

Produtividade de arroz irrigado por aspersão em terras baixas em função da disponibilidade de água e de atributos do solo

Marília Alves Brito Pinto⁽¹⁾, José Maria Barbat Parfitt⁽²⁾, Luís Carlos Timm⁽¹⁾,
Lessandro Coll Faria⁽³⁾ e Walkyria Bueno Scivittaro⁽²⁾

⁽¹⁾Universidade Federal de Pelotas (Ufpel), Departamento de Engenharia Rural, Campus Universitário, s/nº, Caixa Postal 354, CEP 96010-900 Pelotas, RS, Brasil. E-mail: ma.agro@gmail.com, lctimm@ufpel.edu.br ⁽²⁾Embrapa Clima Temperado, Rodovia BR 392, Km 78, Caixa Postal 403, CEP 96010-971 Pelotas, RS, Brasil. E-mail: jose.parfitt@embrapa.br, walkyria.scivittaro@embrapa.br ⁽³⁾Ufpel, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Campus Porto, Rua Gomes Carneiro, nº 01, CEP 96010-610 Pelotas, RS, Brasil. E-mail: lessandro.faria@ufpel.edu.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi determinar a influência da tensão de água e de atributos físicos e químicos do solo sobre a produtividade do arroz irrigado por aspersão, em terras baixas no Rio Grande do Sul. Na safra 2011/2012, foram avaliados os efeitos das tensões de água no solo de 20 e 40 kPa, durante todo o ciclo da cultura, bem como as de 40 e 20 kPa nas fases vegetativa e reprodutiva, respectivamente. Na safra 2012/2013, foram avaliadas as tensões de 10, 20 e 40 kPa, durante todo o ciclo da cultura, e as de 40 e 10 kPa nas fases vegetativa e reprodutiva, respectivamente. Em ambas as safras, utilizou-se a cultivar de arroz irrigado BRS Pampa. O gasto com água na irrigação por aspersão representou 48% do gasto com a irrigação por inundação. A produtividade do arroz correlacionou-se positivamente com a microporosidade e com os teores de fósforo e potássio disponíveis no solo; e negativamente com a macroporosidade e a saturação por alumínio. A avaliação conjunta da tensão de água e de atributos físicos e químicos do solo permite avaliar com mais propriedade a variabilidade na produtividade de arroz irrigado por aspersão em terras baixas no Rio Grande do Sul. A irrigação por aspersão possibilita melhor uso da água proveniente da precipitação pluvial, com efeitos positivos sobre a economia de água.

Termos para indexação: *Oryza sativa*, economia de água, fertilidade do solo, física do solo, porosidade do solo, tensão de água no solo.

Sprinkler-irrigated rice yield in lowlands as a function of water availability and soil attributes

Abstract – The objective of this work was to determine the effect of soil water tension and physicochemical soil attributes on sprinkler-irrigated rice yield in lowlands of the state of Rio Grande do Sul, Brazil. In the 2011/2012 crop season, the effects of 20 and 40 kPa soil water tensions throughout the crop cycle were evaluated, as well as of 40 and 20 kPa during the vegetative and reproductive phases, respectively. In the 2012/2013 crop season, soil water tensions of 10, 20, and 40 kPa were evaluated throughout the entire crop cycle, and the tensions of 40 and 10 kPa were evaluated during the vegetative and reproductive phases, respectively. In both crop seasons, the irrigated rice cultivar BRS Pampa was used. Water costs with sprinkler irrigation represented 48% of that with flood irrigation. Rice yield was positively correlated with soil microporosity and phosphorus and potassium availability; and negatively correlated with macroporosity and aluminum saturation. The joint evaluation of soil water tension and soil physicochemical attributes allow a better evaluation of the variability of sprinkler-irrigated rice yield in the lowland areas of the state of Rio Grande do Sul. Sprinkler irrigation allows better use of rainwater, revealing positive effects on water economy.

Index terms: *Oriza sativa*, water economy, soil fertility, soil physics, soil porosity, soil water tension.

Introdução

O Brasil é o nono maior produtor mundial de arroz (*Oryza sativa* L.), e o Rio Grande do Sul o principal estado produtor, com aproximadamente 60% da produção nacional do cereal (IBGE, 2015).

Áreas de arroz no RS, assim como nos principais países produtores, são predominantemente irrigadas por inundação, e necessitam da aplicação de elevados volumes de água. Diante do atual cenário de mudanças climáticas e de escassez de água, a busca por sistemas produtivos eficientes quanto ao uso da água tem sido

um desafio constante imposto à pesquisa e ao setor produtivo.

Estudos têm sido realizados em diversas partes do mundo para avaliar a adaptação e a viabilidade do cultivo de arroz irrigado em sistemas que proporcionam economia de água em comparação ao sistema inundado, até mesmo com o uso da irrigação por aspersão (Kahlow et al., 2007; Vories et al., 2013; Kato & Katsura, 2014). Esses autores chegaram a observar economia aproximada de 50% no uso da água pelo arroz irrigado por aspersão, quando comparado com o irrigado por inundação. A irrigação por aspersão também favorece o aproveitamento da água da chuva, em relação ao sistema inundado.

A região da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, apesar de possuir elevado potencial produtivo do arroz, apresenta menor disponibilidade hídrica e, conseqüentemente, demanda mais água para a irrigação do arroz que outras regiões arrozeiras do Estado, em razão de seu relevo ondulado. Assim, a irrigação por aspersão tem surgido como uma alternativa adequada para substituição do método tradicional de inundação. Estimativas dos próprios produtores indicam que o sistema mecanizado com pivô-central usa cerca de 550 mm para a irrigação do arroz, ao longo de todo o ciclo da cultura, ou seja, cerca de metade do volume utilizado no sistema inundado. Esses dados, no entanto, ainda não foram validados pela pesquisa, no Brasil.

