aplicado. Considerando a relação +P/-P, os quocientes no solo Três Marias foram de 5,70 e 5,65 para os vasos A e B, respectivamente. No solo Viçosa, esses valores elevaram-se para 7,18 e 7,03, respectivamente. Os valores maiores no vaso B nas amostras de Viçosa respondem à menor disponibilidade de P neste solo, com diminuição mais apreciável no setor -P, quando comparado com o solo Três Marias (Quadros 1, 2 e 5). Essa diferença resulta em maior valor numérico na relação calculada.

Quadro 18. Densidade de raízes nos vasos da unidade experimental com localização de P^{1/}, considerando o solo, o potencial da água do solo (ψ) e a frequência de irrigação (FI)^{2/}

Ψ	FI ^{3/}	Vaso A		Vaso B	
		-P	+P	-P	+P
kPa	h	g dm ⁻³			
Três Marias					
-15	24/24	0,551	2,575	0,282	1,508
	24/120	0,478	2,540	0,252	1,600
-30	24/24	0,334	1,255	0,423	2,366
	24/120	0,198	1,844	0,031	0,509
-50	24/24	0,061	0,653	0,067	0,498
	24/120	0,027	0,591	0,137	0,260
Média Geral ^{4/}		0,275a	1,576a	0,199a	1,123 ^a
Viçosa					
-15	24/24	0,077	1,168	0,173	1,185
	24/120	0,311	1,691	0,163	0,947
-30	24/24	0,334	1,596	0,247	1,235
	24/120	0,076	1,398	0,100	1,459
-50	24/24	0,178	1,147	0,089	0,585
	24/120	0,193	1,403	0,067	0,501
Média Geral ^{4/}		0,195a	1,401a	0,140b	0,985a

^{1/} -P: setor do vaso da unidade experimental sem aplicação de P. +P: setor do vaso da unidade experimental com aplicação de P. ^{2/} Calculada com respeito ao volume de cada setor do vaso. ^{3/} 24/24: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 h. 24/120: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 (A) e 120 h (B), respectivamente. ^{4/} Letras minúsculas diferentes na média geral indicam diferenças estatisticamente significativas para solos a 25 % pelo teste F.

Na comparação entre as densidades médias de raízes para os dois solos, somente foram observadas diferenças no setor -P do vaso B (Quadro 18). Observe-se que esse setor e vaso foram os que apresentaram a menor disponibilidade de P e a maior flutuação de umidade. Essas duas características provocaram as diferenças anotadas.

O quadro 19 mostra os contrastes analisados na comparação de densidades de raízes, nos dois setores e vasos, quando da localização do P. No solo Três Marias há, em geral, significância para o potencial da água do solo, fato não observado no solo Viçosa, ratificando a discussão previamente apresentada na análise da produção de matéria seca dos tecidos vegetais.

Quadro 19. Contrastes médios (C) da densidade de raízes nos vasos da unidade experimental com localização de P^{1/}, considerando os tratamentos aplicados nas unidades experimentais de cada solo^{2/}

Contraste	Vaso A		Vaso B	
	-P	+P	-P	+P
g dm ⁻³				
Três Marias				
C1	-0,359*	-1,472*	-0,103#	-0,646#
C2	-0,248*	-1,008#	-0,04	-0,117
C3	-0,073	-0,034	-0,029	0,092
C4	-0,137	0,589	-0,392*	-1,857*
C5	-0,035	-0,062	0,069	-0,239
Viçosa				
C1	0,001	-0,043	-0,043	-0,121
C2	0,011	0,068	0,005	0,281
C3	0,234#	0,523	-0,01	-0,238
C4	-0,257#	-0,198	-0,148	0,224
C5	0,015	0,256	-0,021	-0,084

^{1/} -P: setor do vaso da unidade experimental sem aplicação de P. +P: setor do vaso da unidade experimental com aplicação de P. ^{2/} Calculada com respeito ao volume de cada setor do vaso. C1: -15 vs -30 e -50 kPa. C2: -15 vs -30 kPa. C3: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa. C4: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa. C5: 24/24 vs 24/120 d/-50) kPa.

#, *: Diferenças estatisticamente significativas a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

Foram verificadas também, no solo Três Marias, diferenças estatisticamente significativas para a frequência de irrigação no potencial intermédio, com vantagens na reposição diária de água em relação àquela realizada a cada 5 d (C4, Quadro 19). Esse resultado reafirma considerações previamente expressas, indicando que, em solo de textura média, a frequência de irrigação é de importância quando se trabalha com potenciais intermediários. Em potenciais maiores, o fornecimento de água é suficientemente satisfatório por meio de um setor do sistema radicular. Nos potenciais menores, há restrições de água e o crescimento apresenta-se comprometido, independentemente do tratamento. Cabe destacar que, em Latossolos, considerar o potencial de -1.500 kPa como ponto de murcha permanente não é adequado. Pela declividade das curvas características da água do solo, a murcha permanente será atingida em valores superiores de potencial, na faixa de -100 a -200 kPa, quando as plantas crescem em volumes restritos de solo.

4.6. Análise do 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.

O volume do exsudato xilemático e seu conteúdo em P são mostrados no quadro 20. Observa-se que, no momento do corte, as características da seiva das plantas crescidas nos dois solos em estudo foram semelhantes. Na comparação entre tratamentos, dentro de cada solo, foram analisados contrastes ortogonais (Quadro 21).

A localização de P mostrou-se fundamental, nos dois solos, para permitir maior volume e conteúdo de P no exsudato, ratificando tendência observada em características previamente discutidas (C1, Quadro 21). Similarmente, no solo Três Marias o conteúdo de água associado aos potenciais de trabalho influenciou nos maiores volumes e conteúdos de exsudato xilemático (C2 até C5, Quadro 21). O maior conteúdo de água

no solo Viçosa nos tratamentos de -15, -30 e -50 kPa levou a diferenças estatísticas esporádicas das características da seiva das plantas de sorgo (C2 até C5, Quadro 21).

Quadro 20. Volume de exsudato xilemático e conteúdo de P no exsudato, considerando o solo, a distribuição de P (DP) na unidade experimental, o potencial da água do solo (ψ) e a frequência de irrigação (FI)

DP ^{1/}	Ψ	FI ^{2/}	Volume	Conteúdo de P
	kPa	h	mL/UE	$\mu\text{g}/\text{UE}$
Três Marias				
PLO	-15	24/24	1,544	97,77
		24/120	1,276	108,76
	-30	24/24	0,726	90,89
		24/120	0,630	74,44
	-50	24/24	0,607	105,46
		24/120	0,116	1,76
PUD	-15	24/24	0,708	55,78
		24/120	0,354	25,59
	-30	24/24	0,117	9,31
		24/120	0,047	2,89
	-50	24/24	0,013	0,66
		24/120	0,113	11,16
Média Geral ^{3/}			0,521a	48,71a
Viçosa				
PLO	-15	24/24	0,997	68,35
		24/120	1,360	65,50
	-30	24/24	1,778	151,85
		24/120	0,550	55,63
	-50	24/24	0,532	67,87
		24/120	0,286	26,31
PUD	-15	24/24	0,408	21,69
		24/120	0,186	6,06
	-30	24/24	0,281	12,51
		24/120	0,225	19,10
	-50	24/24	0,123	4,09
		24/120	0,046	14,71
Média Geral ^{3/}			0,564a	42,81a

^{1/} PLO: P localizado. PUD: P uniformemente distribuído. ^{2/} 24/24: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 h. 24/120: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 e 120 h, respectivamente. ^{3/} Letras minúsculas diferentes na média geral indicam diferenças estatisticamente significativas para solos a 25 % pelo teste F.

