

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

JONAS MANICA

**Correção de fósforo do solo no sistema de cultivo milho – aveia-branca – soja, em
genótipos com eficiência nutricional contrastante**

Passo Fundo

2021

Jonas Manica

Correção de fósforo do solo no sistema de cultivo milho – aveia-branca – soja, em genótipos com eficiência nutricional contrastante

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção de título de doutor em Agronomia.

Orientador:

Edson Campanhola Bortoluzzi

Coorientador:

Pedro Alexandre Varella Escosteguy

Passo Fundo

2021

CIP – Catalogação na Publicação

M278c Manica, Jonas

Correção de fósforo do solo no sistema de cultivo milho -
aveia-branca - soja, em genótipos com eficiência nutricional
contrastante [recurso eletrônico] / Jonas Manica. – 2022.
2.2 MB ; PDF.

Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de
Passo Fundo, 2022.

Orientador: Prof. Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi.

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Alexandre Varella
Escosteguy.

1. Solos - Correção. 2. Grãos - Cultivo. 3. Plantas -
Efeito do fósforo. 4. Adubos fosfatados. I. Bortoluzzi, Edson
Campanhola, orientador. II. Escosteguy, Pedro Alexandre
Varella, coorientador. II. Título.

CDU: 631.85

Catalogação: Bibliotecária Jucelei Rodrigues Domingues - CRB 10/1569



PPGAgro
Programa de Pós-Graduação
em Agronomia

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a tese

“Correção de fósforo do solo no sistema de cultivo milho – aveia-branca – soja, em genótipos com eficiência nutricional contrastante”

Elaborada por

Jonas Manica

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
“Doutor em Agronomia – Área de Produção e Proteção de Plantas”

Aprovada em: 27/05/2021
Pela Comissão Examinadora

Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador

Dr. Pedro Alexandre Varella Escosteguy
Comissão examinadora - UPF
Coorientador

Dra. Nadia Canali Langaro
Comissão examinadora – UPF

Dr. Alfredo Castamann
Comissão examinadora - UFFS

Dra. Amanda Posselt Martins
Comissão examinadora - UFRGS

Dr. Alexandre Augusto Nienow
Coordenador do PPGAgro

Dr. Eraldo Lourenso Zanella
Diretor da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária,
Universidade de Passo Fundo

Aos meus pais,

Helder Manica (in memorian),

Maria de Lurdes Canali Manica,

aos meus irmãos,

Raquel Manica,

Matias Manica,

meus sinceros agradecimentos pelo apoio para seguir nesta caminhada

A minha amada,

Flávia Biazus,

que sempre me depositou carinho, compreensão e confiança

Aos amigos e orientadores,

Dr. Pedro Alexandre Varella Escosteguy,

Edson Campanhola Bortoluzzi

por ter paciência, dedicação e atenção a mim

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Com imensa alegria venho a agradecer todos que de uma forma me auxiliaram e contribuíram para que essa tese se concretizasse. Através de palavras breves quero de uma forma singela transmitir a gratidão pela imensa força recebida. Desta forma, estendo meus agradecimentos a:

A Deus pela vida, saúde, e companheiro nas horas mais difíceis, e possibilitado que tudo isso acontecesse.

Aos meus pais Helder (in memoriam) e Maria (Dinha), pela vida, possibilidade de estudo, compreensão, carinho e incentivo, por imenso carinho e alegria que tem me passado. Utilizo o exemplo que tens me passado em relação ao amor ao próximo, honestidade, sinceridade, dedicação ao que se fez.

Aos meus irmãos Raquel e Matias, por incentivo ao estudo, carinho e amizade entre nós, que tens me fortalecido.

A minha amada Flávia, que ao longo do tempo tem me incentivado, transmitido confiança e segurança, além do amor e carinho que demonstrado.

Aos meus orientadores Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi e Dr. Pedro Alexandre Varella Escostegy, pela imensa paciência e dedicação que têm tido comigo, juntamente com a excelente orientação e a demonstração de excelência como profissional e pessoas.

Aos integrantes e estagiários do laboratório de Química e Fertilidade do Solo estendo meu agradecimento por auxílio nas atividades, por uma amizade construída, e companheirismo.

Ao PPGAgro por disponibilizar a oportunidade de realização do curso de mestrado.

A CAPES pela concessão da bolsa.

A todos professores integrantes do PPGAgro e FAMV/UPF por um amplo conhecimento transmitido.

Deste modo, a todos de contribuíram e auxiliaram para a realização deste sonho para mim, meu sincero.

MUITO OBRIGADO!

“Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo e pensar uma coisa diferente”. (Roger Von Oech)

RESUMO

MANICA, Jonas. Correção de fósforo do solo no sistema de cultivo milho - aveia-branca - soja, em genótipos com eficiência nutricional contrastante. 117 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2022.

Dentre os fatores que influenciam o efeito da adubação fosfatada em culturas de grãos, o efeito residual dessa adubação em sistemas de culturas, e como isso é influenciado pela eficiência nutricional ao fósforo (P) dos genótipos, ainda é pouco conhecido. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito residual da adubação fosfatada no sistema de culturas milho-aveia-branca-soja, comparando duas estratégias de correção de P do solo: aplicação do fertilizante na linha da semeadura de milho (Estratégia 1) e aplicação na linha de semeadura da aveia-branca (Estratégia 2), em genótipos com eficiência nutricional ao P contrastante. O experimento foi conduzido em campo, em um Latossolo Vermelho Distrófico húmico, sob plantio direto, em Passo Fundo, RS, com os cultivos de milho, aveia-branca e soja. O delineamento experimental foi em blocos casualizados em esquema fatorial (2 estratégias de correção de P) × 2 genótipos x 7 doses de P), com quatro repetições. As doses de correção de P foram: 0; 30; 60; 90; 120; 150; 190 kg P₂O₅/ha. Além dessas doses, aplicou-se 60 kg P₂O₅/ha, como adubação de manutenção. Avaliaram-se para cada cultivo e no sistema de culturas: o rendimento de grãos (RG), a receita líquida, a calibração do teor de P do solo. O RG diferiu entre os genótipos, exceto para os híbridos de milho. O RG da cultivar mais eficiente de aveia-branca (URS Taura) foi cerca de 17% maior que a da UPFPS Farroupilha, resultando em maior receita líquida com a dose de 60 e 90 kg P₂O₅/ha. RG da soja foi cerca de 23% maior na cultivar BMX Ativa (cultivar mais eficiente) em relação a DM53i54 (cultivar menos eficiente), resultando em maiores receitas líquidas sob o efeito residual da dose de 210 kg P₂O₅/ha; e da cultivar não eficiente sob o efeito residual das doses de 150 (Estratégia 1) e 250 kg P₂O₅/ha (Estratégia 2). O RG do sistema milho-aveia-branca-soja, obtido com os genótipos eficientes, foi maior com as doses de 210 kg P₂O₅/ha (Estratégias 1 ou 2). Os maiores RG das cultivares menos eficientes foram obtidos na dose de 250 kg P₂O₅/ha. Os níveis críticos dos teores de P do solo rizosférico, para a adubação fosfatada do sistema milho-aveia-branca-soja, foram de 40 e 20 mg P/kg (Estratégia 1) e de 13 e 16 mg P/kg (Estratégia 2) para os genótipos eficientes e não eficientes, respectivamente. Conclui-se então que o rendimento de grãos obtido no sistema milho-aveia-soja não é influenciado pelas estratégias de correção de P, mas sim varia com as doses de P e a eficiência nutricional ao fósforo (P) dos genótipos testados. As classes de interpretação dos teores de P no solo sugeridas pela pesquisa devem ser adaptadas para uso no sistema milho-aveia-branca-soja, em que a adubação fosfatada é realizada somente no milho e na aveia-branca. A escolha do material genético eficiente nutricionalmente potencializa o rendimento de grãos, com menor demanda de aplicação de P.

Palavras-chave: 1. Estratégias de correção de fósforo. 2. Níveis críticos de fósforo. 3. Eficiência nutricional. 4. Receita líquida 5. Teor de fósforo no tecido.

ABSTRACT

MANICA, Jonas. Soil phosphorus correction in the corn - white oat - soybean cropping system, in genotypes with contrasting nutritional efficiency. 117 f. Thesis (Doctor in Agronomy) – University of Passo Fundo, Passo Fundo, 2022.

Among the factors that influence the effect of phosphate fertilization on grain crops, the residual effect of this fertilization on cropping systems, and how this is influenced by the nutritional efficiency of phosphorus (P) of the genotypes, is still poorly understood. The objective of this research was to evaluate the residual effect of phosphate fertilization in the corn-oat-white-soybean crop system, comparing two soil P correction strategies: fertilizer application in the corn sowing line (Strategy 1) and application in the white oat sowing line (Strategy 2), in genotypes with nutritional efficiency to contrasting P. The experiment was carried out in the field, in a Humic Dystrophic Red Latosol, under no-tillage, in Passo Fundo, RS, with corn, white oat and soybean crops. The experimental design was in randomized blocks in a factorial scheme (2 P correction strategies) × 2 genotypes × 7 P doses, with four replications. Correction doses of P were: 0; 30; 60; 90; 120; 150; 190 kg P₂O₅/ha. In addition to these doses, 60 kg P₂O₅/ha was applied as maintenance fertilization. The following were evaluated for each crop and crop system: grain yield (GR), net income, calibration of soil P content. The GR differed between the genotypes, except for the corn hybrids. The GR of the most efficient cultivar of white oat (URS Taura) was about 17% higher than that of UPFPS Farroupilha, resulting in higher net income with the dose of 60 and 90 kg P₂O₅/ha. Soybean GR was about 23% higher in the BMX Ativa cultivar (more efficient cultivar) in relation to DM53i54 (less efficient cultivar), resulting in higher net income under the residual effect of the dose of 210 kg P₂O₅/ha; and the inefficient cultivar under the residual effect of doses of 150 (Strategy 1) and 250 kg P₂O₅/ha (Strategy 2). The GR of the corn-oat-white-soybean system, obtained with the efficient genotypes, was higher with the doses of 210 kg P₂O₅/ha (Strategies 1 or 2). There is. The critical levels of P levels in the rhizospheric soil, for the phosphate fertilization of the corn-oat-white-soybean system, were 40 and 20 mg P/kg (Strategy 1) and 13 and 16 mg P/kg (Strategy 2 for the efficient and inefficient genotypes, respectively). It is concluded that the grain yield obtained in the corn-oat-soybean system is not influenced by the P correction strategies, but varies with the P doses and the nutritional efficiency to phosphorus (P) of the genotypes tested. The classes of interpretation of P levels in the soil suggested by the research should be adapted for use in the corn-oat-white-soybean system, in which phosphate fertilization is performed only on corn and white oat. The choice of nutritionally efficient genetic material enhances grain yield, with less demand for P application.

Key words: 1. Phosphorus correction strategies. 2. Critical phosphorus levels. 3. Nutritional efficiency. 4. Net revenue. 5. Phosphorus content in the fabric..