Apesar da economia substancial de água, a substituição da irrigação por inundação para aspersão traz fortes mudanças ao ambiente e ao sistema de cultivo do arroz, o que exige adequações no manejo da cultura. Um aspecto importante é que a condição anaeróbica do solo não está presente nos outros sistemas de irrigação e, portanto, é fundamental que se avalie a produção das cultivares de arroz irrigado em ambiente aeróbico (Kato & Okami, 2011; Villa et al., 2011; Adekoya et al., 2014). Nesse contexto, a avaliação dos atributos químicos e físicos do solo também merece destaque, uma vez que, em ambiente aeróbico, não estão presentes várias modificações causadas pela inundação do solo que beneficiam a cultura do arroz (Ranno et al., 2007).

Na irrigação por inundação, os atributos físicos do solo normalmente não são limitantes ao cultivo do arroz, pois o solo encontra-se em forma “fluida”. No entanto, segundo Bamberg et al. (2009), quando solos cultivados com arroz são drenados para cultivos de sequeiro, o crescimento e o desenvolvimento das plantas são prejudicados pelas condições físicas naturalmente

desfavoráveis desses solos. Cabe ressaltar, ainda, que a inundação do solo torna o ambiente mais homogêneo quanto aos atributos hídricos, físicos e químicos; entretanto, em ambiente aeróbico, a variabilidade desses atributos é mais evidente, o que pode ter conseqüências sobre a produtividade do arroz.

O objetivo deste trabalho foi determinar a influência da tensão de água e de atributos físicos e químicos do solo sobre a produtividade do arroz irrigado por aspersão, em terras baixas no Rio Grande do Sul.

Material e Métodos

O experimento foi realizado na estação experimental Terras Baixas, da Embrapa Clima Temperado, no município de Capão do Leão, RS. A área experimental é irrigada por sistema mecanizado de irrigação por aspersão do tipo linear móvel, marca Valley, composto de cinco vãos, além de um vão em balanço, e equipado com válvulas reguladoras de pressão (68,9 kPa), com emissores de água da marca Senninger, modelo I-Wob.

O solo da área experimental é classificado como Planossolo Háptico (Streck et al., 2008), característico das terras baixas tradicionalmente usadas no cultivo do arroz irrigado por inundação. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, ou seja, temperado úmido, com verões quentes.

As avaliações foram realizadas em duas safras agrícolas consecutivas, 2011/2012 e 2012/2013, em áreas distintas e adjacentes, para evitar o monocultivo de arroz. Em ambas as safras, as áreas haviam sido previamente cultivadas com consórcio entre as pastagens de inverno azevém (*Lolium multiflorum*) e cornichão (*Lotus corniculatus*). Essas coberturas de solo foram dessecadas aproximadamente 30 dias antes da semeadura do arroz.

Nas duas safras, utilizou-se a cultivar de arroz irrigado BRS Pampa, de ciclo precoce. À semelhança de outras cultivares de arroz irrigado, essa cultivar, na região, adapta-se melhor ao sistema de cultivo irrigado por aspersão do que cultivares de arroz de sequeiro (Magalhães Júnior et al., 2012). Foram utilizados 100 kg ha⁻¹ de sementes viáveis, no espaçamento entrelinhas de 17,5 cm, em sistema de semeadura direta.

Como adubação básica, aplicaram-se 350 kg ha⁻¹ da formulação N-P₂O₅-K₂O 5-20-20, de forma localizada, no sulco de semeadura. As adubações foram estabelecidas conforme os resultados da análise química do solo e considerando-se uma expectativa

de alta resposta da cultura à adubação, conforme preconizado para o arroz irrigado por inundação (Reunião..., 2010), visto que, até o presente momento, ainda não se dispõem de recomendações de adubação específicas para o arroz irrigado por aspersão.

Na safra 2011/2012, a semeadura foi realizada em 4/11/2011, e a emergência ocorreu em 18/11/2011. As adubações nitrogenadas em cobertura foram realizadas em 7/12/2011, no estádio de quatro folhas, V4 (Counce et al., 2000), com a dose de 85 kg ha⁻¹ de ureia; e em 10/1/2012, no estádio de diferenciação da panícula (R1), na dose de 100 kg ha⁻¹ de ureia. A colheita foi realizada em 28/3/2012.

Na safra 2012/2013, o arroz foi semeado em 15/10/2012, e a emergência ocorreu em 6/11/2012. As adubações nitrogenadas em cobertura foram realizadas em 23/11/2012 (V4), com 130 kg ha⁻¹ de ureia; e em 9/1/2013 (R1), com 66 kg ha⁻¹ de ureia. A colheita foi realizada em 25/3/2013.

O controle de plantas daninhas incluiu a aplicação de herbicidas pré e pós-emergentes, tendo-se levado em consideração as espécies presentes na área e seguido as indicações da pesquisa para a cultura (Reunião..., 2010).

Para o monitoramento da tensão de água no solo, foram utilizados sensores Watermark (Irrometer Company, Riverside, Estados Unidos), instalados a 0,10 m de profundidade, que pode ser considerada a profundidade efetiva do sistema radicular do arroz. Leituras horárias de tensão de água no solo foram realizadas ao longo de todo o ciclo da cultura, e armazenadas em “dataloggers”.

Na safra 2011/2012, foram avaliados três manejos da irrigação para o arroz: manejo 20 kPa, irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo era de 20 kPa, ao longo de todo o ciclo da cultura; manejo 40/20 kPa, irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo era de 40 kPa, durante a fase vegetativa – da emergência (E) até a diferenciação da panícula (R1) –, e quando a leitura média da tensão de água no solo era de 20 kPa, durante a fase reprodutiva – de R1 até a maturação de colheita (R9); e manejo 40 kPa, irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo era de 40 kPa durante todo o ciclo da cultura.

Nessa safra, as parcelas experimentais apresentaram dimensões de 20x40 m, tendo-se utilizado de 12 sensores Watermark.