Quadro 21. Contrastes médios (C) do volume de exsudato xilemático e do conteúdo de P no exsudato, considerando os tratamentos aplicados nas unidades experimentais de cada solo

Contraste	Volume	Conteúdo de P
	mL/UE	µg/UE
Três Marias		
C1	-0,591*	-62,28*
C2	-0,890*	-35,13*
C3	-0,731*	-20,60#
C4	-0,458*	-34,68*
C5	-0,449#	-34,59*
C6	-0,268	10,99
C7	-0,096	-16,46
C8	-0,491#	-103,69*
C9	-0,353	-30,18#
C10	-0,070	-6,42
C11	0,100	10,50
Viçosa		
C1	-0,706*	-59,56*
C2	-0,392#	8,49
C3	-0,015	36,81*
C4	-0,128	-1,27
C5	-0,044	1,93
C6	0,363	-2,85
C7	-1,228*	-96,23*
C8	-0,246	-41,56#
C9	-0,223	-15,63
C10	-0,056	6,59
C11	-0,077	10,62

C1: P localizado (PLO) vs P uniformemente distribuído (PUD). C2: -15 vs -30 e -50 kPa d/PLO. C3: -15 vs -30 kPa d/PLO. C4: -15 vs -30 e -50 kPa d/PUD. C5: -15 vs -30 kPa d/PUD. C6: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PLO. C7: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PLO. C8: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PLO. C9: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PUD. C10: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PUD. C11: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PUD.

#, *: Diferenças estatisticamente significativas a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

É de interesse a comparação da resposta da frequência de irrigação nos contrastes analisados para o exsudato xilemático (Quadro 21) e para a produção de matéria seca de folhas, colmos e raízes (Quadro 11). A produção de matéria seca representa a resposta do vegetal aos tratamentos durante todo o período experimental. Já o exsudato, como indicado, representa a resposta no momento do corte.

No solo Três Marias, a frequência de irrigação mostrou vantagens da irrigação diária na produção de matéria seca no potencial de -30 kPa, mas não no de -50 kPa, quando o P foi localizado (C7 e C8, Quadro 11). Na análise das características do exsudato, houve inversão de significâncias. Assim, valores de -30 kPa não foram significativos e valores de -50 kPa apresentaram diferenças nos mesmos contrastes (C7 e C8, Quadro 21). Isso pode levar à conclusão de que, em condições adversas, a etapa inicial de crescimento do vegetal é mais crítica quando se focaliza o fornecimento de água para as plantas. Com o crescimento da planta e exploração de maior volume de solos pelas raízes, os efeitos negativos da restrição de água são minorados. No solo mais argiloso, as características indicadas mantiveram a mesma tendência no decorrer do ensaio (C7 e C8, Quadros 11 e 21).

4.7. Conteúdo de P em folhas, colmos e raízes

Nos tecidos vegetais, após a digestão nítrico-perclórica, determinou-se o teor de P. Os valores, multiplicados pela produção de matéria seca, permitiram calcular o conteúdo de P em folhas, colmos e raízes (Quadro 22). Na comparação entre solos, a parte aérea das plantas crescidas no solo Três Marias mostrou maior conteúdo de P que as crescidas no solo Viçosa. Essas diferenças devem ser atribuídas, fundamentalmente, à maior produção de matéria seca de folhas e colmos (Quadro 10). A disponibilidade de P no decorrer do ensaio apresentou teores mais próximos para os dois solos (Quadros 2 e 5).

A relação na produção de matéria seca da parte aérea para os dois solos em estudo (MSPA Três Marias/Viçosa) foi de 1,32, com valores de 1,35 e 1,26 para folhas e colmos, respectivamente (Quadro 10). As disponibilidades de P no solo do ensaio, com médias dos valores apresentados nos quadros 2 e 5, foram de 2,88 (PLO -P), 86,89 (PLO +P) e 9,27 mg dm⁻³ (PLU), para o solo Três Marias. Já no solo Viçosa as médias foram de 1,77 (PLO -P), 79,43 (PLO +P) e 8,11 mg dm⁻³ (PLU), respectivamente.

Quadro 22. Conteúdo de P de folhas (CPF), colmos (CPC) e raízes (CPRVA e CPRVB), considerando o solo, a distribuição de P (DP) na unidade experimental, o potencial da água do solo (ψ) e a frequência de irrigação (FI)

DP ^{1/}	Ψ	FI ^{2/}	CPF	CPC	CPRVA	CPRVB
	kPa	h	mg/EU			
Três Marias						
PLO	-15	24/24	29,042	15,262	4,762	2,248
		24/120	30,837	15,072	4,127	3,094
	-30	24/24	28,781	12,806	2,317	3,776
		24/120	11,729	5,661	2,372	0,836
	-50	24/24	12,379	4,077	1,199	0,882
		24/120	5,441	2,840	0,689	0,976
PUD	-15	24/24	11,557	8,001	2,480	1,013
		24/120	11,757	5,148	1,527	0,509
	-30	24/24	6,973	4,670	0,633	1,315
		24/120	1,232	1,733	0,295	0,587
	-50	24/24	1,444	1,755	1,746	1,076
		24/120	3,512	2,137	0,560	0,279
Média Geral ^{3/}			12,890A	6,597a	1,892a	1,383a
Viçosa						
PLO	-15	24/24	13,018	7,358	2,210	2,471
		24/120	14,834	9,628	2,211	1,459
	-30	24/24	16,323	10,884	2,813	1,870
		24/120	8,586	5,076	1,413	1,653
	-50	24/24	9,156	4,805	3,181	0,959
		24/120	4,686	4,206	3,158	1,172
PUD	-15	24/24	4,520	3,894	0,524	0,623
		24/120	4,360	3,602	0,823	0,331
	-30	24/24	4,577	4,616	0,471	0,755
		24/120	2,575	3,229	0,448	0,369
	-50	24/24	2,076	2,642	0,413	0,412
		24/120	1,447	2,469	2,059	0,437
Média Geral ^{3/}			7,180B	5,201b	1,664a	1,043b

^{1/} PLO: P localizado. PUD: P uniformemente distribuído. ^{2/} 24/24: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 h. 24/120: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 e 120 h, respectivamente. ^{3/} Letras minúsculas e maiúsculas diferentes na média geral indicam diferenças estatisticamente significativas para solos a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

Isso leva ao cálculo dessas relações para P entre Três Marias e Viçosa: 1,63, 1,09 e 1,14, respectivamente. A relação de 1,63 para PLO -P é de pouca importância, pois no tratamento PLO a absorção de P foi observada fundamentalmente no setor +P, com maior disponibilidade do nutriente e relação de 1,09. A diferença entre absorção de P nos dois setores pode ser corroborada pela diferenciação na densidade radicular mostrada no quadro 18.