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1	<i>Fósforo no solo</i>	19
2.2	<i>Fósforo na planta</i>	21
2.3	<i>Estudos de correlação e faixa de disponibilidade</i>	22
2.4	<i>Estudos de correlação e sistema de manejo</i>	24
2.5	<i>Estratégias de correção de fósforo no sistema de plantio direto</i>	25
2.6	<i>Adubação de sistema</i>	27
2.7	<i>Características de espécies submetidos a restritivo teor de fósforo no solo</i>	30
2.8	<i>Eficiência nutricional dos genótipos</i>	31
2.9	<i>Rendimento líquido</i>	34
3	MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1	<i>Tipo de pesquisa</i>	36
3.2	<i>Área, experimento e genótipos utilizados</i>	36
3.3	<i>Amostragem de solo</i>	38
3.4	<i>Análise de solo</i>	39
3.5	<i>Amostragem e análise de plantas</i>	40
3.6	<i>Calibração de fósforo no solo</i>	40
3.7	<i>Definição de máxima eficiência técnica, econômica e receita líquida</i>	41
3.8	<i>Eficiência nutricional</i>	45
3.9	<i>Análise estatística</i>	46
4	RESULTADOS	
4.1	<i>Cultura do milho</i>	47
4.1.1	<i>Rendimento de grãos</i>	47
4.1.2	<i>Teor de fósforo do solo rizosférico</i>	48
4.1.3	<i>Calibração do fósforo do solo rizosférico no estadio V5</i>	49
4.1.4	<i>Teor de fósforo foliar e grão</i>	50

4.1.5	Eficiência nutricional	51
4.2	<i>Cultura da Aveia-Branca</i>	53
4.2.1	Rendimento de grãos	53
4.2.2	Calibração de fósforo no solo rizosférico no perfilhamneto	56
4.2.3	Teor de fósforo de solo rizosférico na antese	58
4.2.4	Teor de fósforo foliar e no grão	59
4.2.5	Eficiência nutricional	60
4.3	<i>Cultura da soja</i>	61
4.3.1	Rendimento de grãos	61
4.3.2	Calibração de fósforo do solo amostrado antes da semeadura da soja	63
4.3.3	Teor de fósforo do solo no estadiso de florescimento pleno	65
4.3.4	Teor de fósforo foliar e do grão	67
4.3.5	Eficiência nutricional	68
4.4	<i>Rendimento de grãos do sistema-milho-aveia-soja</i>	70
4.4.1	Calibração de fósforo do sistema milho-aveia-soja	72
5	DISCUSSÃO	73
5.1	<i>Rendimento de grãos das culturas</i>	73
5.2	<i>Calibração de fósforo do solo</i>	76
5.3	<i>Eficiência nutricional</i>	81
6	CONCLUSÕES	84
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
	REFERÊNCIAS	87
	APÊNDICES	
Apêndice I	Receita líquida	
Apêndice II	Croqui do experimento	
Apêndice III	Anova cultura do milho	
Apêndice IV	Anova cultura da aveia	
Apêndice V	Anova da cultura da soja	

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a maioria dos solos utilizados para cultivo das principais culturas de grãos, tais como soja, milho e aveia, são Latossolos e Argissolos. Dentre os constituintes minerais desses solos, destacam-se os da classe dos óxidos, sendo os dealumínio, ferro e manganês os mais comuns, que formam ligações químicas predominantemente covalentes com o fósforo (P), indisponibilizado para as plantas. Além disso, os Latossolos e Argissolos têm baixo teor natural e disponibilidade desse nutriente, e devido a reação com os óxidos, mesmo quando esses solos são adubados com fertilizantes fosfáticos. Para que a expressão do potencial produtivo dessas culturas não seja limitada, esses solos requerem adubação de correção de P, que consiste em elevar o teor desse nutriente no solo para a faixa de disponibilidade considerada alta.

As doses de correção do teor de P do solo recomendadas pela pesquisa são baseadas em curvas de calibração, obtidas de experimentos a campo de longa duração. Por outro lado, a aplicação de doses de fertilizantes fosfáticos maiores que as recomendadas podem ocasionar eutrofização dos recursos hídricos quando houver erosão. Além disso, a maior parte do fertilizante utilizado no Brasil é importado, o que remete a um custo elevado, influenciando diretamente no custo para a correção do solo. Sabe-se que as reservas mundiais de minérios fosfáticos são limitadas, o que pode comprometer a agricultura no futuro. Assim, deve-se estudar a reposição de cada espécie e cultivar de planta aos teores de P adicionados ao solo no âmbito de estratégias precisas para melhor eficiência da adubação de correção. No entanto, as recomendações da pesquisa devem ser atualizadas, acompanhando a evolução dos sistemas de cultivos e da eficiência nutricional dos genótipos, em relação ao P do solo.

No Brasil, o sistema predominante em cultivos de grãos é o plantio direto. Nesse sistema, a aplicação de fertilizantes fosfáticos, seja para a correção ou manutenção do teor

de P do solo, é praticada anualmente, quando o objetivo é a produção de grãos. Na região subtropical do Brasil, as doses recomendadas para a adubação de correção de P no solo foram adaptadas dos estudos de calibração que iniciaram na década de 60 e se estenderam ao longo das décadas de 70 e 80. Nessas décadas, o sistema de cultivo utilizado era o preparo convencional (SPC), com incorporação do fertilizante na camada de 0-20 cm do solo, mas essa prática não é a mais utilizada atualmente, já que predomina o sistema plantio direto (SPD) nos cultivos de grão do Brasil. A incorporação do fertilizante fosfatado no solo propicia maior fixação e indisponibilidade do P aplicado, devido ao maior contato desse com os constituintes do solo e exige uma maior dose de correção de P. Por outro lado, uma parte do P retido no solo está em formas lábeis e pode ser recuperado pelas culturas. Contudo, as questões a serem respondidas são: quanto tempo ou quantos cultivos de grãos podem ter a demanda atendida pelo estoque de P no solo? e qual é a magnitude de P aplicado via adubação fosfatada que poderá servir no contexto de adubação de sistema?

No SPD, para a correção de P do solo, recomenda-se a aplicação desses fertilizantes na linha de semeadura, em sulco aberto pouco abaixo e ao lado da semente. Isso diminui a indisponibilidade de P por fixação específica de P aos óxidos. Entre outros fatores, o menor contato do P do fertilizante com os constituintes do solo, que adsorvem P, ou o maior teor de matéria orgânica da camada mais superficial, favorece a disponibilidade desse nutriente. Contudo, as doses de correção indicadas pela pesquisa para a aplicação de P na linha de semeadura são pouco maiores que as obtidas em estudos de calibração, realizados até a década de 80, para o SPC, embora essa seja para corrigir o teor de P da massa de solo presente em toda a camada de 0 a 20 cm. Em parte, o aumento da dose de correção de P atualmente proposto para o SPD tem sido atribuído as maiores produtividades e a degradação do solo, principalmente, das propriedades físicas que influenciam a adsorção de P. Entre outros, a compactação e a perda de P em sedimentos da enxurrada são exemplos desses fatores e ocorrem frequentemente em solos argilosos, em que as práticas de manejo de solo e de culturas não seguem o preconizado pela pesquisa. No SPC, a compactação do solo era amenizada com a aração e gradagem, realizadas antes do cultivo, e o P era corrigido até a profundidade de 20 cm, possibilitando que as raízes explorassem maior volume de solo que o verificado no SPD. Contudo, o SPD possibilita maior teor de matéria orgânica (maior quantidade de P orgânico) e,

consequentemente, maior atividade biológica do solo disponibilizando maiores quantidades de P às plantas.

Além disso, as cultivares utilizadas nos estudos de calibração das culturas de grãos, realizados nas décadas passadas, diferem das atuais. As cultivares atuais, em geral, têm menor produção de massa de colmo e de folha e maior índice de colheita, além de menor volume de sistema radicial. Isso reflete diretamente na capacidade de aquisição do P do solo e limita a absorção desse nutriente e água das camadas mais profundas do solo, o que compromete a produção de grãos das culturas de verão. Sabe-se que, em uma mesma espécie de plantas, existem cultivares ou híbridos, com diferenças genéticas, quanto a capacidade de absorção e de uso do nutriente absorvido e, consequentemente, diferenças de eficiência nutricional são verificadas em solos com mesmo teor de nutriente. Assim, é importante avaliar como as doses de correção de P do solo, atualmente recomendadas, refletem entre os genótipos de culturas de grãos quanto a eficiência nutricional.

No SPD, o P do solo concentra nos primeiros centímetros da camada superficial. Isso favorece a difusão desse nutriente até a raiz, pois, esse processo aumenta na medida em que o P estiver mais próximo do sistema radicial, desde que a umidade e a concentração desse nutriente na solução do solo e o sistema radicial sejam adequados. O maior crescimento das raízes requer teor adequado de P do solo e em profundidade, mas isso não é comum no SPD. Em solos típicos do cultivo de grãos no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, o crescimento radicial pode ser considerado adequado quando as raízes exploram o volume de solo da camada de 0-20 cm. No entanto, a principal estratégia de correção de P do solo adotada nesses cultivos é aplicar o fertilizante fosfatado na linha da semeadura da cultura de inverno, a aveia ou o trigo, ou a aplicação a lanço do fertilizante, antes de semear essas culturas. Essa estratégia concentra o P aplicado nos primeiros 5 cm da superfície do solo. Nessa situação, a raiz concentra na superfície, em camadas de solo com maior teor de P, e a adequada disponibilidade de água possibilita a difusão desse nutriente até a raiz. Por outro lado, em situação de déficit hídrico, a raiz cresce mais em profundidade, em camadas com menor teor de P, o que limita o potencial de produção de grãos. A correção desse nutriente em camadas de solo mais profundas é importante para a produção de grãos, principalmente, em áreas manejadas com o SPD e sem irrigação.

Nesse sentido, este estudo comparará a correção de P aplicando o fertilizante fosfatado na linha da cultura de milho, a 10 cm de profundidade (Estratégia 1) com a correção de P na linha da cultura de aveia-branca, a 3 cm de profundidade (Estratégia 2), e o efeito residual dessas estratégias na cultura da soja, utilizando genótipos com eficiência de uso de P contrastantes.

Resultados de pesquisa que estudem os aspectos mencionados em relação a adubação fosfatada são importantes, pois podem melhorar a recomendação da pesquisa, potencializando o rendimento das culturas de grão e diminuindo os riscos de impactos ambientais, em solos que requerem correção dos teores de P. Nesse contexto, as seguintes perguntas de pesquisa motivaram este estudo, considerando solos argilosos, em SPD, e cultivados com o sistema de cultura milho-aveia-branca-soja:

- qual a dose de P que proporciona maior rendimento de grãos de cada cultura e do sistema de cultura milho-aveia-branca-soja? E essa dose varia em relação a genótipos e quando o fertilizante fosfatado é aplicado na linha de semeadura do milho ou da aveia-branca?

- qual os teores desse nutriente, na camada de 0-10 cm, de cada cultura e do sistema de cultura milho-aveia-branca-soja? estimar a eficiência nutricional dos genótipos quanto a correção de P for realizada na linha de semeadura do milho e da aveia-branca?

A hipótese geral do estudo é que, em solo manejado em SPD, a dose de correção de P no sistema de culturas milho-aveia-branca-soja varia com a dose de P adicionada, a estratégia de aplicação (na semeadura do milho x na semeadura da aveia-branca) e a eficiência nutricional dos genótipos. A tese foi estruturada com as seguinte hipótese específica:

O rendimento de grão e a receita líquida da cultura de milho, aveia-branca e soja, e acumulado em um sistema de cultivo formado com essas culturas, varia com a eficiência nutricional dos genótipos e a estratégia de correção de P do solo, em SPD.

O objetivo geral do estudo foi determinar a estratégia de adubação fosfatada que entrega mais rendimento de grãos com menor quantidade de P aplicado do sistema de culturas milho-aveia-branca-soja, em genótipos com eficiência nutricional contrastante, em relação ao P. Estratégia de adubação é utilizada neste estudo para diferenciar a correção de P aplicando o fertilizante fosfatado na linha de semeadura do milho com a aplicação na linha de semeadura da aveia-branca.

Os seguintes objetivos específicos foram abordados na tese:

– avaliar o efeito das doses de P (30, 60, 90, 120, 150, 190 kg de P_2O_5 /ha), aplicadas na linha de semeadura de milho e de aveia-branca, no rendimento de grãos, receita líquida, teor e P do solo e da planta, índices de eficiência nutricional ao P (recuperação aparente, eficiência fisiológica, eficiência de utilização interna, eficiência agronômica e eficiência agronômica parcial) de genótipos (cultivares e híbridos) de milho, aveia-branca e soja, com eficiência nutricional contrastante, em relação ao P.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O esclarecimento da dinâmica do P em solo sob SPD, bem como a eficiência nutricional dos principais genótipos das culturas de grãos cultivadas nesse sistema é fundamental para definir as classes de disponibilidade de P, para essas culturas. A resposta das culturas ao incremento de P no solo é influenciada pelos atributos do sistema radicial e a colonização micorrízica, que, por sua vez, influenciam o teor crítico para cada espécie, bem como a estratégia de correção do P.