Na safra seguinte (2012/2013), as dimensões das parcelas foram reduzidas, visando facilitar a aplicação mecanizada de defensivos químicos, e passaram a

ter dimensões de 7x40 m, nas quais foram instalados 14 sensores Watermark. Os manejos da irrigação avaliados foram quatro: manejo 10 kPa, irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo era de 10 kPa, durante todo o ciclo da cultura; manejo 20 kPa, irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo era de 20 kPa, durante todo o ciclo da cultura; manejo 40 kPa, irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo era de 40 kPa, durante todo o ciclo da cultura; e manejo 40/10 kPa, irrigação quando a leitura média da tensão de água no solo era de 40 kPa, durante a fase vegetativa (E a R1), e de 10 kPa, durante a fase reprodutiva (R1 a R9).

As parcelas foram espaçadas 10 m entre si, na safra 2011/2012, e 11 m, na safra 2012/2013. Esse espaçamento entre as parcelas foi utilizado para evitar que a água de irrigação, ou do escoamento superficial entre parcelas, interferisse nos diferentes tratamentos. Em cada parcela experimental, o ponto de instalação dos sensores Watermark correspondeu ao centro da unidade, com 4 m² de área útil de parcela. Nessas unidades, foram coletadas amostras de solo para a realização das análises físicas e químicas, o que totalizou 36 amostras (12 para cada manejo), na safra 2011/2012, e 56 amostras (14 para cada manejo), na safra 2012/2013. Para a determinação da produtividade do arroz, foram colhidos os 4 m² de cada parcela útil.

Quanto à determinação dos atributos físicos do solo, foram coletadas amostras com a estrutura preservada, com uso de anéis volumétricos de 0,03 m de altura por 0,047 m de diâmetro, na profundidade de 0,03 m, para representar a camada de 0,00–0,10 m. Essas amostras foram utilizadas para a determinação da densidade do solo, porosidade total e macro e microporosidade (Donnagema et al., 2011). Amostras de solo com estrutura não preservada foram coletadas na camada de 0,00–0,10 m, com auxílio de um trado de rosca, para a determinação dos seguintes atributos químicos: pH_{água} e teores de alumínio, cálcio e magnésio trocáveis, e P e K disponíveis (Tedesco et al., 1995).

De modo a determinar quais atributos do solo tiveram influência sobre a produtividade do arroz, foram ajustados modelos de regressão linear múltipla, tendo-se utilizado como variável dependente a produtividade da cultura, e, como variáveis independentes, a tensão média de água no solo e os atributos físicos e químicos medidos. Para ilustrar a distribuição espacial desses atributos e da produtividade do arroz, foram gerados mapas de suas distribuições espaciais, considerando-

se apenas os atributos que apresentaram efeito significativo sobre a produtividade do arroz, conforme o modelo de regressão múltipla. Na confecção dos mapas, utilizou-se o método do inverso do quadrado da distância, com o auxílio do software GS+ for Windows version 7.0.24 (Gamma Design Software, Plainwell, MI), e foram considerados 36 pontos, na safra 2011/2012, e 56 pontos, na safra 2012/2013.

Resultados e Discussão

De maneira geral, o total de precipitação pluviométrica (Figura 1) representou, aproximadamente, 50% da água utilizada pelo arroz. Esse resultado indica que sistemas ou manejos da irrigação que permitam o aproveitamento da água da chuva representam alternativa com grande potencial de economia de água, na cultura do arroz.

A lâmina d'água aplicada, com o manejo 20 kPa, na safra 2011/2012, foi 48% menor do que a utilizada por Buss (2012) com irrigação por inundação, em área próxima e com mesmo solo do presente trabalho. Este resultado corrobora os obtidos por Kahlown et al. (2007), em estudo realizado no Paquistão, em solo argiloso, onde o manejo com reposição de

100% da evapotranspiração do arroz (ETc), irrigado por aspersão com canhão hidráulico, proporcionou economia de 45% no uso de água, em comparação ao sistema inundado.

Os valores médios de densidade do solo em todas as áreas (Tabela 1) estiveram muito próximos ao limite

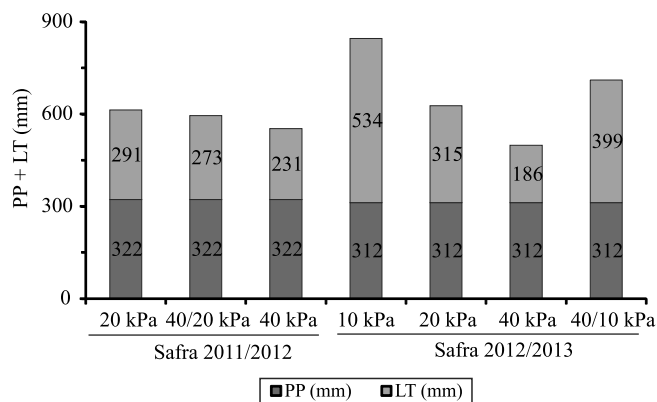


Figura 1. Total de precipitação pluviométrica (PP) e de lâmina d'água (LT) aplicada ao arroz nas safras 2011/2012 e 2012/2013, de acordo com o manejo da irrigação baseado na tensão de água no solo. Manejos 10, 20 e 40 kPa, irrigação com essas tensões médias de água no solo, durante o ciclo da cultura; manejos 40/20 e 40/10 kPa, irrigação com leitura de 40 kPa, na fase vegetativa, e de 20 ou 10 kPa, na fase reprodutiva.

Tabela 1. Caracterização física e química do solo nas áreas com os diferentes manejos de irrigação⁽¹⁾ (20 kPa, 40 kPa e 40/20 kPa) do arroz irrigado por aspersão, na safra 2011/2012.