Com respeito ao conteúdo de P nas raízes, a diferença apontada foi observada nas raízes crescidas no vaso B, mas não nas raízes crescidas no vaso A (Quadro 22). Nos trabalhos com raízes encontram-se, normalmente, as maiores variabilidades, devido à menor produção e à dificuldade na retirada do solo, na finalização dos ensaios. Por outro lado, em tratamentos com maior restrição nutricional, há tendência de maior crescimento proporcional de raízes quando relacionadas com a parte aérea das plantas.

Os contrastes analisados para conteúdo de P, na comparação entre tratamentos dentro de cada solo, são apresentados no quadro 23. Inicialmente, no solo Três Marias, observaram-se maiores diferenças estatísticas nos conteúdos de P em folhas e colmos, quando confrontados com os conteúdos das raízes, porém elas acompanham a tendência observada na produção de matéria seca, previamente discutida. Assim, houve resposta positiva à localização de P e à maior disponibilidade de água. Quando analisada a frequência de irrigação foram identificadas diferenças entre 24/24 e 24/120 h na aplicação localizada de P, quando a disponibilidade de água é mais restrita. No tratamento de -15 kPa, a ausência de resposta ao período de reposição de água indica que, em solo adequadamente irrigado, há possibilidade de se realizar a irrigação localizada sem prejuízo para a produção de matéria seca e com a consequente economia de água.

O conteúdo de P nos tecidos vegetais das plantas de sorgo crescidas no solo Viçosa respondeu, fundamentalmente, à localização de P

(Quadro 23). O teor mais elevado de água nos potenciais de trabalho (Quadro 1) não permitiu evidenciar diferenças acentuadas na difusão de P - mecanismo de transporte que responde ao conteúdo de água do solo e não ao potencial matricial (Ruiz et al., 1988b).

Quadro 23. Contrastes médios (C) do conteúdo de P de folhas (CPF), colmos (CPC) e raízes (CPRVA e CPRVB), considerando os tratamentos aplicados nas unidades experimentais de cada solo

Contraste	CPF	CPC	CPRVA	CPRVB
mg/EU				
Três Marias				
C1	-13,622*	-5,379*	-1,371*	-1,172*
C2	-15,357*	-8,821*	-2,801*	-1,053*
C3	-9,684*	-5,934*	-2,100*	-0,365
C4	-8,367*	-4,000*	-1,195#	0,053
C5	-7,555#	-3,372#	-1,539#	0,190
C6	1,795	-0,190	-0,635	0,846
C7	-17,051*	-7,145*	0,055	-2,940*
C8	-6,938#	-1,237	-0,510	0,094
C9	0,200	-2,853	-0,953	-0,505
C10	-5,740	-2,936	-0,338	-0,728
C11	2,068	0,382	-1,186	-0,797
Viçosa				
C1	-7,841*	-3,584*	-1,708*	-1,109*
C2	-4,238#	-2,250#	0,431	-0,552
C3	-1,472	-0,513	-0,098	-0,204
C4	-1,771	-0,509	0,174	0,016
C5	-0,864	0,175	-0,214	0,085
C6	1,816	2,270	0,001	-1,012#
C7	-7,737#	-5,808*	-1,400	-0,216
C8	-4,469	-0,600	-0,023	0,213
C9	-0,161	-0,292	0,299	-0,292
C10	-2,002	-1,387	-0,023	-0,385
C11	-0,629	-0,173	1,646#	0,025

C1: P localizado (PLO) vs P uniformemente distribuído (PUD). C2: -15 vs -30 e -50 kPa d/PLO. C3: -15 vs -30 kPa d/PLO. C4: -15 vs -30 e -50 kPa d/PUD. C5: -15 vs -30 kPa d/PUD. C6: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PLO. C7: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PLO. C8: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PLO. C9: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PUD. C10: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PUD. C11: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PUD.

#, *: Diferenças estatisticamente significativas a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

Com os totais do conteúdo de P em folhas, colmos e raízes (Quadro 22), calculou-se a distribuição percentual de P nesses tecidos vegetais (Quadro 24). Na comparação entre solos, as diferenças foram notadas em folhas e colmos. Quando verificados os valores dos conteúdos mostrados no quadro 22, observa-se que as plantas crescidas no solo Viçosa acumularam menos P que as crescidas no solo Três Marias, tanto para folhas como para colmos. O decréscimo menos acentuado nos colmos em comparação com as folhas levou à maior distribuição percentual de P nos colmos das plantas crescidas no solo Viçosa (Quadro 24).

Nos contrastes analisados para comparar os tratamentos dentro de cada solo, novamente a localização de P mostrou-se mais efetiva que a distribuição uniforme do nutriente no solo, com destaque para o solo Três Marias, de textura média (Quadro 25). A resposta ao potencial da água do solo foi esporádica e, quando significativa, acompanhou as diferenças entre tratamentos previamente discutidas.

A eficiência de utilização de P (EUP) foi calculada pelo quociente entre a produção de matéria seca de folhas, colmos e raízes e o teor do P nesses tecidos vegetais das plantas de sorgo. Esse índice apresenta vantagens sobre o coeficiente de utilização biológica (CUB) calculado pela divisão da produção de biomassa dividida pelo conteúdo do nutriente proposto por Siddiqui & Glass (1981). Os valores apresentados no quadro 26 mostram semelhança na EUP dos dois solos para folhas e raízes crescidas no vaso B. Já no crescimento de colmos e raízes no vaso A, há superioridade do solo Três Marias. Nos solos de textura média, quando comparados aos solos argilosos e muito argilosos, o fornecimento adequado de nutrientes e água leva ao maior crescimento de plantas, com reflexos na EUP. Essa situação é discutida por Marschener (1995), quando manifesta que as diferenças na absorção e utilização de P pelas plantas estão relacionadas com a absorção, o transporte e a utilização final no interior da planta os quais são afetados por fatores morfológicos e fisiológicos e pela demanda nutricional. Nesse sentido, Graham (1984)

manifesta que um genótipo altamente eficiente na utilização de nutrientes pode ser produtivo mesmo empregando menores quantidades de nutrientes, por apresentar maior rapidez de transporte no xilema, rápida assimilação e, ou, grande capacidade de ciclagem interna. Em culturas como o sorgo e o trigo tem sido observado que a eficiência na utilização do fósforo está vinculada à sua maior capacidade de redistribuição interna (Wieneke, 1990; Horst et al., 1993).

Pelos contrastes analisados e apresentados no quadro 27 verifica-se que os componentes da parte aérea das plantas de sorgo são mais suscetíveis a apresentar resposta aos tratamentos impostos. Isso reforça a indicação de que, quando em estresse, a planta tende a fortalecer o sistema radicular, em detrimento da parte aérea – situação assinalada por Jones (1992). Taiz & Zeiger (2002) afirmam que uma diminuição no fornecimento de água reduz a divisão e o alongamento das células, obtendo-se plantas menores e redução de área foliar. Da mesma forma, Ruiz (1986) observou que nas raízes, após estas satisfazerem as suas necessidades nutricionais, eventuais acúmulos adicionais de P eram translocados e armazenados na parte aérea da planta de soja. No solo Três Marias, o crescimento de folhas e colmos respondeu à localização de P e à maior disponibilidade de água. Considerando a frequência de irrigação, as diferenças foram significativas somente no tratamento de -30 kPa do PLO, coincidindo com respostas anotadas em outras variáveis dependentes analisadas. No solo Viçosa essas diferenças só mostraram-se significativas para localização de P e frequência de irrigação no tratamento -30 kPa do PLO.