2.1 Fósforo do solo

As principais formas de P no solo se dividem, basicamente, em duas partes: P orgânico (presente na matéria orgânica) e P inorgânico. As principais formas de P orgânico são o fosfato de inositol, os ácidos nucleicos e os fosfolipídeos. As formas de P inorgânico dos solos são basicamente os ortofosfatos. Nessa forma, o P pode estar ligado a cátions, como o hidrogênio, em solos ácidos, o ferro (Fe), o alumínio (Al), o amônio e o cálcio (Ca), típico de solos alcalinos. Outras formas de P também influenciam a dinâmica e a disponibilidade desse nutriente no solo, como o P ligado a matéria orgânica humificada, a apatitas, precipitados envelhecidos e fosfatos oclusos (WANG; CHRISTIE, 2005).

O solo pode ser considerado fonte ou dreno de disponibilidade de P às plantas, dependendo de sua constituição e propriedades. O solo é fonte de P quando o teor disponível desse nutriente é suficiente para atender a necessidade das plantas. Em solos mais intemperizados, como os Latossolos, o caráter dreno predomina, já que esse tipo de solo é mais eletropositivo, aumentando a retenção de ânions, como o fosfato. Além disso, o maior teor de argila dos Latossolos aumenta o caráter-dreno, em relação a solos menos intemperizados, em que predomina o caráter fonte (NOVAIS et al., 2014).

Embora o teor total de P dos solos varie entre 200 e 3000 mg kg⁻¹, menos de 0,1% desse total encontra-se na solução do solo. Em solos agrícolas, os valores de P em solução variam, tipicamente, entre 0,002 e 2,0 mg L⁻¹. A maior parte do P total é

considerável não-lábil, ou seja, não é disponibilizado para a solução do solo e não está em forma disponível às plantas. O P lábil, ou disponível, é o presente na matéria orgânica, argilos-minerais e óxidos, estando adsorvido a superfícies desses constituintes, mas com uma ligação química fraca, característica de adsorção não específica de íons. O P adsorvido dessa forma pode ser liberado constantemente para a solução do solo. Essa fonte de P é importante, pois a concentração desse nutriente na solução do solo é baixa, e com isso há necessidade de liberação constante do P lábil para a reabastecer a solução, a fim de atender a demanda das plantas, na medida em que essas absorvem o nutriente da solução do solo (NOVAIS et al., 2014).

A retenção de P adicionado com fertilizantes no solo, na forma não-lábil, ocorre tanto pela precipitação desse nutriente em solução, ao reagir com cátions polivalentes, como o Fe, Al, manganês e o Ca. Em solos ácidos e intemperizados, como os Latossolos, isso ocorre, principalmente, com a adsorção do P adicionado em oxidróxidos de Fe e de Al, pois esses são um dos constituintes minerais que predominam em solos mais intemperizados, particularmente, nos mais argilosos, como os Latossolos e Argissolos (NOVAIS et al., 2014; ROSSET et al., 2016).

O P não-lábil é o adsorvido na superfície dos constituintes do solo com ligação química covalente. Essa ligação retém fortemente o P, característica da adsorção específica de ânions. Inicialmente, o P aplicado com fertilizantes é adsorvido à superfície de agregados de solo e difunde-se, com o tempo, para o interior desses. Esse é um processo lento, responsável pela diminuição da disponibilidade de P no solo, com o aumento de contato entre esse e o solo (SALVAGOTTI et al., 2013). Assim, a capacidade de adsorção de um solo pode ser considerada uma medida do “desaparecimento” de P em solução e formação do P não-lábil. A matéria orgânica (MO) tem relação positiva e significativa com a adsorção de P. A razão principal para isso acontecer deve-se ao caráter aniônico da MO que, por via de pontes de cátions, com Fe, Al e Ca a ela adsorvidos, que retêm o P. Contudo, alguns trabalhos mostram que a MO tem a capacidade de reduzir a adsorção de P em solos. Esse efeito é atribuído aos ácidos orgânicos (fúlvicos, húmicos e húmicos), os quais bloqueiam os sítios de adsorção, ou solubilizam os oxidróxidos de Fe, diminuindo a superfície de adsorção do fosfato (ROSSET et al., 2016).

2.2 Fósforo na planta

O P é ubíquo no metabolismo das plantas. Não passa por trocas de valência em seus múltiplos papéis na bioquímica de vegetais, permanecendo pentavalente, como fosfato (PO_4^{3-}) ou pirofosfato ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$). Participa de vários processos metabólicos em plantas, como transferência de energia, síntese de ácidos nucleicos, glicose, respiração, estabilidade de membrana, fixação de N_2 , metabolismo de carboidratos, reações redox, ativação e desativação de enzimas (EPSTEIN; BLOOM, 2006; SBCS, 2007). Entretanto, esse nutriente, em comparação com os outros macronutrientes, é menos móvel e disponível para as plantas na maioria das condições de solo.

O nível de P do solo pode afetar o acúmulo desse nutriente nos tecidos das plantas. A maior disponibilidade desse nutriente possibilita maior capacidade da planta em expressar o potencial produtivo, além de possibilitar maior acúmulo de P na parte aérea e no grãos (EPSTEIN; BLOOM, 2006, FAGERIA; MOREIRA; CASTRO, 2011). Esse efeito é crescente, até que a planta atinja o máximo rendimento relativo. A partir daí a planta não responde em produção de massa seca, mas pode acumular mais P em tecidos celulares, o que é denominado consumo de luxo (SBCS, 2007).

Uma das explicações para a menor produção de grãos de plantas cultivadas em solos deficientes em P, é que essas retêm maior nível desse nutriente em raízes, diminuindo a translocação para os sítios fotossinteticamente ativo nas folhas (TAIZ; ZEIGER, 2017). Isso indica a importância de partição desse nutriente na planta, para entender o efeito na produção de grãos a ENP dos genótipos. Para alta ENP, genótipos de cereais devem ter maior absorção desse nutriente e também maior translocação e incorporação na massa seca da parte aérea, transferindo o P para o grãos (MANSCHADI et al., 2014). Os grãos são o meio de perpetuação das espécies de cereais tem a elevadas quantidades de P no endosperma suficientes para possibilitar os processos que gerem energia para suprir a necessidade do embrião no momento da germinação (KERBAUY, 2008; GUIMARÃES et al., 2016). Assim, plantas com maiores concentrações de P em tecidos (raiz, colmo e folha) toleraram melhor solos com baixa disponibilidade desse nutriente, pois a quantidade de P para a "manutenção" é menor (BALMFORD; GREEN; SHARLEMANN, 2005; DOBERMAN, 2007). Segundo os autores Hammond; Broadly; White, (2004) e Lambers; Maratinoia; Renton, (2015) o acúmulo de P na folha pode ser

utilizado a fim de selecionar genótipos com maior eficiência nutricional ao P, quando esses são submetidos a restrição desse nutriente. O nível de nutrientes na planta que possibilita a expressão do potencial produtivo varia com a espécie, entre outros fatores (WENDLING et al., 2016).

Uma gramínea bem nutrida para desenvolver seu potencial produtivo, apresenta a faixa de 0,1 a 0,5% de P em tecidos foliar, ou média de 9 kg por tonelada de matéria seca produzida (RODRIGUES et al., 2016; MANICA; ESCOSTEGUY, 2019). Já leguminosas como a soja, tem em média 14 kg de P_2O_5 por tonelada de grão (RODRIGUES et al., 2016). Gramíneas como leguminosas acumulam mais P nos grãos cerca de 12 kg de P_2O_5 por tonelada de grão produzido (BONA et al., 2016). Essa característica está diretamente ligada a função do P na formação de ácido fítico nos grãos, o qual serve de fonte de energia para germinação da semente e o desenvolvimento inicial até que seja ativado a fotossíntese de planta (ANTHONY et al., 2013).

2.3 Estudos de correlação e faixa de disponibilidade

Para determinarmos o teor de determinado nutriente no solo é necessário a utilização de um método químico. Para extrair nutrientes em forma disponível para as plantas, deve-se utilizar um método que estima a capacidade da planta em adquirir esse nutriente. No entanto, conhecer o teor no solo não é suficiente, uma vez que para ter a expressão do máximo potencial produtivo deve-se conhecer qual o teor correspondente de nutriente no solo. Para estabelecer os valores de referência de cada nutriente, que possibilitam a expressão de determinado rendimento da cultura, utiliza-se curvas de correlação entre o teor do nutriente no solo e a resposta das culturas a adubação, o que é conhecido como curva de calibração da análise de solo (SCHLINDWEIN; GIANELLO, 2004; SCHLINDWEIN et al., 2011; SALVAGOTTI et al., 2013; SUCUNZA et al., 2018).

Para obter as curvas de correlação são realizados experimentos a campo com diferentes solos (com baixo teor do nutriente para que a curva de resposta a adubação seja uma função quadrática), anos e espécies de plantas, com doses crescentes de determinado fertilizante no solo, bem como, a testemunha sem a adição do nutriente

(SALVAGOTTI et al., 2013). Por exemplo, para se obter a curva de resposta a P no solo utiliza-se solos com teores adequados de todos os nutrientes e a acidez corrigida, exceto o P. Dessa forma pode-se ter resposta quadrática em rendimento de grão, em função das doses de P. Os experimentos devem ser realizados para cada espécie de planta e definido a calibração individual para cada cultura, bem como o cultivo em diferentes solos (WENDLING et al., 2008; SCHLINDWEIN et al., 2011; GATIBONI et al., 2016).

A realização de experimentos de correlação, se deve a necessidade de representar nos modelos matemáticos da curva de resposta a influência da constituição mineralógica, característica de cada solo, na disponibilidade do nutriente. Além disso se deve representar em diversos locais a influência do clima na resposta a adubação, realizando ensaios (CAIRES et al., 2017; SUCUNZA et al., 2018). Após cultivado, a produção de determinada espécie no tratamento controle (sem a aplicação do nutriente testado) é utilizada como testemunha no cálculo da produção relativa. Utiliza-se a produção relativa para diminuir a interferência de fatores não controláveis, o que possibilita reunir todos os dados produzidos (cultivos em diversos solos, anos e espécies) em uma única base de resultados, promovendo a comparação entre todos os fatores estudados (WENDLING et al., 2008; SCHLINDWEIN et al., 2011). Segundo a Gatiboni et al. (2016), a classificação de faixa de P em solos do RS e de SC é subdividido a em: Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto que correspondem ao rendimentos relativos de 40%, 40-75%, 75-90%, 90% até o dobro do valor definido. A faixa do teor alto inicia após o teor crítico do nutriente no solo até duas vezes este valor. Após o dobro desse valor é definido como a faixa do muito alto. Já o teor crítico do nutriente no solo é definido como 90% do RR (GATIBONI et al., 2016). Considerando esse contexto, este estudo reconheceu como importante determinar o nível crítico de P, para o cultivo das principais culturas de grãos, cultivadas em um Latossolo manejado com o SPD.

A revisão desse último item indica que há necessidade de mais estudos que determinem as doses para a correção do teor de P, bem como a definição do nível crítico para as atuais situações de cultivo de solos manejados com o SPD e cultivado com culturas de grão. Além disso, há necessidade de se avaliar o efeito da estratégia de aplicação de fertilizantes fosfáticos na linha de semeadura das culturas que antecedem a

soja, para verificar se o P aplicado em maior profundidade na semeadura de verão beneficia o rendimento dessa leguminosa.

2.4 Estudos de correlação e sistema de manejo

Na década de 80 e início de 1990, a maioria dos estudos de calibração foram realizados, para solos do RS e SC, manejados com o SPC (CUBILLA et al., 2007). Esse sistema de cultivo era manejado, geralmente, com escarificação, aração e gradeação, para posteriormente implantação da cultura. Com esse manejo de solo havia a incorporação de corretivos e fertilizantes na camada de 0-20 cm, que, genericamente, não tinha maiores impedimentos físicos ao crescimento das plantas. Por outro lado, a movimentação intensa de solo proporciona menor acúmulo de matéria orgânica no solo e, conseqüentemente, atividade biológica e armazenamento de alguns nutrientes (B, S, N e P) (NUNES et al., 2008). Assim, os estudos que definiram os teores de P e as faixas de interpretação desse nutriente no solo, foram baseados nessas condições (KOCHHANN; DENARDIN, 2000; SUCUNZA et al., 2018).