Atributo	20 kPa			40 kPa			40/20 kPa		
	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo
Ds (kg dm ⁻³)	1,6	1,8	1,5	1,7	1,9	1,5	1,6	1,7	1,5
Ma (%)	4,2	6,1	2,0	3,8	9,8	1,7	4,6	9,1	2,2
Mi (%)	40,2	45,5	36,2	39,8	41,4	36,6	41,2	45,6	37,0
Pt (%)	45,7	47,8	42,2	43,7	50,3	39,6	45,5	49,1	42,3
pH (H ₂ O)	5,3	5,5	5,1	5,5	5,6	5,3	5,4	5,6	5,1
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,5	2,8	2,3	2,4	2,6	2,1	2,7	2,9	2,2
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,0	0,2	0,3	0,1
Ca (cmol _c dm ⁻³)	2,7	3,2	2,3	2,6	3,2	2,3	2,6	3,0	2,1
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,4	0,5	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,5	0,3
P (mg dm ⁻³)	6,8	8,2	5,2	6,2	7,6	4,8	8,5	12,1	6,0
K (cmol _c dm ⁻³)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,04	0,1	0,1	0,1
Na (cmol _c dm ⁻³)	0,20	0,26	0,17	0,21	0,29	0,15	0,30	0,42	0,21
S (cmol _c dm ⁻³)	3,3	3,9	2,9	3,3	3,9	2,8	3,4	4,0	2,9
CTCe (cmol _c dm ⁻³)	3,5	4,0	3,1	2,8	3,6	3,0	3,6	4,3	3,0
CTC _{pH7} (cmol _c dm ⁻³)	5,8	6,2	5,5	5,6	6,1	5,5	6,0	6,4	5,5
V (%)	56,8	63,3	51,0	58,1	65,3	54,5	55,6	63,0	50,0
m (%)	5,4	7,5	2,4	3,2	6,0	0,0	6,2	7,9	3,9

⁽¹⁾Manejo 20 kPa, irrigação com leitura média de tensão de água de 20 kPa, ao longo de todo o ciclo da cultura; manejo 40/20 kPa, irrigação com leitura média de 40 kPa, durante a fase vegetativa, e de 20 kPa, durante a fase reprodutiva; e manejo 40 kPa, irrigação com tensão média de 40 kPa, durante todo o ciclo da cultura. Ds, densidade do solo; Ma, macroporosidade; Mi, microporosidade; Pt, porosidade total; S, soma de bases; CTCe, capacidade de troca de cátions efetiva; CTC_{pH7}, capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V, saturação por bases; e m, saturação por alumínio.

crítico adequado ao desenvolvimento radicular, que, de acordo com Reichert et al. (2003), varia entre 1,70 a 1,80 kg dm⁻³ para solos franco-arenosos.

A macroporosidade apresentou valor médio inferior a 0,10 m³ m⁻³, que é o limite inferior para que se tenha aeração adequada. Abaixo desse limite, a difusão de oxigênio torna-se limitante ao crescimento e desenvolvimento das raízes (Godoy et al., 2015). No entanto, neste estudo, por se ter trabalhado com uma cultivar de arroz irrigado, desenvolvida para o cultivo em condições anaeróbicas, esse atributo não foi, de forma alguma, restritivo. As áreas de produção de arroz irrigado por aspersão da região da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul também são caracterizadas pela baixa macroporosidade, que chega a ser próxima a 0% em algumas áreas.

De acordo com a classificação proposta pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Manual..., 2004), na safra 2011/2012 os valores de pH_{água} obtidos foram baixos, nas áreas com os manejos 20 kPa e 40/20 kPa, e médios, na área com manejo 40 kPa (Tabela 1); os

teores de Mg, P e K, bem como os valores de saturação por bases (V%) e por alumínio (m%), foram baixos, independentemente do manejo de irrigação adotado. Por sua vez, o teor de Ca e os valores CTC_{pH7} foram médios, nos três manejos.

Na safra 2012/2013, os valores médios de densidade do solo nas áreas relativas a todos os manejos de irrigação (Tabela 2) também estiveram muito próximos ao limite crítico adequado ao desenvolvimento radicular (Reichert et al., 2003). Já os valores de pH_{água} foram médios, nas áreas com os quatro manejos de irrigação adotados. Os teores de Ca foram baixos, na área com manejo 20 kPa, e médio nas demais áreas; os de Mg foram altos na área com manejo 40/10 kPa, e médio nas demais áreas; os de P foram baixos na área com manejo 10 kPa, e médio nas demais áreas; os de K foram baixos na área com manejo 40/10 kPa, e médio nas demais áreas; os valores de saturação por bases foram baixos em todas as áreas, e os de saturação por alumínio foram baixos nas áreas com os manejos 10 kPa e 40/10 kPa, e médios, com os manejos 20 kPa

Tabela 2. Caracterização física e química do solo nas áreas com os diferentes manejos de irrigação do arroz irrigado por aspersão, na safra 2012/2013.

Atributo	Manejo da irrigação ⁽¹⁾											
	10 kPa			20 kPa			40 kPa			40/10 kPa		
	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo
Ds (kg dm ⁻³)	1,7	1,8	1,5	1,6	1,7	1,5	1,6	1,8	1,5	1,6	1,7	1,5
Ma (%)	11,2	15,4	7,8	11,9	18,5	9,8	9,0	12,3	4,0	8,4	12,8	2,6
Mi (%)	31,4	34,5	29,9	32,7	36,0	29,6	34,5	41,5	30,0	36,4	38,4	32,5
Pt (%)	42,6	46,5	39,3	44,5	48,5	41,0	43,4	52,4	37,5	44,8	49,6	37,7
pH (H ₂ O)	5,9	6,2	5,7	5,5	5,9	5,1	5,4	5,9	5,0	5,8	6,2	5,2
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,2	2,7	1,7	2,8	3,2	2,4	3,1	3,8	2,8	2,9	3,7	2,1
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,2	0,3	0,2	0,5	0,7	0,2	0,5	0,9	0,2	0,3	0,6	0,1
Ca (cmol _c dm ⁻³)	2,2	2,6	1,8	1,8	2,3	1,5	2,0	2,5	1,4	2,5	3,2	1,7
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,0	1,4	0,9	0,7	0,9	0,5	0,8	1,1	0,5	1,1	1,5	0,8
P (mg dm ⁻³)	12,5	28,7	5,4	16,3	35,0	7,2	25,7	42,8	13,1	15,1	20,3	11,1
K (cmol _c dm ⁻³)	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,08	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Na (cmol _c dm ⁻³)	0,09	0,14	0,06	0,10	0,17	0,06	0,11	0,16	0,06	0,16	0,21	0,12
S (cmol _c dm ⁻³)	3,4	4,3	2,9	2,7	3,4	2,3	3,1	3,9	2,2	3,9	5,0	2,7
CTCe (cmol _c dm ⁻³)	3,7	4,5	3,1	3,2	3,9	2,7	3,6	4,1	3,0	4,2	5,2	3,2
CTC _{pH7} (cmol _c dm ⁻³)	5,7	6,0	5,1	5,5	5,8	5,2	6,2	6,6	5,5	6,8	7,9	5,7
V (%)	60,5	70,8	51,6	49,4	58,5	42,5	49,1	58,0	39,0	56,5	69,9	43,0
m (%)	6,8	8,8	4,1	15,9	24,0	7,2	14,8	28,6	6,0	8,4	15,3	3,8