Quadro 24. Distribuição do conteúdo de P em folhas (DPF), colmos (DPC) e raízes (DPRVA e DPRVB), considerando o solo, a distribuição de P (DP) na unidade experimental, o potencial da água do solo (ψ) e a frequência de irrigação (FI)

DP ^{1/}	Ψ	FI ^{2/}	DPF	DPC	DPRVA	DPRVB
	kPa	h	% —————			
Três Marias						
PLO	-15	24/24	56,1	30,2	9,3	4,4
		24/120	57,6	28,8	7,8	5,7
	-30	24/24	59,7	27,5	4,4	8,4
		24/120	59,1	25,6	10,5	4,8
	-50	24/24	66,8	22,0	6,5	4,8
		24/120	53,7	27,7	8,1	10,5
PUD	-15	24/24	50,6	33,7	11,7	3,9
		24/120	56,7	29,7	10,0	3,6
	-30	24/24	50,2	34,4	4,4	10,9
		24/120	34,1	45,4	7,6	12,9
	-50	24/24	26,1	34,6	22,7	16,6
		24/120	45,7	38,2	10,6	5,5
Média Geral ^{3/}			51,4A	31,5B	9,5a	7,7a
Viçosa						
PLO	-15	24/24	53,8	28,3	9,0	8,9
		24/120	48,9	35,0	7,7	8,3
	-30	24/24	47,0	36,9	10,8	5,3
		24/120	46,9	33,0	9,0	11,1
	-50	24/24	51,1	26,2	17,6	5,0
		24/120	32,6	32,3	23,6	11,4
PUD	-15	24/24	47,0	41,1	5,5	6,3
		24/120	42,9	43,5	9,5	4,2
	-30	24/24	44,8	43,3	4,7	7,2
		24/120	39,7	47,6	7,2	5,5
	-50	24/24	41,6	43,7	8,1	6,6
		24/120	26,8	40,1	21,4	11,6
Média Geral ^{3/}			43,6B	37,6A	11,2a	7,6a

^{1/} PLO: P localizado. PUD: P uniformemente distribuído. ^{2/} 24/24: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 h. 24/120: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 e 120 h, respectivamente. ^{3/} Letras minúsculas e maiúsculas diferentes na média geral indicam diferenças estatisticamente significativas para solos a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 25. Contrastes médios (C) da distribuição de P em folhas (DPF), colmos (DPC) e raízes (DPRVA e DPRVB), considerando os tratamentos aplicados nas unidades experimentais de cada solo

Contraste	DPF	DPC	DPRVA	DPRVB
%				
Três Marias				
C1	-15,0*	9,1*	3,4#	2,5#
C2	2,9	-3,8	-1,2	2,1
C3	2,5	-3,0	-1,1	1,6
C4	-14,6*	6,5#	0,4	7,7*
C5	-11,5#	8,2#	-4,9#	8,2*
C6	1,5	-1,4	-1,5	1,4
C7	-0,6	-1,9	6,1	-3,6
C8	-13,1#	5,7	1,6	5,8#
C9	6,1	-4,1	-1,7	-0,3
C10	-16,2#	11,0#	3,2	2,0
C11	19,6*	3,6	-12,1*	-11,1*
Viçosa				
C1	-6,2#	11,3*	-3,6#	-1,4
C2	-7,0#	0,4	6,9#	-0,4
C3	-4,5	3,3	1,6	-0,4
C4	-6,7#	1,4	2,9	2,5
C5	-2,7	3,1	-1,6	1,1
C6	-4,9	6,8	-1,3	-0,5
C7	-0,1	-3,9	-1,8	5,8#
C8	-18,5*	6,1	6,0	6,4#
C9	-4,2	2,4	4,0	-2,1
C10	-5,2	4,3	2,5	-1,6
C11	-14,8#	-3,6	13,3*	5,1#

C1: P localizado (PLO) vs P uniformemente distribuído (PUD). C2: -15 vs -30 e -50 kPa d/PLO. C3: -15 vs -30 kPa d/PLO. C4: -15 vs -30 e -50 kPa d/PUD. C5: -15 vs -30 kPa d/PUD. C6: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PLO. C7: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PLO. C8: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PLO. C9: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PUD.. C10: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PUD. C11: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PUD.

#, *: Diferenças estatisticamente significativas a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

Quadro 26. Eficiência de utilização de P em folhas (EUPF), colmos (EUPC) e raízes (EUPRVA e EUPRVB), considerando o solo, a distribuição de P (DP) na unidade experimental, o potencial da água do solo (ψ) e a frequência de irrigação (FI)

DP ^{1/}	Ψ	FI ^{2/}	EUPF	EUPC	EUPRVA	EUPRVB
	kPa	h	t ² kg ⁻¹			
Três Marias						
PLO	-15	24/24	7,081	4,623	5,394	3,832
		24/120	6,467	4,585	4,872	2,875
	-30	24/24	5,987	3,892	3,139	4,734
		24/120	3,061	1,727	3,398	0,521
	-50	24/24	1,687	1,264	0,729	0,722
		24/120	1,542	0,820	0,784	0,835
PUD	-15	24/24	4,680	2,475	10,861	3,780
		24/120	4,505	1,582	3,910	0,754
	-30	24/24	2,961	1,429	1,186	1,781
		24/120	1,619	0,455	0,341	2,454
	-50	24/24	1,608	0,536	0,163	0,272
		24/120	1,408	0,655	1,170	0,254
Média Geral ^{3/}			3,550a	2,004a	2,996a	1,901a
Viçosa						
PLO	-15	24/24	5,120	2,247	1,098	1,597
		24/120	6,083	2,936	4,472	2,039
	-30	24/24	10,165	3,311	3,328	2,899
		24/120	3,237	1,563	1,765	1,480
	-50	24/24	3,378	1,480	1,878	1,010
		24/120	2,681	1,291	2,739	0,501
PUD	-15	24/24	2,563	1,187	2,580	1,844
		24/120	2,479	1,103	3,790	0,714
	-30	24/24	2,967	1,405	1,567	3,411
		24/120	2,795	0,989	1,796	1,135
	-50	24/24	2,015	0,807	1,697	1,267
		24/120	2,264	0,757	0,371	0,605
Média Geral ^{3/}			3,812a	1,590b	2,257b	1,542a

^{1/} PLO: P localizado. PUD: P uniformemente distribuído. ^{2/} 24/24: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 h. 24/120: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 e 120 h, respectivamente. ^{3/} Letras minúsculas diferentes na média geral indicam diferenças estatisticamente significativas para solos a 25 % pelo teste F.