A substituição do SPC pelo SPD promove alterações na dinâmica dos nutrientes na camada superficial do solo, principalmente de 0-10 cm, formando um gradiente de fertilidade no solo devido a estratificação dos nutrientes no perfil do solo, com maior concentração em camadas superficiais, além das alterações substanciais nos atributos físicos e biológicos (ELTZ et al., 1989; ANGHINONI, 2007; CIOTTA et al., 2002; COSTA et al., 2009). Já o SPC possibilita uma homogeneização das camadas do solo, incorporando corretivos e fertilizantes em toda camada arável (0-20 cm) (BAYER; MIELNICZUK, 1997; NUNES et al., 2008).

Quando da substituição do SPC pelo SPD, foram realizado poucos estudos (principalmente nos em Latossolos) de calibração de doses de P, para a correção e manutenção desse nutriente. Por outro lado, as recomendações de doses de correção de P, atualmente sugeridas pela pesquisa, para o SPD, foram adaptadas das calibradas no SPC (GATIBONI et al., 2016). Isso pode ser questionável, já que a dinâmica do nutriente no solo, bem como a estrutura física e biológica, serem diferentes no solo, entre esses

dois sistemas. Assim, há uma lacuna de trabalhos científicos que indiquem se a adubação de correção atualmente em uso está adequada.

Muitas vezes a concentração de nutrientes na camada superficial passa a ter papel negativo no rendimento das culturas devido a formação de outros compostos, e complexos nutrientes com outros nutrientes, bem como a competição por sítios de absorção. Essa maior concentração de nutrientes na camada superficial é explicada pela baixa mobilidade dos nutrientes, em especial ao fósforo (ligado aos óxidos) e potássio (ligado as cargas do solo), impossibilitando a mobilidade dos nutrientes nas camadas mais profundas do solo. Isso se deve as características mineralógicas da maioria dos solos do Sul do Brasil (RS e SC). Dessa maneira há necessidade de novos estudos nas atuais situações de cultivo, com os atuais materiais genéticos cultivados, a fim de determinar a real adubação de correção e manutenção necessária para definir o teor crítico no solo e a necessidade de nutrientes demandada por culturas de grão.

2.5 Estratégia de correção de fósforo no sistema de plantio direto

O SPD teve início da década de 1990 e atualmente é o sistema de cultivo de grãos mais utilizado no Brasil, abrangendo aproximadamente 65% da área cultivada com culturas anuais produtoras de grãos (MAPA, 2020). Como mencionado no item anterior, os Latossolos e Argiloso, em geral, têm elevado teor de argila e, nessas partículas, predominam os óxidos de Fe e de Al, os quais têm alta capacidade de adsorção do P do solo, indisponibilizando esse nutriente para as plantas. Com isso, esses solos requerem adubação de correção de P, com aplicação de doses elevadas. Para a recomendação dessas doses, trabalhos de pesquisas devem ser realizados para se conhecer os níveis críticos de P em culturas de grão. Com isso, o teor de P do solo pode ser corrigido, em faixa de disponibilidade adequada para o potencial produtivo.

A adoção do SPD, em substituição ao SPC, tem proporcionado alteração na estrutura física do solo, menor contato do P com as partículas do solo, ou seja, com os óxidos de Fe e de Al, maior estratificação de nutrientes, concentrando o P em camadas mais superficiais do perfil do solo, maior atividade biológica, e modificação da estrutura

do sistema radicial, o que influencia a dinâmica dos nutrientes, incluindo o P, e a relação solo-planta (ANGHINONI, 2007).

Enquanto no SPC há mais uniformidade dos atributos químicos e físicos do solo, na camada arável (0-20 cm), devido ao revolvimento anual (BAYER; MIELNICZUK, 1997), nos solos manejado com o SPD há, em muitas situações, compactação da camada superficial, devido ao tráfego intenso de máquinas e ao mínimo revolvimento. Assim, a infiltração de água é menor nesse último sistema, dessa forma a mobilidade de P no solo é reduzida, influenciando na estratificação dos nutrientes no perfil do solo, e o P concentra mais na camada superficial (SCHLINDWEIN; ANGHINONI, 2000; CIOTTA et al., 2002; COSTA et al., 2009). Essa concentração de nutrientes na camada superficial também está relacionada com a ciclagem de nutrientes das plantas de cobertura, as quais absovem os nutrientes de camadas mais profundas do solo, liberando-os, após a decomposição, para a superfície do solo. Devido a baixa mobilidade da maioria dos nutrientes no solo, principalmente do P, esses concentram na superfície. No SPD, não há revolvimento do solo, de forma intensiva, como ocorria no SPC, com isso há formação um gradiente químico no perfil do solo.

Na camada superficial de solos manejados com SPD, geralmente, o pH é mais elevado, devido a aplicação de calcário. Isso diminui o teor de Al e de Fe em solução e em formas trocáveis, diminuindo a passagem do P lábil para a forma de não lábil, aumentando a disponibilidade desse nutriente, na camada superficial (MALAVOLTA, 2007; LEITE et al., 2018). Contudo, a aquisição do P dispoteor depende também da sua difusão à superfície de raízes, o que é influenciado pela umidade do solo (NOVAIS et al., 2007). Como essa é menor na superfície do solo, ou seja, aumenta nas camadas mais profundas do perfil do solo, em situação de déficit hídrico, a absorção de P no SPD pode ser mais limitante, que no SPC. Muitas áreas cultivadas no SPD, foram antes manejadas no sistema convencional, por outro lado muitas áreas foram implandado o sistema de plantio direto sem a correção da acidez e de P em profundidade.

Cerca de 70% das áreas atualmente utilizadas com cultivo de grãos foram implantadas o SPD, sem antes ter sido cultivada com o SPC. Essas áreas em geral tem acentuação na estratificação de nutrientes e no teor de alumínio tóxico em profundidade. Nessas áreas não foi seguido as recomendações descritas por Gatiboni et al., 2016 nas

áreas a serem cultivadas com o SDP, há necessidade da correção da acidez e incorporação de nutrientes na camada de 0-20 cm. Sabe-se que na maioria das áreas foi implantado o cultivo de grão somente com aplicação de corretivos e fertilizantes em superfície. Com isso a estratificação de P é mais intensa nessas áreas, as quais necessitam de correção desse nutriente em profundidade. Contudo, muitos produtores não querem realizar a incorporação desse fertilizante, devido aos riscos de erosão e a desestruturação do solo. Como alternativa deve-se definir qual a melhor estratégia de correção de P, para possibilitar a aplicação desse elemento nas camadas mais profundas, sem revolvimento do solo.

Sabe-se que o P no solo tem baixa mobilidade, com isso as aplicações desse fertilizante a longo prazo tornam-se mais frequentes, bem como a correção desse nutriente na cultura de inverno, intensificando a estratificação do nutriente no perfil do solo. Assim se faz necessário definir a melhor estratégia de correção de P no solo sem o revolvimento desse, bem como a definição da classe de disponibilidade de P e o teor crítico para as principais culturas de grãos, em virtude de existirem poucos trabalhos que foram conduzidos nessas condições atuais de cultivo e em Latossolos (LAMBERS et al., 2016).

2.6 Adubação de sistema

A compreensão dos fenômenos da dinâmica do P no solo, bem como a adubação de sistemas é importante para a tomada de decisão sobre a necessidade de adição e para a definição das doses e dos modos de aplicação de fertilizantes fosfatados. Sabe-se que a dinâmica de nutriente no solo no sistema de plantio direto é completamente diferente do sistema de cultivo convencional. O P em específico é o mais afetado dentre todos os nutrientes (NICOLODI et al., 2008). Esse elemento tem uma baixa mobilidade em todos os solos e mais intensificado em solo argiloso (NUNES et al., 2008). Neste último tipo de solo tem elevadas quantidades de óxidos de ferro, alumínio e manganês, o que dificulta a mobilidade do elemento e com isso fica mais suscetível a fixação com esses óxidos (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2003).

A adubação de sistema é método para a utilização de fertilizantes com o objetivo de promover maior eficiência no uso de nutrientes (OLIVEIRA et al., 2010). Essa adubação consiste na correção ou reposição estratégica de nutrientes em situações de

solos que tenham sua fertilidade construída, de acordo com o conhecimento dos fluxos de entrada e de saída dos nutrientes no sistema. (CARNEIRO et al., 2009).

Manejo adequado das adubações torna-se um fator importante para o aumento da produtividade dos cultivos do sistema. O manejo correto das adubações cingem a análise de aspectos como característica do solo e plantas, clima, tipo de manejo e o método empregado, podendo ser de rotação ou sucessão de culturas. (OLIVEIRA et al., 2010)

É de conhecimento geral que há maior concentração de P na camada de solo de 0-10 cm, quando comparado de 10-20 cm (NUNES et al., 2011). Contudo há generalizado a correção de P na cultura de inverno (em especial a aveia). Essa correção de P no solo, está sendo realizada em e uma camada de no máximo 5 cm de profundidade, num local aonde em geral não há problemas de deficiência de P. A decomposição do restos culturais e a baixa mobilidade de P no solo, essa camada, proporcionam maior teor de P, com isso, essa forma de correção de P, não é eficiente, uma vez que não há necessidade de deposição de fertilizantes nessa camada. Sabe-se que em condições ambientais adequadas a planta irá utilizar esse P da camada superficial, por outro lado em condição de falta de água no solo, restringe a difusão e conseqüentemente a absorção do P (FISCHER et al., 2018).

Pode-se realizar a correção na cultura de verão (Soja e Milho), uma vez que a utilização do feijão na semeadora proporciona a deposição de na faixa de 5 a 10 cm. A distribuição nessa camada proporciona correção de P em na camada que já tem uma maior concentração de nutrientes se comparada a camada de 0-5 cm. Assim é provável que a resposta em rendimento seja das culturas (em especial em anos com déficit hídrico) há um melhor aproveitamento de P disponível no solo (PARK et al., 2016).

A correção na cultura de verão, comparado ao inverno em geral tem um fator limitante, a variabilidade horizontal na deposição do fertilizante. Sabe-se que o espaçamento entre linhas na cultura de verão é maior que o tradicional utilizado na semeadura de inverno. Mas por outro lado a maioria dos produtores ainda não utiliza o tráfego controlado de máquinas, com isso e duas safras de correção na cultura de verão é possível ter a correção no solo, de forma com melhor distribuição horizontal do P, em virtude das linhas de deposição do fertilizante não ser no mesmo local. (BOM et. al.,

2019). Sabe-se que a estratégia de adubação do inverno possibilita menores perdas de fertilizante via fixação nos óxidos do solo uma vez que essa técnica é realizada cerca de 6 meses antes da cultura de verão, ficando a metade do tempo exposto no solo, quando comparado com a correção realizada na cultura de verão antecessora (PARK et al., 2016; LEITE et al., 2018).

Como o SPD proporciona menor revolvimento do solo, em geral, há maior incremento no teor de MO do solo e, conseqüentemente, maior teor de P orgânico, em relação ao SPC. Embora o teor de P da MO é pequeno (0,5 a 0,6%) isso aumenta a disponibilidade de P, devido a menor complexação em óxidos de Fe e Al, os quais reagem com as substâncias húmicas, enriquecidas com o aumento da MO. Além disso, esse efeito da MO está relacionada aos ácidos orgânicos de baixo peso molecular, os quais competem com o íon fosfato pelos sítios ativos dos óxidos (ANDRADE et al., 2003; GUPPY et al., 2005; ANGHINONI, 2007). Além de possibilitar incremento no teor de MO, o menor revolvimento do solo propicia a multiplicação de fungos micorrízicos nativos, principalmente, em áreas com o cultivo de gramíneas no inverno, que são consideradas plantas multiplicadoras desses microrganismo. Esses fungos potencializam a capacidade da planta em adquirir o P da solução do solo, além de estimular a formação de microagregados de argila. Essas alterações que ocorrem na dinâmica dos nutrientes em solos em SPD, sobretudo pelo incremento do teor de MO do solo, modificam a relação solo-planta, bem como a resposta de solos com SPD consolidado a adubação, sugerindo a necessidade de estudos de calibração de nutrientes em solos manejados com esse sistema, visando adequar as recomendações de adubação originadas no SPC, para o sistema atual de manejo de solo (SCHLINDWEIN; GIANELLO, 2004).