⁽¹⁾Manejos 10, 20 e 40 kPa, irrigação com tensões médias de água no solo de 10, 20 e 40 kPa, respectivamente, durante todo o ciclo da cultura; e manejo 40/10 kPa, irrigação com leitura de 40 kPa, na fase vegetativa, e de 10 kPa, na fase reprodutiva. Ds, densidade do solo; Ma, macroporosidade; Mi, microporosidade; Pt, porosidade total; S, soma de bases; CTCe, capacidade de troca de cátions efetiva; CTC_{pH7}, capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V, saturação por bases; e m, saturação por alumínio.

e 40 kPa (Tabela 2). Os valores de CTC_{pH7} foram médios, em todas as áreas avaliadas.

Conforme o modelo ajustado na safra 2011/2012 (Tabela 3), a produtividade do arroz diminuiu com o aumento na tensão de água no solo. No manejo 20 kPa, a tensão variou entre 7 e 24 kPa, o que produziu reflexos sobre a produtividade da cultura, que variou de 5.000 e 8.800 kg ha⁻¹ (Figura 2 A).

As maiores produtividades de arroz ocorreram nas áreas onde as tensões de água no solo foram inferiores a 20 kPa (Figuras 2 A e B). Este resultado difere do obtido por Stone et al. (2006), que estabeleceram a tensão de 25 kPa como limite máximo para a irrigação por aspersão do arroz de terras altas do Estado do Mato Grosso. Ressalta-se, porém, que o solo utilizado no presente estudo é representativo de vastas extensões das terras baixas, tradicionalmente cultivadas com arroz irrigado na região Sul do Brasil. Esses resultados reforçam a importância do manejo adequado da irrigação baseado na tensão ideal de água no solo, em razão de seus reflexos diretos sobre a produtividade da cultura.

Como a cultivar BRS Pampa, utilizada neste estudo, foi desenvolvida para cultivo irrigado por inundação, observou-se que condições de disponibilidade de água próximas à saturação (baixas tensões) favoreceram seu desenvolvimento. Zain et al. (2014) compararam o desempenho de uma cultivar de arroz própria para o cultivo irrigado por inundação, nos ambientes inundado, saturado e aeróbico com déficit hídrico (sem irrigação por períodos de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 dias). Os autores observaram que a produtividade foi a mesma nos tratamentos irrigados por inundação e na condição de solo saturado, mas observaram queda de 15% na produtividade, no cultivo com cinco dias sem

irrigação, e superior a 90%, nos cultivos com mais 20 dias de suspensão da irrigação.

Na safra 2011/2012, de acordo com o modelo ajustado (Tabela 3), a macroporosidade relacionou-se negativamente com a produtividade do arroz. Essa relação é mais bem evidenciada com a observação dos mapas de distribuição espacial de cada variável (Figura 2). Nos locais onde a percentagem de macroporos era maior (Figura 2 C), foram observadas maiores tensões de água no solo (Figura 2 B) e menores produtividades (Figura 2 A). A relação negativa observada entre a macroporosidade e a produtividade do arroz pode ser atribuída ao fato de que a retenção de água no solo diminui com o aumento na percentagem de macroporos.

Observou-se também efeito negativo da CTC sobre a produtividade do arroz (Tabela 3), o que contrasta com os resultados de Liu et al. (2014) e Godoy et al. (2015). Esse contraste pode ser atribuído a diferenças na distribuição espacial do atributo. Na Figura 2 D, observa-se que os maiores valores de CTC ocorreram na área com manejo 40 kPa, que propiciou menor produtividade pela menor disponibilidade hídrica para a cultura.

Os atributos P e K relacionaram-se positivamente com a produtividade do arroz (Tabela 3). Portanto, nos locais com os maiores teores dos elementos (Figura 2 E e F), foram observadas as maiores produtividades. Esse resultado está de acordo com os de Anghinoni et al. (2013), que observaram efeito positivo do incremento nas doses de potássio sobre a produtividade do arroz. Liu et al. (2014) também relacionaram as maiores produtividades da cultura a áreas com maiores teores de P e de K disponível, em estudo com 560 lavouras de arroz no Sul da China.

À semelhança da safra anterior, na safra 2012/2013 também foi observado efeito negativo da tensão de água no solo sobre a produtividade do arroz (Tabela 3). No manejo 10 kPa, a tensão média variou de 7,6 a 17,7 kPa e também produziu reflexos diretos sobre a produtividade do arroz, que variou de 4.500 a 7.525 kg ha⁻¹ (Figura 3 A).

A microporosidade esteve positivamente relacionada à produtividade (Tabela 3). Independentemente do manejo, a maior percentagem de microporos favoreceu a produtividade da cultura (Figura 3 A). Este resultado possivelmente esteve relacionado ao fato de que a microporosidade aumenta a retenção de água no solo

Tabela 3. Modelos de regressão linear múltipla para estimativa da produtividade do arroz irrigado por aspersão (kg ha⁻¹), em função da tensão de água e de atributos químicos e físicos do solo.