Quadro 27. Contrastes médios (C) da eficiência de utilização de P em folhas (EUPF), colmos (EUPC) e raízes (EUPRVA e EUPRVB), considerando os tratamentos aplicados nas unidades experimentais de cada solo

Contraste	EUPF	EUPC	EUPRVA	EUPRVB
$t^2 \text{ kg}^{-1}$				
Três Marias				
C1	-1,507*	-1,630*	-0,114	-0,704#
C2	-3,705*	-2,678*	-3,121*	-1,651*
C3	-2,250#	-1,795*	-1,865#	-0,726
C4	-2,693*	-1,259*	-6,670*	-1,077#
C5	-2,302#	-1,086#	-6,622*	-0,150
C6	-0,614	-0,038	-0,522	-0,956
C7	-2,925#	-2,165*	0,259	-4,213*
C8	-0,146	-0,444	0,055	0,113
C9	-0,175	-0,894	-6,952*	-3,026*
C10	-1,342	-0,974#	-0,845	0,673
C11	-0,200	0,119	1,007	-0,019
Viçosa				
C1	-2,597*	-1,097*	-0,580	-0,092
C2	-0,736	-0,680#	-0,358	-0,346
C3	1,099	-0,155	-0,240	0,371
C4	-0,011	-0,156	-1,827#	0,326
C5	0,360	0,052	-1,503	0,994
C6	0,963	0,688	3,374#	0,442
C7	-6,927*	-1,748*	-1,564	-1,420
C8	-0,697	-0,189	0,861	-0,509
C9	-0,083	-0,084	1,210	-1,130
C10	-0,172	-0,416	0,229	-2,276#
C11	0,249	-0,050	-1,326	-0,663

C1: P localizado (PLO) vs P uniformemente distribuído (PUD). C2: -15 vs -30 e -50 kPa d/PLO. C3: -15 vs -30 kPa d/PLO. C4: -15 vs -30 e -50 kPa d/PUD. C5: -15 vs -30 kPa d/PUD. C6: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PLO. C7: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PLO. C8: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PLO. C9: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa d/PUD.. C10: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa d/PUD. C11: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa d/PUD.

#, *: Diferenças estatisticamente significativas a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

4.8. Conteúdo de P nas raízes dos tratamentos com localização de P

A análise de P nos tratamentos PLO foi realizada nas raízes crescidas nos setores -P e +P dos vasos A e B (Quadro 28). Na comparação entre solos, no vaso A, o conteúdo de P mostrou os mesmos resultados estatísticos que na produção de matéria seca (Quadro 16). Assim, as diferenças estatísticas foram significativas no tratamento -P, com menor disponibilidade de P, e não significativas no +P, em que o P disponível foi apreciavelmente elevado, situação mostrada nos quadros 2 e 5. No quadro 28 também se pode observar que no vaso B houve resposta diferenciada para produção de matéria seca e conteúdo de P no tratamento -P; nesse caso, a diferença na produção de matéria seca, com superioridade no solo Três Marias (Quadro 16), não foi acompanhada pelo maior acúmulo de P. O solo Viçosa, nos potenciais hídricos de trabalho, apresentou maior teor de água e menores flutuações na frequência de irrigação, favorecendo a difusão de P até as raízes e permitindo igualar os conteúdos no tratamento -P do vaso B. Essa observação é corroborada pela verificação de que a relação entre matérias secas de raízes para os dois solos neste tratamento é de 1,41 (Quadro 16), enquanto essa relação cai para 1,12 quando o conteúdo é localizado (Quadro 28).

Os contrastes referentes ao conteúdo de P nas raízes do tratamento PLO são mostrados no quadro 29. Poucas diferenças estatisticamente significativas foram observadas. Quando presente, o conteúdo de P respondeu ao teor de água do solo associado aos potenciais e à frequência de irrigação no potencial de -30 kPa (Três Marias). No solo Viçosa, as eventuais diferenças foram para a frequência de irrigação nos menores potenciais de trabalho.

Quadro 28. Conteúdo de P de raízes nos vasos da unidade experimental com localização de P^{1/}, considerando o solo, o potencial da água do solo (ψ) e a frequência de irrigação (FI)

Ψ	FI ^{2/}	Vaso A		Vaso B	
		-P	+P	-P	+P
kPa	h	mg/vaso			
Três Marias					
-15	24/24	1,794	2,968	0,688	1,560
	24/120	0,823	2,537	0,934	2,160
-30	24/24	1,000	1,317	1,363	2,413
	24/120	0,762	1,610	0,183	0,653
-50	24/24	0,280	0,919	0,104	0,778
	24/120	0,161	0,528	0,674	0,277
Média Geral ^{3/}		0,803a	1,646a	0,657a	1,306a
Viçosa					
-15	24/24	0,301	1,605	1,177	1,294
	24/120	0,770	1,441	0,567	0,892
-30	24/24	1,039	1,774	0,806	1,064
	24/120	0,206	1,150	0,418	1,235
-50	24/24	0,578	1,208	0,316	0,642
	24/120	0,346	2,892	0,243	0,842
Média Geral ^{3/}		0,540b	1,678a	0,587a	0,995 ^a

^{1/} -P: setor do vaso da unidade experimental sem aplicação de P. +P: setor do vaso da unidade experimental com aplicação de P. ^{2/} 24/24: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 h. 24/120: os dois vasos da unidade experimental irrigados a cada 24 (A) e 120 h (B), respectivamente. ^{3/} Letras minúsculas diferentes na média geral indicam diferenças estatisticamente significativas para solos a 25 % pelo teste F.

Quadro 29. Contrastes médios (C) do conteúdo de P das raízes nos vasos da unidade experimental com localização de P^{1/}, considerando os tratamentos aplicados nas unidades experimentais de cada solo

Contraste	Vaso A		Vaso B	
	-P	+P	-P	+P
mg/vaso				
Três Marias				
C1	-0,758*	-1,659*	-0,230	-0,830#
C2	-0,428#	-1,289#	-0,038	-0,327
C3	-0,971*	-0,431	0,246	0,600
C4	-0,239	0,293	-1,180*	-1,760*
C5	-0,119	-0,391	0,570#	-0,501
Viçosa				
C1	0,007	0,232	-0,426#	-0,147
C2	0,087	-0,062	-0,260	0,057
C3	0,469	-0,164	-0,610#	-0,402
C4	-0,833#	-0,624	-0,388	0,171
C5	-0,232	1,684#	-0,073	0,200

^{1/} -P: setor do vaso da unidade experimental sem aplicação de P. +P: setor do vaso da unidade experimental com aplicação de P. C1: -15 vs -30 e -50 kPa. C2: -15 vs -30 kPa. C3: 24/24 vs 24/120 d/-15 kPa. C4: 24/24 vs 24/120 d/-30 kPa. C5: 24/24 vs 24/120 d/-50 kPa. #, *: Diferenças estatisticamente significativas a 25 e 5 %, respectivamente, pelo teste F.