É importante destacar que os efeitos mencionados acima são típicos de áreas manejadas com o SPD consolidado. Contudo, após a adoção desse sistema, em solo manejado com SPC, há uma fase de transição, em que ocorre a reagregação e reestruturação das partículas, e pouco incremento no teor de MO. À medida que o solo é manejado com o SPD, ao longo dos anos, ocorre as fases de consolidação e manutenção desse sistema, com incremento de carbono orgânico, e, conseqüentemente, melhoria da estrutura de solo (CIOTTA et al., 2002; ALBUQUERQUE et al., 2005; COSTA et al., 2009).

Diante destes fatores há diversos métodos de aplicação de P nas adubações de sistema. Os modos de aplicação de P mais utilizados para produção de grãos são a lanço na superfície com ou sem incorporação, no sulco de semeadura nas culturas de inverno ou verão (SOUSA et al., 2004). O manejo comum da adubação de correção fosfatada na região do Sul do Brasil constitui-se de aplicações no sulco de semeadura das culturas de verão, seja de milho ou soja. Apesar de ampliar o gradiente natural de P no perfil do solo, principalmente sob SPD, aplicações de adubos fosfatados na semeadura de cultura de inverno tornam-se uma interessante alternativa em sistemas de produção que possibilita a correção do P do solo em uma época de semeadura em que tem maior janela, minimizado ou substituindo a adubação na cultura do verão, possibilitando maior ganho operacional desta (NUNES et al., 2011).

2.7 Características de espécies submetidas a restritivo teor de fósforo

Os genótipos de distintas espécies de culturas de grãos possuem diferentes respostas em rendimento de grãos, quando cultivadas em diferentes teores de P no solo. A resposta em rendimento de grãos é devido a característica genética de cada material para utilizar para a produção de grãos o P disponível no solo.

Dependendo da característica do material genético, pode haver diferenças quanto a eficiência nutricional de P. Isso nos mostra que diferentes genótipos de mesma espécie de plantas de grãos podem utilizar melhor a quantidade de P disponível no solo, para a produção de grãos. Com isso distintos genótipos cultivado sob mesmo teor de P no solo, tem a capacidade de produzir diferentes rendimentos de grãos, devido a diferenças entre os genótipos quanto a eficiência de enraizamento, aquisição, translocação e utilização (FAGERIA et al., 2007; TRINDADE et al., 2014).

Cultivares e/ou híbridos selecionados pelo melhoramento genético em solos com baixo teor de P disponível, tem maior capacidade de produção em solos com P restritivos. Esses genótipos selecionado em Latossolos com teores de P restritivos o desenvolvimento das culturas, possuem uma adaptabilidade e resposta em produção superior a genótipos selecionado em solos ricos em P disponível (JEFFERY et al., 2016; RAVEN et al., 2016). Diante disso, se faz necessário conhecer o material genético antes mesmo de definir a dose

de correção de P adequada para a cultura. Essa dose de P definida para expressão do máximo rendimento relativo, depende do genótipo utilizado.

Defido essas diferenças nas características genéticas de diferentes materiais de culturas de grãos, esses podem desencadear diversas estratégias as quais podem potencializar a atividade biológica do solo (maior atividade de fungos micorrízicos arbusculares), atividade da fosfatase ácida, estímulo para bactérias solubilizadoras de P, modificação dos atributos do sistema radicial (maior área, volume e número de pontas do sistema radicial) a fim de melhorar o suprimento e conseqüentemente a aquisição desse elemento pouco móvel no solo (COZZOLINO et al., 2013; BERTOLAZI et al., 2018, LAMBERS et al., 2018; BARAZETTI et al., 2019). Contudo, devido a capacidade de cada genótipo em desencadear alguma dessas estratégias citadas, a resposta em rendimento relativo, quando acultivado sob doses de P é variável. Se faz necessário conhecer e caracterizar cada genótipo quando ao ambiente e tipo de solo o qual foi selecionado e partir disso, definir a necessidade de P para expressão do RR do genótipo de determinada cultura, bem como a demanda de corretivo no solo para atingir o teor crítico de nutriente (VENGAVASI ; PANDEY, 2011).

2.8 Eficiência nutricional dos genótipos

A eficiência nutricional ao P (ENP) pode expressar a relação entre a produção obtida e o fertilizante fosfático aplicado ou teor de P do solo (BARAZETTI et al., 2019). Desse modo, a ENP tem sido definida como a principal maneira como as plantas adquirem, transportam, armazenam e usam o nutriente, a fim de produzir biomassa (raiz, parte aérea e grãos).

A ENP é baixa, comparada a outros nutrientes. Esse fato está relacionado à menor disponibilidade desse nutriente no solo e as características genéticas de cada espécie e cultivar, em adquirir o P (DOBERMANN et. al., 2007). Os principais índices de eficiência nutricional, utilizados para avaliar a ENP, em solos que recebem adubação, são eficiência de recuperação aparente (ERA), eficiência fisiológica (EF), eficiências de utilização interna (EUI), eficiência agrônômica (EA) e eficiência agrônômica parcial (EAP).

A eficiência de recuperação aparente quantifica a capacidade da planta em absorver nutriente aplicado via fertilizante no solo. A eficiência fisiológica quantifica o acréscimo no RG por nutriente absorvido do solo, descontando do tratamento controle (RG e P absorvido no controle). A eficiência de utilização interna demonstra a habilidade da planta em transformar nutrientes absorvidos (seja via fertilizante ou reserva do solo) em RG. A eficiência agrônômica determina o incremento em RG descontado a testemunha por quantidade de nutriente aplicado no solo via adubação, já a eficiência agrônômica parcial avalia o crescimento no RG pela quantidade de P aplicado via adubação. Assim, a eficiência nutricional é resultante de um conjunto de índices simples, frequentemente utilizados para estimar a eficiência da cultivar e do fertilizante aplicado (WANG; SHEN; LIAO, 2010; TRINDADE et al., 2014; LAMBERS et al., 2016).

A eficiência nutricional pode ser expressa por índices agrônômicos, a fim de avaliar, a curto prazo, as cultivares (RAKSHIT et al., 2015). Existem diversos índices agrônômicos que podem ser utilizados para estimar a eficiência da planta, de forma que os mais usuais estão descritos no Quadro 1.

Quadro 1 - Equações utilizadas para cálculo dos índices de eficiência nutricional ao fósforo, em estádios do ciclo fenológico de milho, aveia-branca e soja. Passo Fundo, 2019

Índice nutricional	Equação	Referência
Eficiência de recuperação aparente (ERA)	$ERA = U^1 - U_0^2 / \text{Kg P aplicado} \quad (1)$	Dobermann et. al., 2007
Eficiência fisiológica (EF)	$EF = \text{RG}^2 - \text{RG}_0^3 / U - U_0 \quad (2)$	
Eficiência de utilização interna (EUI)	$EUI = \text{RG} / \text{Kg P absorvido} \quad (3)$	
Eficiência agrônômica (EA)	$EA = \text{RG} - \text{RG}_0 / \text{Kg P aplicado} \quad (4)$	
Eficiência agrônômica parcial (EAP)	$EAP = \text{RG} / \text{Kg P aplicado} \quad (5)$	

U^1 Teor de P absorvido, U_0^2 Teor de P absorvido no tratamento controle, RG^2 Rendimento de grãos, RG_0^3 Rendimento de grãos no tratamento controle.

Entre outros mecanismos, a eficiência Agrônômica (EA) (4) é uma das melhores formas de definir a eficiência nutricional de um genótipo, uma vez que expressa muito bem a capacidade da planta em incrementar o RG a partir do tratamento controle, por quantidade de fertilizante aplicado ao solo, ou seja, a capacidade da planta em utilizar esse fertilizante via diferentes formas para incremento no RG. Essa resulta de diferenças entre as plantas quanto a modificação das características morfológicas do sistema

radicular, aumento da eficiência de mecanismos fisiológicos de absorção, modificações químicas na interface solo-raiz, mudanças bioquímicas sob deficiência e associação com fungos micorrízicos (FAGERIA, 1998; RAKSHIT et al., 2015). Estudos demonstram que a ENP está diretamente relacionada à EAP (5). Em arroz cultivado em solo com P limitante, a EUP foi negligente em linhagens derivadas de retrocruzamento (CHIN et al., 2011).

Há diversos obtentores de cultivares de aveia no Brasil e no mundo. Esses produzem uma cultivar, a partir de materiais selecionados entre as linhagens. Assim, a característica genética de cada linha de obtenção tende a ser distinta em muitas características morfoagronômicas e genéticas. Essas podem influenciar a aquisição, o transporte e a utilização do P e, conseqüentemente, aumentar a produção de massa de grãos e a resposta a níveis de P, afetando a ENP. Contudo, esse aspecto ainda não foi estudado em milho e soja, embora espera-se que exista diferenças entre as cultivares provenientes de diversos obtentores. Por outro lado, alguns trabalhos mostram diferenças na ENP entre as cultivares de outros cereais e de leguminosas (FAGERIA, MOREIRA, SANTOS, 2013; GONDIM et al., 2014; MANSCHANDI et al., 2014; MOREIRA; MORAIS; FAGERIA, 2015; TRINDADE et al., 2014). Os trabalhos com gramíneas mostram que a maioria das plantas com maior EUP produzem mais massa de parte aérea e de grãos, acumulando maior quantidade de P na parte aérea, e com menor acúmulo nos grãos, dependendo ou não do sistema radicular (FAGERIA; BALIGAR, 1997, 1999; FAGERIA et al., 2010; RODRIGUES et al., 2014; RUARK; KELLING; WARD, 2014; SILVA et al., 2016; JEFFERY et al., 2016).

Plantas com deficiência nutricional, ou cultivadas sob níveis mais restritos de P no solo, tentam manter o maior teor na parte aérea (colmo e folhas), em relação aos demais órgãos (GONDIM et al., 2014). Dessa maneira tem maior EF (2) e EA (4), devido a maior translocação do P para essas partes da planta. A EUP de linhagens de sorgo e de milho foi, aproximadamente, quatro vezes maior que a média geral das linhagens, em alto de P do solo, comparado com o baixo (NETO et al., 2010; GONDIM et al., 2014). Esses autores, relataram que a capacidade de acúmulo de P pelas plantas de milho pode ser utilizada na seleção indireta de linhagens com elevada eficiência de utilização do nutriente.

Por outro lado, em condições de baixa disponibilidade de P, as linhagens de sorgo não diferiram quanto a ERA (1) e EF (2), indicando que têm as mesmas estratégias de aquisição do nutriente. Entre essas estratégias, as mais comuns foram o desenvolvimento de maior quantidade de raízes basais e axiais com grande número de pelos radiculares, maior incremento em RG por teor de nutriente adicionado ao solo, como foi observado em trigo (RAMAEKERS et al., 2010; LYNCH, 2011). Já as características morfológicas do sistema radicial e a translocação de P de cultivares de trigo, arroz, feijão e milho, classificadas como as melhores quanto a ENP, foram semelhantes, possibilitando maior capacidade de contato com o P do solo (área e/ou volume), maior aproveitamento do P absorvido via adubação realizada e maior teor P em parte aérea (colmo, folha) (FAGERIA; BALIGAR, 1997, 1999; FAGERIA, MOREIRA, SANTOS, 2013; MANSCHADI et al., 2014).