Safra	Modelo	R ²	Valor p
2011/2012	$Y = 13020,5 - (140,1\tau^{***}) - (173,8Ma^*) + (192,7P^*) + (46,3K^*) - (923,2 CTC_{pH7}^*) - (139,8m^{NS})$	0,79	<0,001
2012/2013	$Y = 4347,9 - (60,9m^{**}) + (112,8Mi^{**}) - (166,5\tau^{***})$	0,66	<0,001

^{NS}não significativo. ***, ** e *Significativo a 0,1, 5 e 10% de probabilidade. τ , tensão de água de solo (kPa); Ma, macroporosidade (%); P, disponibilidade de fósforo (mg dm⁻³); K, disponibilidade de potássio (mg dm⁻³); CTC_{pH7} , capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (cmol_c dm⁻³); m, saturação por alumínio (%); e Mi, microporosidade (%).

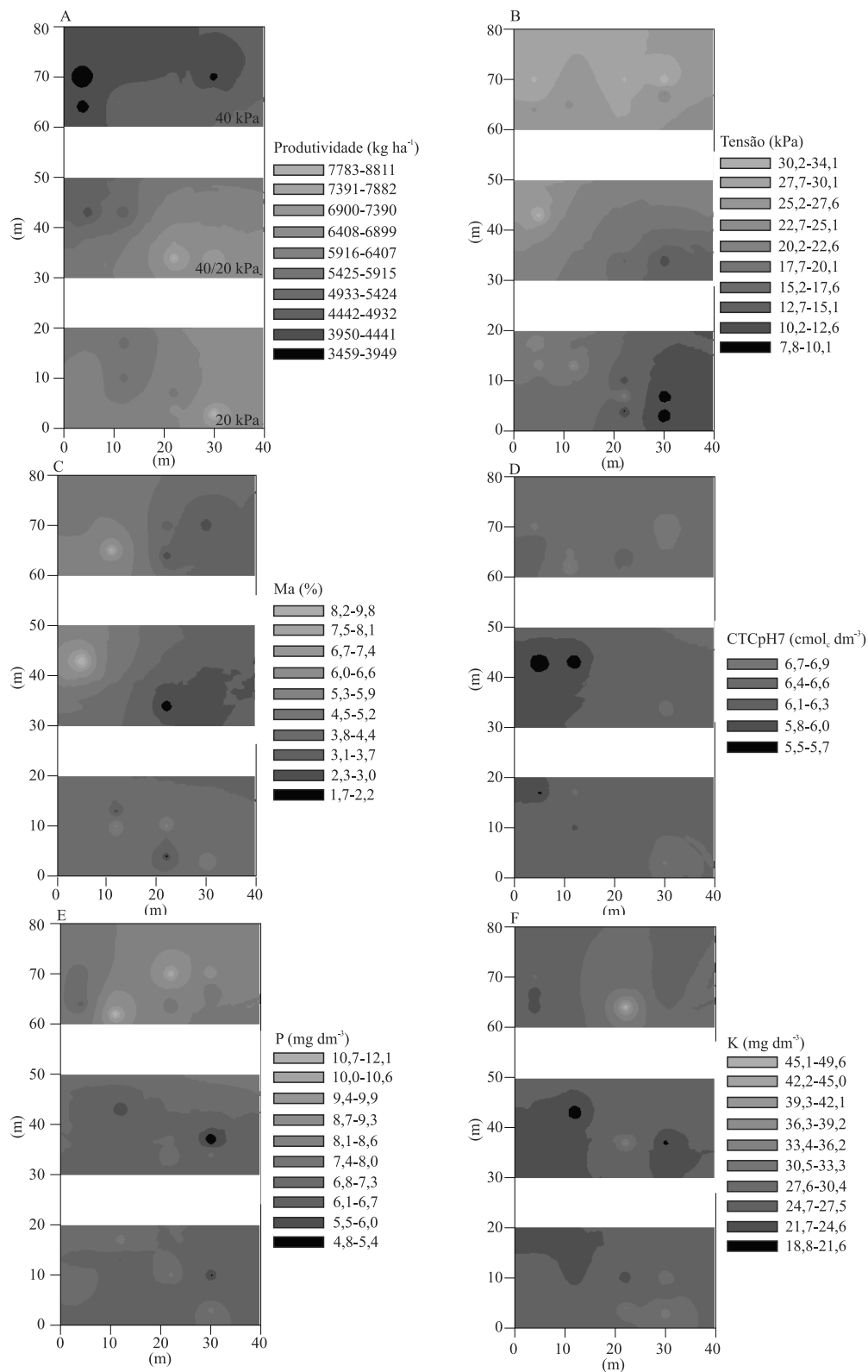


Figura 2. Distribuição espacial da produtividade do arroz (A); da tensão de água (B); da macroporosidade (Ma, C); da capacidade de troca de cátions a pH 7 (CTC_{pH7}, D); e do teor de fósforo (P, E) e de potássio (K, F) no solo, na safra 2011/2012.

e, conseqüentemente, a disponibilidade de água para as plantas.

A saturação por alumínio apresentou efeito negativo sobre a produtividade do arroz (Tabela 3). De acordo com Fageria & Zimmermann (1979), o excesso de alumínio inibe a formação normal da raiz e limita seu crescimento, o que restringe a absorção de nutrientes e de água pela planta, e afeta consideravelmente a produtividade das culturas, principalmente em solos

com baixa fertilidade e sob restrição hídrica. Durigon et al. (2009) relacionaram a variabilidade espacial da saturação por alumínio com a produtividade do arroz irrigado por inundação no Rio Grande do Sul, e também observaram correlação negativa entre os atributos.