5. CONCLUSÕES

- Na comparação entre solos, a amostra retirada em Três Marias, de textura média, permitiu crescimento maior das plantas de sorgo que a amostra retirada em Viçosa, de textura muito argilosa. Constata-se assim que o solo de textura média, com níveis adequados de água e nutrientes, permite maior crescimento de plantas que o solo de textura argilosa em condições equivalentes.
- A localização de P em menores volumes de solo mostrou maior eficiência nutricional que a distribuição uniforme no volume da unidade experimental. Confirma-se dessa forma que essa é a alternativa apropriada de fertilização fosfatada em solos com baixos teores de P e elevada capacidade de fixação do nutriente.
- A resposta aos potenciais de água nos solos estudados foi maior no solo de textura média.
- No tratamento com maior disponibilidade de água, -15 kPa, praticamente não houve resposta à frequência de irrigação. Isso indica que o solo de textura média com adequado fornecimento de água às

plantas pode ser irrigado alternadamente, sem prejudicar o crescimento das plantas de sorgo.

- No solo Três Marias, a frequência da irrigação foi de importância no tratamento intermediário, de -30 kPa. Nessas condições, de restrição eventual de água, o fornecimento frequente é de importância para manter o crescimento de plantas em níveis adequados.
- No solo muito argiloso os menores potenciais de água no solo afetaram o crescimento do sorgo, contudo não houve resposta à frequência de irrigação.
- No tratamento com maior restrição de água, -50 kPa, a frequência de irrigação foi de pouca importância. Nesse potencial, a restrição de água ao crescimento das plantas foi evidenciada nas duas frequências avaliadas.

LITERATURA CITADA

- ALVAREZ V., V.H. & FONSECA, D.M. Definição das doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. R. Bras. Ci. Solo, 14:49-55, 1990.
- ALVAREZ V., V.H. & RIBEIRO, A.C. Calagem. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G. & ALVAREZ V., V.H., eds. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação. Viçosa, Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.43-60.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. B. Inf. SBCS, 25:27-33, 2000.
- ALVAREZ V., V.H. & ALVAREZ, G.A.M. Comparação de médias ou teste de hipóteses? Contrastes! Bol. Inf. SBCS, 31:24-34, 2006.
- ANGHINONI, I. Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel. R. Bras. Ci. Solo, 16:349-353, 1992.
- ANGHINONI, I. & BARBER, S.A. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply. Agron. J., 72:685-688, 1980.

- BARBER, S. 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.
- BEEG, I.E. & TURNER, N.C. Crop water deficits. *Adv. Agron.*, 28:161-217, 1976.
- BERNARDO, S.; ALVES, S.A. & MANTOVANI, E.C. Manual de irrigação. 8.ed. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2006. 625p.
- BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. *R. Ceres*, 21:73-85, 1974.
- CAMPBELL, G.S. Soil water potential measurement: an overview. *Irrig. Sci.*, 9:265-273, 1988.
- CARVALHO, M.A. Retenção de água e outros atributos físicos de agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 83p. (Tese de Doutorado)
- CASTILHOS, D.D. & ANGHINONI, 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.
- DEFELIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análise química do solo. Metodologia. 2.ed. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 26p. (Boletim de extensão, 29)
- DENMEAD, O.T. & SHAW, R.H. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.*, 54:385-390, 1962.
- DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. Crop water requirements. Roma, FAO. 1977. 144 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24)
- DOORENBOS, J. & KASSAM, A.H. Efeitos da água no rendimento das culturas. Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, 1994. 212p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33)

- EPSTEIN, E. Nutrição mineral das plantas: princípios e perspectivas. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 1975. 341p.
- GRAHAM, R.D. Breeding for nutritional characteristics in cereals. Adv. Plant Nutr., 1:57-101, 1984.
- GRIFFIN, B.S.; SHILLING, D.G.; BENNET, J.M. & CURREY, W.L. The influence of water stress on the physiology and competition of soybean (*Glycine max*) and florida beggarweed (*Desmodium tortuosum*). Weed Sci., 37:544-551, 1989.
- HENDRICKX, J.M.H. & WIERENGA, P.J. Variability of soil water tension in a trickle irrigated chili pepper field. Irrig. Sci., 11:23-30, 1990.
- HILLEL, D. The field water balance and water use efficiency. In: HILLEL, D., ed. Optimizing the soil physical environment towards greater crop yields. New York, Academic Press, 1972. p.79-100.
- HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A. & SOLOMON, K.H., eds. Management of farm irrigation systems. St. Joseph, EUA, ASAE, 1990. 1040 p.
- HORST, W.J.; ABDU, M. & WIESLER, F. Genotypic differences in phosphorus efficiency of wheat. Plant Soil, 155/156:293-296, 1993.
- JONES, H.G. Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology. 2.ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1992. 428p.
- JURY, W.A.; GARDNER, W.R. & GARDNER, W.H. Soil physics. 5.ed. New York, John Wiley, 1991. 328p.
- KAMINSKI, J. & PERUZZO, G. Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo. Santa Maria, Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 31 p. (Boletim Técnico, 3)
- KRAMER, P.J. & BOYER, J.S. Water relations of plants and soils. New York, Academic Press, 1995. 495p.

- KROLOW, R.H.; MISTURA, C.; COELHO, R.W.; SIEWERDT, L. & ZONTA, E.P. Efeito do fósforo e do potássio sobre o desenvolvimento e a nodulação de três leguminosas anuais de estação fria. R. Bras. Zoot., 33:2224-2230, 2004.
- LEITE, B.P. Níveis críticos de fósforo para milho e eucalipto, em função da sua localização no solo. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 106p. (Dissertação de Mestrado)
- MACLEAN, A.H. & YAGER, T.V. Available water capacities of Zambian soils in relation to pressure plate measurements and size analysis. Soil Sci., 113:23-29, 1972.
- MALAVOLTA, E. ABC da adubação. 5.ed. São Paulo, Agronômica Ceres, 1989. 292p.
- MARSCHENER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2.ed. London, Academic Press, 1995. 889p.
- MARTIN, F. & VALERO, A. Agronomia del riego. Madrid, Mundi-Prensa, 1993. 732p.
- MEURER, E.J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R.; 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.
- MIRANDA, J.R.P.; SOUTO, J.S.; FREIRE, A.L.O. ; SOUSA, A.M.; ARAÚJO, L.V.C.; MOURA, O.N. & ROLIM JÚNIOR, S.S. Aplicação localizada de fósforo em mudas de craibeira (*Tabebuia caraíba*) em fase de viveiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., Viçosa, 1995. Resumos Expandidos. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995. p.791-793.
- NEVES, J.C.L.; CÁRDENAS, A.C.; LANI, J.L.; BARROS, N.F. & NOVAIS, R.F. Efeito de doses e localização de fósforo sobre o crescimento de mudas de eucalipto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 21., Campinas, 1987. Resumos. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1987. p.144-145.