2.9 Rendimento líquido

As doses de retorno econômicas são calculadas com base na máxima eficiência técnica da cultura (MET) e máxima eficiência econômica (MEE). Com base nos resultados obtidos nos experimentos, é plotado um gráfico com o teor do nutriente no solo (eixo x) e o RR da cultura (eixo y), evidenciando uma correlação entre o método de análise e a produção da cultura. Com o gráfico plotado é possível verificar o teor do nutriente em estudo para a expressão da máxima eficiência econômica e técnica da cultura. Em geral, é utilizado 80 a 90 % do RR da cultura para expressão da máxima eficiência econômica (MEE), e 90 a 100% para a máxima eficiência técnica (MET). Mas quando for avaliado o desempenho somente em uma safra ou entre materiais genéticos de mesma espécie, submetidos a mesma condição de cultivo, pode-se trabalhar com RG absoluto para definição das doses de MET e MEE. O valor de máxima eficiência econômica varia muito, pois é dependente do custo do fertilizante e do valor de comercialização do produto cultivado e deve ser recalculado a cada variação de valor de ambos os produtos.

Contudo esse cálculo deve ser realizado em solos que estão em nível baixo, ou muito baixo uma vez que é necessários esses níveis para formação de uma curva de

resposta quadrática e com isso estabelecer as doses de MET e MEE (GATIBONI et al., 2016).

Quando não é possível calcular as doses de MET e MEE, devido a baixo incremento em RG dos materiais avaliados, pode expressar o rendimento econômico de outra forma simples. Baseado no rendimento líquido de cada cultura e estratégia de correção, com isso sabe-se qual o sistema avaliado e/ou dose de P que proporciona maior rentabilidade há atividade.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Tipo de pesquisa

A pesquisa foi de associação com interferência.

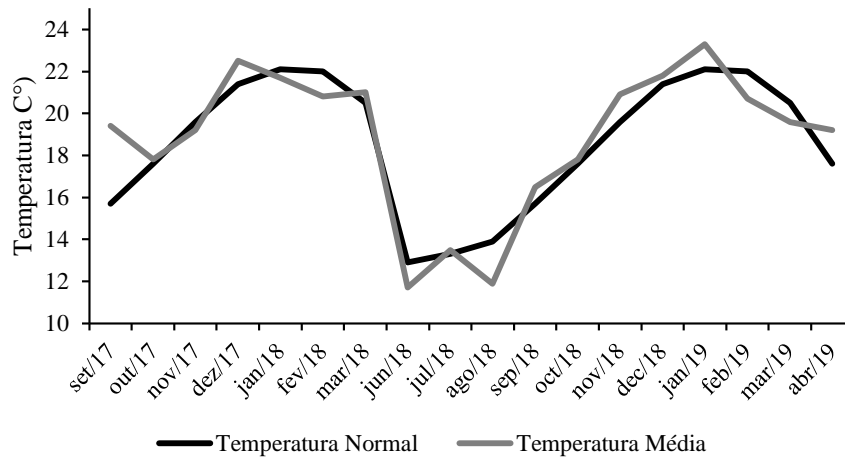
3.2 Área, experimento e genótipos utilizados

O experimento foi realizado no Centro de Pesquisa Agrícola da Universidade de Passo Fundo (CEPAGRO UPF), Rio Grande do Sul, Brasil (28 ° 13'4,45 "S; 52 ° 23'59,42" W, 650 m de altitude). O solo da área de pesquisa é um Latossolo Vermelho Distroférico típico, Unidade de Mapeamento Passo Fundo (SBCS, 2013).

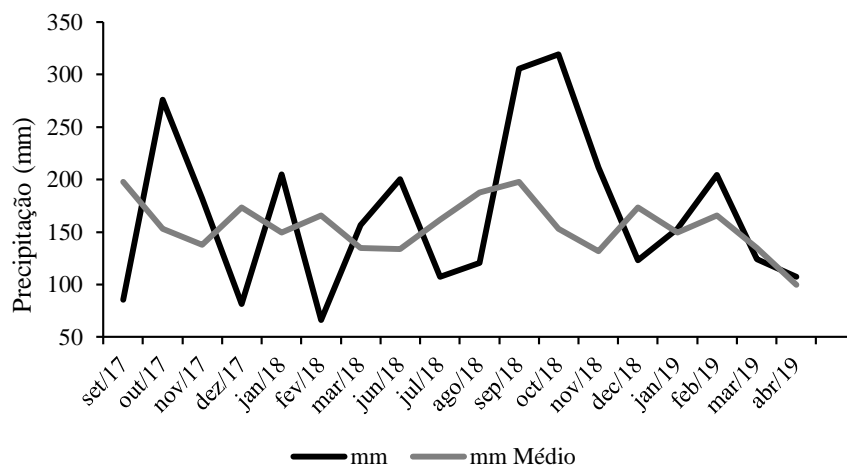
O clima no local é tipicamente subtropical, a temperatura média anual é de 17,5 ° C, a precipitação pluviométrica é de 1787 mm, distribuídos ao longo do ano (KUNCHTNER; ENTERRO, 2001). Registros climáticos de temperatura e precipitação no período de cultivo, estão representados nas Figuras 1A e 1B.

Antes do experimento, o local foi cultivado com pastagem por oito anos, precedidos por um número incerto de anos de cultivo de citros. A análise de solo, antes do experimento, indicou pH 5,8 e 5,5 (solo: água, 1: 1, peso: volume), com 3,8 e 2,6 % de matéria orgânica oxidável; 46 e 51 % de argila, 40 e 30 % de silte, 50 e 46 % de areia, e média disponibilidade P na camada de 0-10 cm (10 mg/kg) e baixa disponibilidade na camada de 10-20 cm (4,3 mg/kg) pelo método de ensaio do azul de molibdênio usando extrato de Mehlich-1.

Figura 1- Precipitação (A) e temperatura média (B), no período do experimento de campo, em relação à média histórica, neste período (Embrapa, 2020).



1A



1B

O experimento foi realizado de setembro de 2016 a abril de 2019. As safras foram: milho (zea mays l ; safra de verão); aveia (avena sativa l .; safra de inverno); soja (glicine max l.; safra de verão), utilizando genótipos com diferenças de eficiência nutricional, em relação ao P. As principais características agrônômicas dos genótipos constam na Tabela 1.

A adubação fosfatada residual para a soja foi avaliada em dois sistemas de cultivo: rotação milho-soja (1) e sucessão aveia-soja-branca (2). Na primeira cultura implantada no experimento (milho), metade da área experimental foi fertilizada com doses de P_2O_5 (30; 60; 90; 120; 150; 190 kg/ha), enquanto a outra metade foi fertilizada

Jonas Manica

com uma dose de P_2O_5 para a manutenção do teor de P (60 kg/ha). Na segunda cultura semeada no experimento (aveia-branca), foram aplicadas doses de P_2O_5 (30; 60; 90; 120; 150; 190 kg/ha) nessa metade da área onde essa dose de manutenção foi aplicada na cultura do milho, enquanto a outra metade da área foi fertilizada com a mesma dose de manutenção de P aplicada antes no milho (60 kg P_2O_5 /ha). Após a colheita da aveia, foi cultivada soja, mas sem aplicação de P, para avaliar o efeito residual da adubação fosfatada antes aplicada nas culturas precedentes (milho ou aveia-branca). Dessa forma, foram testadas duas estratégias de correção de P do solo, visando avaliar o efeito residual na cultura da soja: 1) correção de P na semeadura do milho, denominada de Estratégia 1 no trabalho; e 2) correção de P na semeadura da aveia, denominada Estratégia 2. A primeira estratégia pode ser usada em um sistema de cultivo em que o milho faz parte da rotação das culturas, embora a soja seja a principal cultura comercial. A segunda estratégia simulou a correção de P do solo na semeadura de culturas de invernos, como a aveia, trigo, cevada, etc, tipicamente utilizadas no Sul do Brasil, em que a sucessão aveia-soja, predomina, como está ilustrado no Anexo I.

Quadro1: Descrição de características agrônômicas dos genótipos utilizados no experimento.

Espécie	Genótipo	População	Ciclo/maturação	Estatura	Enraizamento	EUP ¹
Milho	P30F53VYHR	65.000	Hiperprecoce	Baixa	S/D ²	Eficiente ³
	P1680VYHR	67.000	Precoce	Baixa	S/D	Não eficiente ³
Aveia	URS Taura	3.000.00	Precoce	Baixa	Alto	Eficiente ⁴
	UPFPS Farroupilha	3.000.00	M.000	Alta	Mlta0	Não eficiente ⁴
Soja	BMX Ativa	300.000 350.000	5.6	Baixa	S/D	S/D
	DM 53i54	250.00	5.3	Baixa	S/D	S/D

¹ Eficiência uso de fósforo. ² Sem dados. ³ Baseado em outros híbridos com mesmo ciclo dos utilizados. ⁴ MANICA (2017).

3.3 Amostragem de solo

Antes do experimento, os atributos de solo e a caracterização mineralógica e do teor total de elementos químicos foram analisados de amostras coletadas antes da implantação do ensaio, nas camadas de 0-10; 10-20 cm.

O teor de P do solo rizosférico das plantas de milho, aveia-branca e soja foi coletado no início do ciclo de crescimento das plantas (Milho e aveia-branca), antes da semeadura da soja e no florescimento pleno de cada cultura. O teor de P rizosférico foi avaliado no estágio vegetativo V5 e VT (Pendoamento; HANWAY, 1963) do milho; no perfilhamento e na antese da aveia-branca (escala de ZADOKS, 1974) e no estágio R2, da cultura da soja (FEHR; CAVINESS, 1977). A amostragem foi realizada nas cinco filas centrais, excluindo duas linhas externas, das parcelas.

As raízes e o solo da rizosfera foram amostrados das mesmas plantas utilizadas para amostrar as folhas. O solo aderido aos segmentos radiculares, após um batimento suave, foi considerado solo rizosférico. Esse foi removido por escovação das raízes, e foi obtido de um bloco de solo com dimensões de aproximadamente 10 × 10 × 10 cm, localizado na linha onde foi semeada a cultura.

3.4 Análise de solo

Amostras de solo foram previamente preparadas antes das análises químicas (secagem a 40 °C; moagem e peneiradas em peneira com abertura de malha de 2 mm). O teor de argila e os atributos químicos do solo foram os seguintes: pH em água, 5,5; índice SMP, 5,8; K e P disponíveis, 219 e 9,8 mg/kg, respectivamente; argila, 48%; matéria orgânica oxidável, 3,1%; Al, Ca e Mg trocáveis, 0,0, 5,4 e 1,7 cmol_c/kg, respectivamente; H+Al, 4,4 cmol_c/kg; CTC a pH 7,0, 14 cmol_c/kg; V, 69%; S e B disponíveis, 16 e 0,7 mg/kg; Mn, 31,4 mg/kg; Zn, 3,68 mg/kg e Cu, 6,57 mg/kg, foram determinados conforme descrito em Tedesco et al. (1994).

Resumidamente, o teor de P do solo foi extraído pelo método de Mehlich I, no qual foi usado (3,0 g subamostra foi extraída com solução de diluição HCl e H₂SO₄, filtrada, e os extratos foram analisados colorimetricamente, usando o reagente Molibdato-Tetra-Hidrato de Amônio, a 890 nm em espectrofotômetro UV-VIS. O teor de fósforo no extrato foi medido colorimetricamente, de acordo com o método do azul de molibdênio (TEDESCO et al., 1994).

A análise dos teores óxidos Fe (18,5 g/kg) e Al (0,6 g/kg) cristalizados, na camada de 0-20 de solo, foram extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio

(DCB) a 80C (MEHK; JACSON, 1960) utilizando procedimento adaptado por INDA JR; KÄMPF (2003), utilizando três extrações sucessivas de 15 min.

3.5 Amostragem e análise de plantas

A amostragem de folha foi limitada nas cinco filas centrais, excluindo duas linhas externas. Foram escolhidas cinco plantas aleatoriamente em cada parcela. As folhas utilizadas para estimar o teor de nutriente e conseqüentemente o estado nutricional da planta foram: cultura de milho, folha oposta e abaixo da primeira espiga; cultura da aveia-branca, folha bandeira; e cultura de soja, terceira folha madura, com pecíolo, do terço superior da haste principal. Os estádios de amostragem foliar foram os informados no item da amostragem de solo, para determinar o teor do P rizosférico.