Por tratar-se de uma área cultivada por muitos anos, é possível que a variabilidade observada nos atributos físicos de solo tenha sido devida às sucessivas operações mecanizadas de preparo do solo e de cultivo. Já a

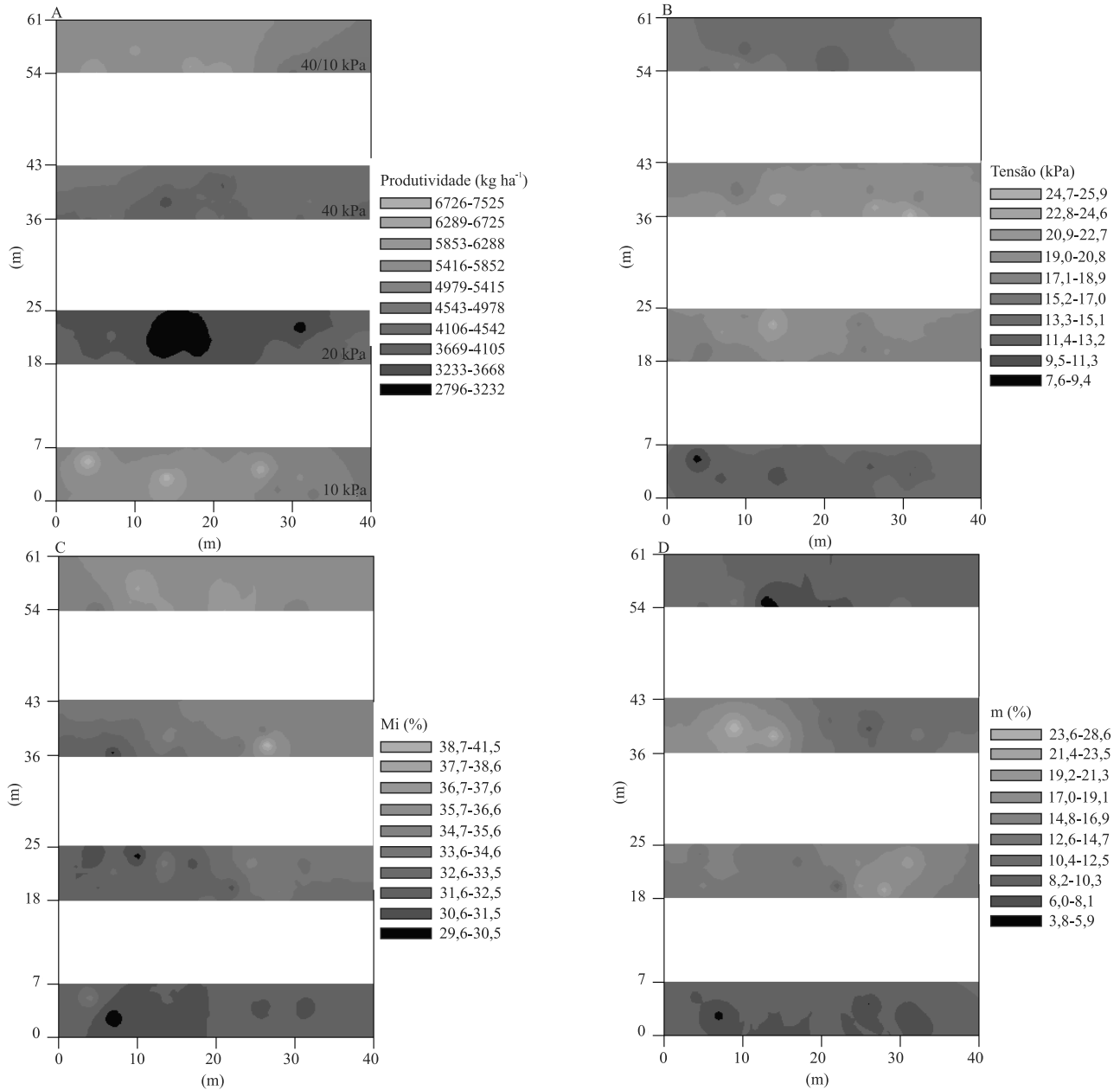


Figura 3. Distribuição espacial da produtividade do arroz (A); da tensão de água (B); da microporosidade (Mi, C); e da saturação por alumínio (m%, D) no solo, na safra 2012/2013.

variabilidade observada nos atributos químicos pode ser atribuída tanto à variabilidade natural do solo, quanto aos diferentes manejos de adubações e à extração diferenciada de nutrientes pelos sucessivos cultivos.

Em geral, houve efeito conjunto da tensão de água no solo e de atributos químicos sobre a produtividade do arroz irrigado por aspersão, o que pode ser atribuído, principalmente, ao fato de a água ser o meio de absorção dos nutrientes pelas plantas. A eficiência das adubações é maior quando as plantas não encontram-se sob déficit hídrico (Sands & Mulligan, 1990); por sua vez, a irrigação é mais efetiva quando não há limitação nutricional no meio de cultivo. Quanto ao efeito dos atributos físicos, os que estão diretamente ligados à retenção de água no solo estiveram mais fortemente associados à produtividade do arroz.

Conclusões

1. A análise conjunta da tensão de água e de atributos físicos e químicos do solo permite avaliar com mais propriedade a variabilidade na produtividade de arroz irrigado por aspersão em terras baixas no Rio Grande do Sul.

2. A produtividade do arroz irrigado por aspersão em terras baixas no Rio Grande do Sul diminui com o aumento da macroporosidade do solo, e é favorecida com o aumento na disponibilidade de fósforo e potássio.

3. A irrigação por aspersão possibilita aproveitar a água proveniente da precipitação pluvial, com efeitos positivos sobre a economia de água.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Processo305593/2011-0 e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul (Fapergs), Programa Decit/SCTIE-MS (Processo 11/2207-0-AGR), pelo apoio financeiro; e à Empresas Valmonte e Embrapa Clima Temperado, pela concessão de infraestrutura.