- NOORDWIJK, M. & WILLIGEN, P. Quantitative root ecology as element of soil fertility theory. *J. Agric. Sci.*, 34:273-281, 1986.
- NOVAIS, F.R. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG, 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. Transporte de nutrientes em resposta a potencial de água, tamanho de agregados e manejo de um Latossolo Vermelho. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2006, 96p. (Tese de Doutorado)
- OLSEN, S.R. & KEMPER, W.D. Movement of nutrients to plant roots. *Adv. Agron.*, 20:91-151, 1968.
- PAEZ, A., GONZÁLES, M.E., YRAUSQUÍN, O.X.; SALAZAR, A. & CASANOVA, A. Water stress and clipping management effects on guineagrass: I. Growth and biomass allocation. *Agron. J.*, 87:698-706, 1995.
- POZZA, A.A.A.; GUIMARÃES, P.T.G.; ROMANIELLO, M.M.; POZZA, E.A. & CARVALHO, J.G. Suprimento de fósforo na produção e intensidade da cercosporiose de mudas de cafeeiro em tubetes. *Ci. Agrot.*, 26:970-976, 2002.
- 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.
- PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A.; DONAGEMMA, G.K. & MENDONÇA, E.S. Ponto de murcha permanente de soja, feijão e plantas daninhas. *Planta Daninha*, 22:35-41, 2004.
- REEVE, M.J.; SMITH, P.D. & THOMASSON, A.J. The effect of density on water retention properties of field soils. *J. Soil Sci.*, 24:355-367, 1973.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:211-216, 1988.

- REYNOLDS, W.D. & ELRICK, D.E. Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:633-639, 1991.
- RICHARDS, L.A. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Sci.*, 68:95-112, 1949.
- RITCHIE, J.T. Soil water availability. *Plant Soil*, 58:327-338, 1981.
- ROSOLEM, C.A.; ASSIS, J.S. & SANTIAGO, A.D. Root growth and mineral nutrition of corn hybrids as affected by phosphorus and lime. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 25:2491-2499, 1994.
- RUIZ, H.A. Efeito do conteúdo de água sobre o transporte de fósforo em dois Latossolos. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1986. 85p. (Tese de Doutorado)
- RUIZ, H.A. Relações molares de macronutrientes em tecidos vegetais como base para a formulação de soluções nutritivas. *R. Ceres*, 44:533-546, 1997.
- 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 o 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, H.A. & CARVALHO, M.A. Retenção de água em agregados de um Latossolo Vermelho-Escuro. In: BALBUENA, R.H.; BENES, S.H. & JORAJURIA, D., eds. *Avances en el manejo del suelo y agua en la ingeniería rural Latinoamericana*. La Plata, Argentina, Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, 1998, p.153-158.

- SANTOS, G.F.; RODRIGUEZ, S.J.A.; SHAFFER, E., R.& CASELA, C.R. Híbrido granífero BRS-310. Sete Lagoas, MG, EMBRAPA, Milho Sorgo, 2004, 4p. (Comunicado Técnico)
- SIDDIQUI, M.Y. & GLASS, A.D.M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. *J. Plant Nut.*, 4:289-302, 1981.
- SYKES, D. J. Reconsideração do conceito da umidade de murchamento permanente. *Turrialba*, 19:525-530, 1969.
- STEELE, D.D.; SCHERER, T.F.; PRUNTY, L.D. & STEGMAN, E.C. Water balance irrigation scheduling: comparing crop curve accuracies and determining the frequency of corrections to soil moisture estimates. *Appl. Eng. Agric.*, 13:593-599, 1997.
- SHETRON, S.G. Distribution of free iron and organic carbon as related to available water in some forested sandy soils. *Soil Sci.*, 38:359-362, 1974.
- TAIZ, L. & ZEIGER, E. *Plant physiology*. 3.ed. Sunderland, Massachusetts, Sinauer, 2002. 690p.
- TAYLOR, D. & ARKIN, G.F. Root zone modification fundamentals and alternatives. In: TAYLOR, H.M. & ARKIN, G.F., eds. *Modifying the root environment to reduce crop stress*. St. Joseph, MI, EUA, ASAE, 1981. p.3-16.
- TAYLOR, S.A. Managing irrigation water on the farm. *Trans. ASAE*, 8:433- 436, 1965.
- 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.
- VETTORI, L. *Métodos de análise do solo*. Rio de Janeiro, Divisão de Pedologia e Fertilidade do Solo, Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim Técnico,7)

WIENEKE, J. Phosphorus efficiency and phosphorus remobilization in two sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivars. *Plant Soil*, 23:139-145, 1990.

WILD, A. Mass flow and diffusion. In: GREENLAND, D.J. & HAYNES, M.H.B., eds. *The chemistry of soil processes*. Chichester, John Wiley, 1981. p.37-80.

APÊNDICE

APÊNDICE

Quadro 1A. Análise de variância do volume de água acrescentado às unidades experimentais, em mL/vaso, considerando o solo e os tratamentos aplicados

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio		
		Vaso A	Vaso B	Total
Bloco	2	581 378	833 485	2 629 972
Solo	1	842 824#	413 165	75 777
Tratamentos d/ Três Marias	11	2 315 415*	1 923 882*	6 633 095*
Tratamentos d/ Viçosa	11	954 516	841 909	2 638 069*
Resíduo	43	491 113	431 787	870 812
CV (%)		44,28	59,89	34,82

*: Significativo a 5 % pelo teste F. #: Significativo a 25 %, para solo, pelo teste F.

Quadro 2A. Análise de variância do diâmetro do colmo, em mm/planta, aos 11 e 25 d da aplicação dos tratamentos (DC11 e DC25) e do incremento de diâmetro entre as duas determinações, considerando o solo e os tratamentos aplicados

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio		
		DC11	DC25	DC25-DC11
Bloco	2	27,683*	32,653*	0,656
Solo	1	0,983	14,504#	7,935#
Tratamentos d/ Três Marias	11	16,850*	39,670*	6,556*
Tratamentos d/ Viçosa	11	3,385	17,713*	10,512*
Resíduo	43	2,378	5,067	2,749
CV (%)		22,13	23,18	58,53

*: Significativo a 5 % pelo teste F. #: Significativo a 25 %, para solo, pelo teste F.

Quadro 3A. Análise de variância da área foliar (AF), em cm²/UE, e da produção de matéria seca de folhas (MSF), colmos (MSC), parte aérea (MSPA) e raízes (MSR = MSRA + MSRB), em g/UE, considerando o solo e os tratamentos aplicados

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio						
		AF	MSF	MSC	MSPA	MSRA	MSRB	MSR
Bloco	2	851 255	19,567	9,832	56,896	5,737	2,208	13,028*
Solo	1	2 690 886*	52,608*	11,699#	113,92*	5,976#	2,050#	15,027*
Tratamentos d/ Três Marias	11	3 762 080*	67,579*	22,973*	168,27*	8,378*	4,385*	19,541*
Tratamentos d/ Viçosa	11	2 206 088*	28,725*	6,678*	62,665*	1,956	1,125	4,802
Resíduo	43	610 578	9,917	3,179	23,625	1,940	1,174	2,915
CV (%)		55,84	55,07	53,89	53,84	73,96	79,49	52,60

*: Significativo a 5 % pelo teste F. #: Significativo a 25 %, para solo, pelo teste F.