Os grãos foram colhidos após a maturação fisiológica, em 5 m² central das parcelas. A massa seca da parte aérea (raiz, colmos, folhas e grãos) foi determinada com balança de precisão, após secagem das amostras, em estufa (65 °C), com circulação de ar forçado, por 48 h. A colheita foi realizada manualmente na cultura do milho e mecanicamente na cultura da aveia e soja. A massa dos grãos foi expressa com teor de água de 13%.

O teor de nutrientes das raízes, folhas, parte aérea e dos grãos (65 °C) foram determinados por digestão, a 350 °C, em ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio, e em seguida determinado o teor de cada nutriente presente na amostra de tecido vegetal, conforme descrito em Tedesco et al. (1994).

3.6 Calibração de fósforo no solo

Os teores de P obtidos no solo amostrado no início do estágio de crescimento das plantas foram classificados de acordo com as seguintes classes de disponibilidade, relacionadas ao rendimento de grão relativo (RR): Muito baixo: < 40% de RR; Baixo: 40 a 75 de RR; Médio: 75 a 90% de RR; Alto: > 90% RR; e Muito Alto: a partir do limite superior do Alto. O limite superior dessa última classe foi calculado multiplicando por 2 o teor de P que corresponde ao limite inferior da classe Alto. Além disso, estimou-se o teor crítico, que corresponde a 90% do RR. Para calibrar os teores de P do solo,

considerando o RR do sistema de culturas avaliado (milho-aveia-branca-soja), foram utilizados os teores desse nutriente obtidos no início do crescimento do milho (Estratégia 1) ou da aveia-branca (Estratégia 2) e os RR acumulado das três culturas.

Para cálculo do RR (Equação 1), foi determinado o rendimento de grão (RG) máximo das culturas. A produção máxima foi estimada com equação de regressão quadrática, ajustada a curva de resposta, que relaciona o RG com as doses de P. O RG máximo foi estimado para cada genótipo (eficiente e não eficiente), separadamente. Para determinar o valor desse RG, estimou-se com a equação de regressão a dose de máxima eficiência técnica. E com o RG máximo e essa dose, estimou-se a eficiência agrônômica dos genótipos, isto é, quantos kg de grão foram produzidos por kg de P₂O₅ aplicados.

$$RR (\%) = \frac{\text{Rendimento da cultura sem aplicação de P}}{\text{Rendimento máximo da cultura}} \times 100 \quad (1)$$

Foi plotada a curva de resposta ao RR (eixo y) e as doses de P adicionadas (eixo x), para definir a classe de disponibilidade de P do solo estabelecendo os teores de P para o nível muito baixo, quando constatado (40% do RR) baixo (40-75 % do RR), médio (75-90 % do RR) e até o teor crítico, denominado como alto (> 90% do RR). O teor crítico foi pontuado com 90 % do RR o qual é parâmetro para as atuais recomendações (GATIBONI et al., 2016). Em seguida determinadas as doses de fósforo (P₂O₅/ha) para a correção do teor de P no solo aos níveis estabelecidos. As doses de correção foram calculadas para atingir o teor crítico de cada cultura ou genótipo.

3.7 Definição da máxima eficiência técnica, econômica e receita líquida.

Para determinar as doses de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) foi plotada curvas de resposta com base nos RG dos genótipos (eixo y) e as doses de P (eixo x). Foi ajustada a linha de tendência da função quadrática e obtido os coeficientes a, b e c da equação de regressão. Esses foram usados no cálculo para determinar as doses de MEE e MET, para cada cultura e genótipo (LEIKAM et al., 2003; GATIBONI et al., 2016).

Para obter a MET, calculou-se o valor de x, quando a derivada segunda da equação de regressão é zero (Ponto de máximo RG da curva de resposta). Para obter a MEE, essa derivada foi iguala a relação de preços do kg fertilizante e o kg de grão. Utilizou-se o valor do dia 20/02/2021, do fertilizante superfosfato triplo (R\$ 2,80/kg) e o valor dos grãos cultivados: milho (R\$ 1,3/kg), aveia (R\$ 1,5/kg) e soja (R\$ 2,7/kg). As doses de MEE e a MET foram definidas com as equações abaixo (LEIKAM et al., 2003; MALLARINO, 2009):

$$MEE = (-b / 2 c)$$

$$MET = ((T/W) - b / 2b)$$

b = Coeficiente da regressão quadrática

c = Coeficiente da regressão quadrática

T = Valor do fertilizante (R\$/kg)

W = Valor do grão (R\$/kg)

Os valores de máxima eficiência econômica é variável, pois é dependente do custo do fertilizante e o valor de comercialização do produto cultivado e deve ser recalculado a cada variação de valor de ambos os produtos. Já a máxima eficiência técnica será definida com o rendimento relativo de 100% (GATIBONI et al., 2016).

Contudo não foi possível estabelecer para todas as culturas ou genótipos avaliados a dose de MEE, pois a curva de resposta foi linear ou partiu de RR elevados. Sem a resposta quadrática do RG em função das doses de P, em algumas das culturas/genótipos avaliados optou-se em avaliar o aspecto econômico da adubação estimando a receita líquida obtida em cada cultura e tratamentos testados, além da obtida com o RG acumulado no sistema milho-aveia-branca-soja. Embora a receita líquida estimada não represente todos os custos incluídos no cultivo das culturas, ela foi utilizada para comparar os tratamentos em relação ao potencial de retorno econômico da adubação.

A receita líquida foi obtida subtraindo da receita bruta os valores dos custos dos insumos utilizados, e das aplicações desse, nos cultivos (Tabelas 2, 3, 4). Todos os

valores, tanto custos como receitas, foram definidos de acordo com os praticados na época de aquisição e venda dos grãos colhidos. A receita bruta foi obtida utilizando o valor do dia 20/02/2021, para o custo do fertilizante superfosfato triplo (R\$ 2,80/kg) e o seguinte valor dos grãos cultivados: milho (R\$ 1,3/kg), aveia (R\$ 1,5/kg) e soja (R\$ 2,7/kg).

Tabela 2 - Custo dos insumos da cultura de milho. Safra 2017/18. Passo Fundo, RS.

Serviços e produtos	Nº ou dose ha	Valor un. (R\$)	Valor (R\$/ha)	Total (U\$) (3,24 R\$)
Fertilizante (K e N)	1	150,00	150,00	46,29
Dessecação	1	20,00	20,00	6,17
Semeadura	1	150,00	102,00	31,48
Pulverização	3	20,00	60,00	18,5
Colheita manual	1	400,00	400,00	123,45
Total A			732,00	225,92
Semente	1,5 sc	920,00	1.380,00	425,92
Herbicidas pós emergência	1	40,00	40,00	12,34
Inseticida	1	21	41,00	12,65
Fungicida	1	122	122,00	37,65
Fertilizante nitrogenado	1	585	485,00	149,69
Total B			2.068,00	638,27
Total (A+B)			2.800,00	870,37

Tabela 3 - Custo dos insumos da cultura da aveia-branca. Safra 2018/18. Passo Fundo, RS.

Serviços e produtos	Nº ou dose ha	Valor un. (R\$)	Valor (R\$/ha)	Total (U\$) (3,85 R\$)
Fertilizante (K e N)	1	70,00	70,00	18,18
Dessecação	1	20,00	20,00	5,19
Semeadura	1	40,00	40,00	10,38
Pulverização	1	20,00	20,00	5,19
Colheita mecanizada	1	70,00	70,00	18,18
Total A			220,00	57,14
Semente	1,0 sc	60,00	60,00	15,58
Tratamento de semente	1	12,00	12,00	3,11
Fungicida	1	28,00	28,00	7,27
Fertilizante nitrogenado	1	60	60,00	15,58
Total B			160,00	41,55
Total (A+B)			380,00	98,70

Tabela 3 - Custo dos insumos da cultura da soja. Safra 2018/19. Passo Fundo, RS.

Serviços e produtos	Nº ou dose ha	Valor un. (R\$)	Valor (R\$/ha)	Total (U\$) (3,84 R\$)
Fertilizante (K e N)	1	478,00	478,00	124,47
Dessecação	1	20,00	20,00	5,20
Semeadura	1	170,00	170,00	44,27
Pulverização	6	20,00	120,00	31,25
Colheita mecanizada	1	90,00	90,00	23,43
Total A			878,00	228,64
Semente	1,0 sc	580,00	580,00	151,04
Tratamento de semente	1	64,00	64,00	16,66
Inoculante	4	10,50	42,00	10,93
Herbicida pós emergência	2	62,00	124,00	32,29
Fungicida	4	182,00	182,00	47,39
Adjuvante	5	17,20	86,00	22,39
Inseticida	5	38,00	190,00	49,47
Dessecação pré colheita	1	265,00	254,00	66,15
Total B			1.522,00	396,35
Total (A+B)			2.400,00	625,00

3.8 Eficiência nutricional

Com os resultados das análises do RG e do P na planta, foram definidas as quantidades desse nutriente e a matéria seca das partes da planta (raiz, parte aérea e grão) e em seguida calculados os índices agronômicos de eficiência nutricional ao P (ENP), utilizando as equações do Quadro 2.

Quadro 2 - Equações utilizadas para cálculo dos índices de eficiência nutricional ao fósforo, em estádios do ciclo fenológico de milho, aveia-branca e soja. Passo Fundo, 2019

Índice nutricional	Equação	Referência
Eficiência de recuperação aparente (ERA)	$ERA = U^1 - U_0^2 / \text{Kg P aplicado}$	Dobermann et al. (2007)
Eficiência fisiológica (EF)	$EF = RG^2 - RG_0^3 / U - U_0$	
Eficiência de utilização interna (EUI)	$EUI = RG / \text{Kg P absorvido}$	
Eficiência agrônômica (EA)	$EA = RG - RG_0 / \text{Kg P aplicado}$	
Eficiência agrônômica parcial (EAP)	$EAP = RG / \text{Kg P aplicado}$	

U^1 Teor de P absorvido, U_0^2 Teor de P absorvido no tratamento controle, RG^2 Rendimento de grãos, RG_0^3 Rendimento de grãos no tratamento controle.

3.9 Análise estatística

Os resultados do milho (Estratégia 1) e da aveia-branca (Estratégia 2) foram analisados em modelo bifatorial (7 doses de P \times 2 híbridos ou cultivares). O fator principal foram os genótipos, que foram dispostos em faixas experimentais. A dose de P foi o subfator, testada em parcelas distribuídas ao acaso, nos 4 blocos experimentais.

Os dois fatores acima também foram analisados em conjunto com as duas estratégias de correção de P, na análise estatística dos resultados da cultura da soja e do sistema milho-aveia-branca-soja, em esquema trifatorial. Nessa análise, as estratégias e os genótipos foram considerados faixas experimentais; e as doses de P foram analisadas em parcelas de delineamento de blocos ao acaso (quatro repetições).

Os dados foram testados quanto a normalidade usando o teste de Shapiro-Wilk, a 5% de probabilidade. Foi utilizada a ANOVA, a 5% de probabilidade de erro, para testar os efeitos dos genótipos, doses de P e estratégias de correção. Foi utilizado a análise de regressão para testar as relações entre RG e RR, e o teor de P disponível no solo e na planta. As regressões foram analisadas com ANOVA, a 5% de probabilidade de erro.