Referências

ADEKOYA, M.A.; ZAOCHANG, L.; VERED, E.; LIGUO, Z.; DEYAN, K.; JIANYING, Q.; RUIFANG, M.; XINQIAO, Y.; GUOLAN, L.; LIN, C.; LIJUN, L. Agronomic and ecological evaluation on growing water-saving and drought-resistant rice (*Oryza sativa* L.) through drip irrigation. **Journal of Agricultural Science**, v.6, p.110-119, 2014. DOI: 10.5539/jas.v6n5p110.

ANGHINONI, I.; CARMONA, F. de C.; GENRO JUNIOR, S.A.; BOENI, M. Adubação potássica em arroz irrigado conforme a capacidade de troca catiônica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, p.1481-1488, 2013. DOI: 10.1590/S0100-204X2013001100009.

BAMBERG, A.L.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A. da S.; TIMM, L.C.; PINTO, L.F.S.; LIMA, A.C.R. de; SILVA, T.R. da. Densidade de um planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1079-1086, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000500001.

BUSS, G.L. **Emissões de metano e óxido nitroso em cultivo de arroz irrigado por aspersão, alagamento contínuo e intermitente**. 2012. 85p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

COUNCE, P.A.; KEISLING, T.C.; MITCHELL, A.J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, v.40, p.436-443, 2000. DOI: 10.2135/cropsci2000.402436x.

DONNAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B. de; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

DURIGON, R.; SCHLOSSER, J.F.; RUSSINI, A.; DORNELLES, M.E. de C.; PINHEIRO, E.D. Correlações entre atributos químicos do solo e atributos da cultura e da produtividade de arroz irrigado determinadas com técnicas de manejo localizado. **Ciência Rural**, v.39, p.2629-2633, 2009. DOI: 10.1590/S0103-84782009005000206.

FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.J.P. Seleção de cultivares de arroz para tolerância a toxidez de alumínio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.14, p.141-147, 1979.

GODOY, S.G. de; STONE, L.F.; FERREIRA, E.P. de B.; COBUCCI, T.; LACERDA, M.C. Correlação entre produtividade do arroz no sistema semeadura direta e atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.119-125, 2015. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p119-125.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Séries históricas e estatísticas**. Disponível em: <<http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

KAHLLOWN, M.A.; RAOOF, A.; ZUBAIR, M.; KEMPER, W.D. Water use efficiency and economic feasibility of growing rice and wheat with sprinkler irrigation in the Indus Basin of Pakistan. **Agricultural Water Management**, v.87, p.292-298, 2007. DOI: 10.1016/j.agwat.2006.07.011.

KATO, Y.; KATSURA, K. Rice Adaptation to aerobic soils: physiological considerations and implications for agronomy. **Plant Production Science**, v.17, p.1-12, 2014. DOI: 10.1626/pps.17.1.

KATO, Y.; OKAMI, M. Root morphology, hydraulic conductivity and plant water relations of high-yielding rice grown under aerobic conditions. **Annals of Botany**, v.108, p.575-583, 2011. DOI: 10.1093/aob/mcr184.

- LIU, Z.; ZHOU, W.; SHEN, J.; HE, P.; LEI, Q.; LIANG, G. A simple assessment on spatial variability of rice yield and selected soil chemical properties of paddy fields in South China. **Geoderma**, v.235, p.39-47, 2014. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.06.027.
- MAGALHÃES JÚNIOR, A.M. de; PARFITT, J.M.B.; FAGUNDES, P.R.R.; THEISEN, G.; NUNES, C.D.; FRANCO, D.F.; SEVERO, A.C.M.; FONSECA, G. de M. da; STRECK, E.A.; AGUIAR, G.A.; LOPES, J.L.; OLIVEIRA, F.A.; SILVA, D.M. da; SILVA, J.T. da; BRETANHA, G. Rice crop under sprinkler irrigation. In: INTERNATIONAL CROP SCIENCE CONGRESS, 6., 2012, Bento Gonçalves. **Proceedings**. Bento Gonçalves: International Crop Science Society, 2012. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/117965/1/6ICSC-2012-Magalhaes.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2015.
- MANUAL de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, 2004. 394p.
- RANNO, S.K.; SILVA, L.S. da; MALLMANN, F.J.K. Fracionamento do fósforo inorgânico em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.13, p.47-54, 2007.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.
- REUNIÃO TÉCNICA DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 28., 2010, Bento Gonçalves. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil. Porto Alegre: SOSBAI, 2010. 188p.
- SANDS, R.; MULLIGAN, D.R. Water and nutrient dynamics and tree growth. **Forest Ecology and Management**, v.30, p.91-111, 1990. DOI: 10.1016/0378-1127(90)90129-Y.
- STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A.; SILVEIRA, P.M. da. Irrigação. In: MACHADO, P.L.O. de A. de; BIAVA, M. (Ed.). **Cultivo do arroz de terras altas no Estado do Mato Grosso**. Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. (Embrapa Arroz e Feijão. Sistemas de produção, 7).
- STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C. do; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2.ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222p.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. rev. ampl. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (UFRGS. Boletim técnico, 5).
- VILLA, J.E.; HENRY, A.; XIE, F.; SERRAJ, R. Hybrid rice performance in environments of increasing drought severity. **Field Crops Research**, v.125, p.14-24, 2011. DOI: 10.1016/j.fcr.2011.08.009.
- VORIES, E.D.; STEVENS, W.E.; TACKER, P.L.; GRIFFIN, T.W.; COUNCE, P.A. Rice production with center pivot irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, v.29, p.51-60, 2013. DOI: 10.13031/2013.42532.
- ZAIN, N.A.M.; ISMAIL, M.R.; PUTEH, A.; MAHMOOD, M.; ISLAM, M.R. Impact of cyclic water stress on growth, physiological responses and yield of rice (*Oryza sativa* L.) grown in tropical environment. **Ciência Rural**, v.44, p.2136-2141, 2014. DOI: 10.1590/0103-8478cr20131154.

Recebido em 8 de junho de 2015 e aprovado em 19 de novembro de 2016