Quadro 4A. Análise de variância da área foliar específica (AFE), em $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$, das relações entre a produção de matéria seca de folhas e colmos (F/C) e de parte aérea e raízes (PA/R), em kg kg^{-1} , e da densidade de raízes em cada vaso da unidade experimental (DRA e DRB), em g dm^{-3} , considerando o solo e os tratamentos aplicados

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio				
		AFE	F/C	PA/R	DRA	DRB
Bloco	2	1 136,43	0,082	0,023	0,212	0,082
Solo	1	2 022,39	0,527*	0,489	0,221#	0,076#
Tratamentos d/ Três Marias	11	9 181,66	0,126	0,760	0,310*	0,162*
Tratamentos d/ Viçosa	11	9 772,32	0,273*	0,721	0,072	0,042
Resíduo	43	5 133,45	0,065	0,521	0,072	0,043
CV (%)		30,31	15,17	26,28	73,96	79,49

*: Significativo a 5 % pelo teste F. #: Significativo a 25 %, para solo, pelo teste F.

Quadro 5A. Análise de variância da proporção de folhas (PF), colmos (PC) e raízes em cada vaso da unidade experimental (PRA e PRB), em %, considerando o solo e os tratamentos aplicados

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio			
		PF	PC	PRA	PRB
Bloco	2	14,65	6,298	12,74	15,42
Solo	1	83,66	51,00*	6,271	0,2487
Tratamentos d/ Três Marias	11	45,34 *	11,53	96,55	98,42*
Tratamentos d/ Viçosa	11	75,32*	14,92	50,14	30,89
Resíduo	43	21,07	8,692	54,19	45,70
CV (%)		10,22	10,81	46,61	56,28

*: Significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 6A. Análise de variância da produção de matéria seca de raízes nos vasos da unidade experimental com localização de P^{1/}, em g/vaso, considerando o solo e os tratamentos aplicados

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio			
		Vaso A		Vaso B	
		-P	+P	-P	+P
Bloco	2	0,072	1,717	0,548	0,075
Solo	1	0,930	0,408	0,775#	0,183
Tratamentos d/ Três Marias	5	2,130*	2,166	1,028	2,088
Tratamentos d/ Viçosa	5	0,641	0,228	0,203	0,375
Resíduo	18	0,669	1,050	0,409	0,849
CV (%)		82,26	66,24	87,74	83,62

^{1/} -P: setor do vaso da unidade experimental sem aplicação de P. +P: setor do vaso da unidade experimental com aplicação de P.

*: Significativo a 5 % pelo teste F. #: Significativo a 25 %, para solo, pelo teste F.

Quadro 7A. Análise de variância da densidade de raízes nos vasos da unidade experimental com localização de P^{1/}, em g dm⁻³, considerando o solo e os tratamentos aplicados

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio			
		Vaso A		Vaso B	
		-P	+P	-P	+P
Bloco	2	0,003	1,407	0,031	0,091
Solo	1	0,047	0,241	0,039#	0,093
Tratamentos d/ Três Marias	5	0,128*	2,219	0,062	2,032
Tratamentos d/ Viçosa	5	0,037	0,210	0,012	0,346
Resíduo	18	0,038	0,997	0,024	0,787
CV (%)		83,13	67,84	89,12	84,82

^{1/} -P: setor do vaso da unidade experimental sem aplicação de P. +P: setor do vaso da unidade experimental com aplicação de P.

*: Significativo a 5 % pelo teste F. #: Significativo a 25 %, para solo, pelo teste F.

Quadro 8A. Análise de variância do volume de exsudato xilemático, em mL/UE, e do conteúdo de P no exsudato, em $\mu\text{L}/\text{UE}$, considerando o solo e os tratamentos aplicados

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio	
		Volume	Conteúdo de P
Bloco	2	0,10211	1 199,64
Solo	1	0,03790	240,78
Tratamentos d/ Três Marias	11	0,59482*	4 575,28*
Tratamentos d/ Viçosa	11	0,76800*	4 960,64*
Resíduo	43	0,16000	670,54
CV (%)		74,21	57,84

*: Significativo a 5 % pelo teste F.

Quadro 9A. Análise de variância do conteúdo de P de folhas (CPF), colmos (CPC) e raízes em cada vaso da unidade experimental (CPRVA e CPRVB), em mg/UE, considerando o solo e os tratamentos aplicados

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio			
		CPF	CPC	CPRVA	CPRVB
Bloco	2	28,1506	31,9224	4,2945	0,9538
Solo	1	533,8123*	39,5434#	1,4379	2,1757#
Tratamentos d/ Três Marias	11	350,6808*	75,0899*	5,9053*	3,4654*
Tratamentos d/ Viçosa	11	77,9724	21,9739*	3,6490	1,4077
Resíduo	43	46,3265	10,4010	2,1928	0,9563
CV (%)		67,51	53,76	82,08	79,26

*: Significativo a 5 % pelo teste F. #: Significativo a 25 %, para solo, pelo teste F.

Quadro 10A. Análise de variância da distribuição de P em folhas (DPF), colmos (DPC) e raízes em cada vaso da unidade experimental (DPRVA e DPRVB), em %, considerando o solo e os tratamentos aplicados

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio			
		DPF	DPC	DPRVA	DPRVB
Bloco	2	842,55*	369,294*	98,410	4,656
Solo	1	798,40*	512,775*	36,206	0,165
Tratamentos d/ Três Marias	11	329,77*	93,123	66,711	50,278
Tratamentos d/ Viçosa	11	175,00	129,447	117,352*	20,532
Resíduo	43	119,19	64,661	47,655	26,048
CV (%)		23,23	23,13	65,98	65,79

*: Significativo a 5 % pelo teste F. #: Significativo a 25 %, para solo, pelo teste F.

Quadro 11A. Análise de variância da eficiência de utilização do P em folhas (EUPF), colmos (EUPC) e raízes em cada vaso da unidade experimental (EUPRVA e EUPRVB), em $t^2 \text{ kg}^{-1}$, considerando o solo e os tratamentos aplicados

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio			
		EUPF	EUPC	EUPRVA	EUPRVB
Bloco	2	49,8191*	3,0218	20,5310	12,1939
Solo	1	0,2397	3,5025#	10,6843#	3,1814
Tratamentos d/ Três Marias	11	12,4455*	7,0021*	27,0330*	7,1375*
Tratamentos d/ Viçosa	11	16,2972*	2,0296*	4,1127	2,4284
Resíduo	43	4,6270	0,9711	7,5492	2,6496
CV (%)		57,16	53,95	101,97	92,64

*: Significativo a 5 % pelo teste F. #: Significativo a 25 %, para solo, pelo teste F.

Quadro 12A. Análise de variância do conteúdo de P de raízes nos vasos da unidade experimental com localização de P^{1/}, em mg/vaso, considerando o solo e os tratamentos aplicados

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio			
		Vaso A		Vaso B	
		-P	+P	-P	+P
Bloco	2	0,0958	1,1900	0,3103	0,8892
Solo	1	0,6363#	0,0002	0,0639	0,9809
Tratamentos d/ Três Marias	5	0,9173*	2,5772	0,5100	2,1111*
Tratamentos d/ Viçosa	5	0,3058	1,2262	0,3699	0,1864
Resíduo	18	0,3352	1,7278	0,2727	0,7284
CV (%)		84,80	78,07	81,90	73,48

^{1/} +P: setor do vaso da unidade experimental com aplicação de P. -P: setor do vaso da unidade experimental sem aplicação de P.

*: Significativo a 5 % pelo teste F. #: Significativo a 25 %, para solo, pelo teste F.