4. Resultados

4.1 Cultura de milho

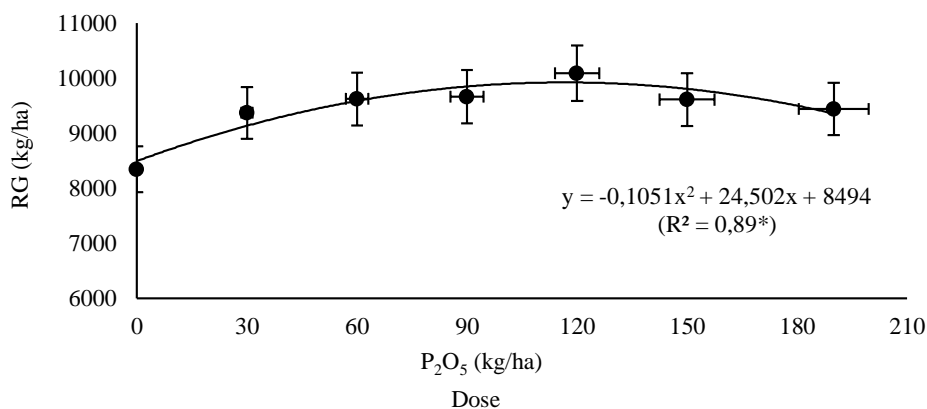
4.1.1 Rendimento de grão

O RG da cultura de milho variou somente com o efeito simples de dose de P e híbrido ($p = 0,001$ e $0,043$, respectivamente) (Apêndice II).

No tratamento Controle, o RG, na média dos híbridos, foi 8.347 kg/ha, aumentando até 10.088 kg/ha, na dose de 120 kg/ha de P_2O_5 , e decrescendo a partir dessa dose até 9.444 kg/ha, evidenciando efeito quadrático das doses de P no RG (Figura 1A). A produção máxima estimada com a equação de regressão ajustada a curva de resposta que relaciona o RG as doses aplicadas ($y = -0,1051x^2 + 24,502x + 8494$) foi de 9.922 kg/ha, obtida com a dose de máxima eficiência técnica estimada em 117 kg P_2O_5 /ha. Com esse RG e dose, estima-se que a eficiência agrônômica dos híbridos foi de 12 kg de grão por kg de P_2O_5 aplicado.

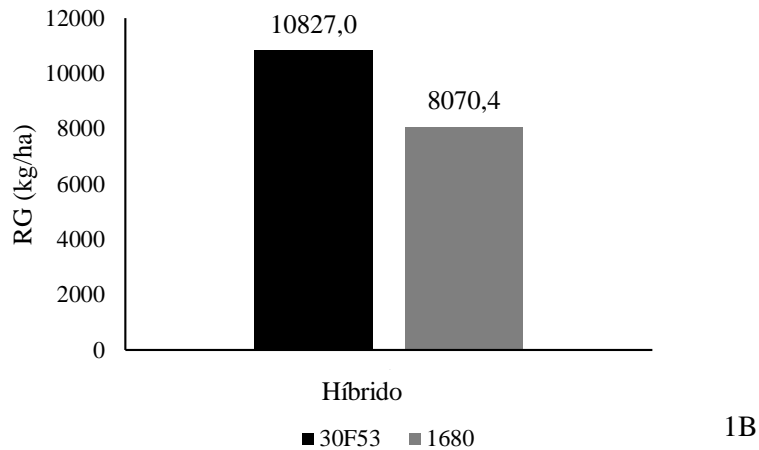
Na média das doses de P, o RG do híbrido P30F53VYHR, considerado eficiente em uso desse nutriente, foi 10.827 kg/ha, e cerca de 35% maior, que o do híbrido P1680VYHR (8.070 kg/ha), considerado não eficiente ao P (Figura 1B).

Figura 1- Rendimento de grão (RG) de milho adubado com doses de fósforo (P_2O_5) aplicadas na linha de semeadura dessa cultura (Estratégia 1). Média de híbridos (A). Média de doses (B). Passo Fundo, RS, 2018.



1A

Figura 1- Rendimento de grão (RG) de milho adubado com doses de fósforo (P_2O_5) aplicadas na linha de semeadura dessa cultura (Estratégia 1). Média de híbridos (A). Média de doses (B). Passo Fundo, RS, 2018 (Continuação).



4.1.2 Teor de fósforo do solo rizosférico

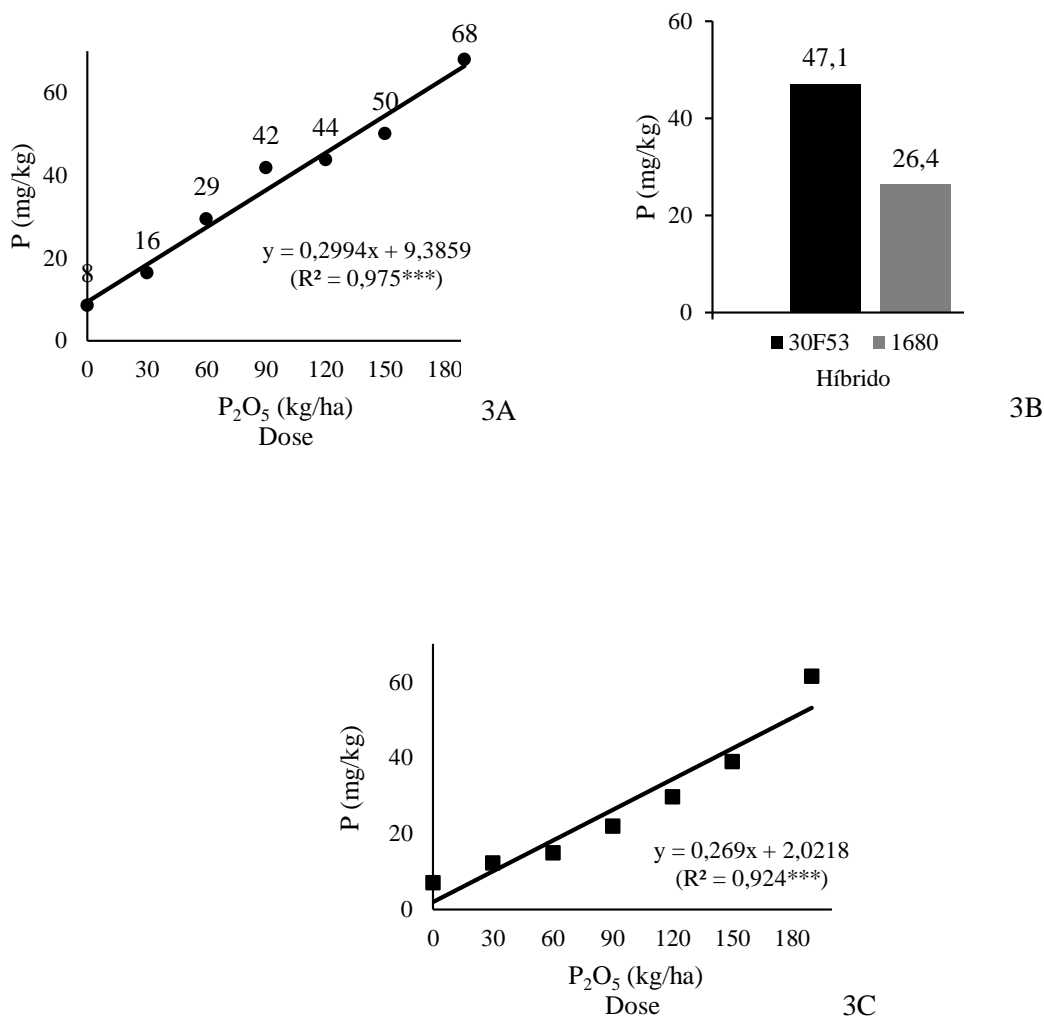
O teor de P rizosférico, no estágio V5, variou somente com o efeito simples de dose e de híbrido ($p = 0,001$ e $0,0001$, respectivamente; Apêndice 1). Já no pendoamento (estádio VT), o teor de P do solo variou somente com o efeito de dose ($p = 0,001$; Apêndice II). O teor de P, em ambos os estádios, aumento de forma linear em função das doses aplicadas (Figura 3A; C).

Na média das doses de P, o teor de P no estágio V5 do solo cultivado com o híbrido P30F53VYHR foi 47 mg/kg, cerca de 80% maior, que o obtido no híbrido P1680 VYHR (26 mg/kg) (Figura 3B).

Embora as diferenças entre o teor de P rizosférico dos estádios V5 e VT não foram comparadas com análise estatística, os resultados sugerem que os teores desse nutriente foram maiores no início do crescimento da cultura (Figuras 3A; 3B). Em ambos os estádios, o teor de P aumentou linearmente com as doses de P aplicadas. No estágio V5, o teor de P variou de 8 mg/kg, no Tratamento Controle; a 68 mg/kg, nos tratamentos com a aplicação do fertilizante fosfatado. No estágio VT, o teor de P do solo aumentou

de 7,1 mg/kg (Tratamento Controle) para 61,4 mg/kg, com a aplicação da maior dose (190 kg P₂O₅/ha; Figura 3C).

Figura 3 – Teor de fósforo (P) do solo rizosférico, nos estádios V5 (A e B) e pendoamento (C) de milho adubado com doses desse nutriente (P₂O₅) aplicadas na linha de semeadura dessa cultura (Estratégia 1). Média de híbridos (A; C). Média de doses (B). Passo Fundo, RS, 2018.

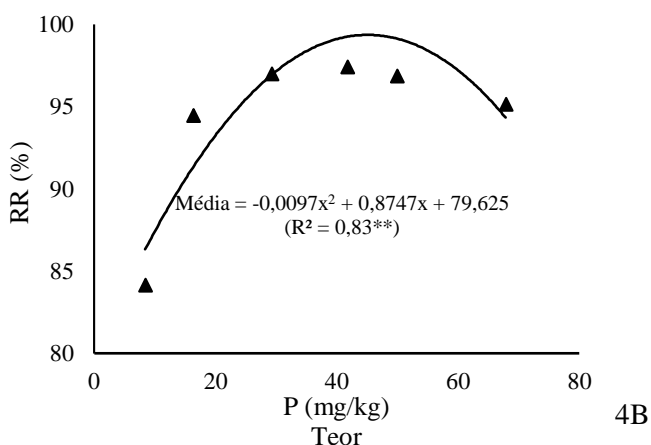
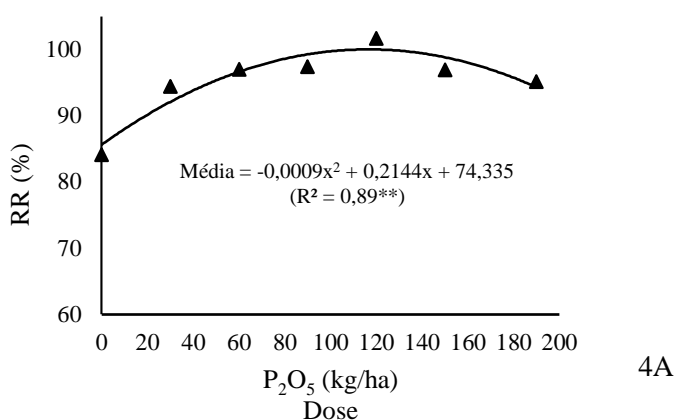


4.1.3 Calibração de fósforo do solo rizosférico no estágio V5

Com o RG máximo, estimado com a curva de resposta da Figura 1A (9.992 kg/ha), obteve-se o rendimento relativo de grão (RR) de cada dose de P, na média dos híbridos (Figura 4A). Os valores do RR também foram relacionados com o teor de P do estágio V5, para calibrar os resultados da análise desse nutriente no solo (Figura 4B).

Com o uso da equação de regressão ajustada a curva de resposta que relaciona o RR aos teores de P do solo ($y = -0,0097x^2 + 0,8747x + 79,625$) estimou-se os seguintes teores de P para as classes de disponibilidade desse nutriente no solo: Médio: 8 a 14 mg P/dm³; Alto: 15 a 30 mg P/dm³; e Muito Alto: > 31 mg P/dm³. Assim, o teor crítico obtido com essa equação foi, aproximadamente, 14 mg P/dm³.

Figura 4 – Rendimento relativo de grão (RR) de milho adubado com doses de fósforo (P₂O₅) aplicadas na linha de semeadura dessa cultura (Estratégia 1). Média de híbridos (P30F53VYHR; P1680 VYHR) em função das doses (A) e em função do teor desse nutriente no solo, no estágio V5 (B). Passo Fundo, RS, 2018.



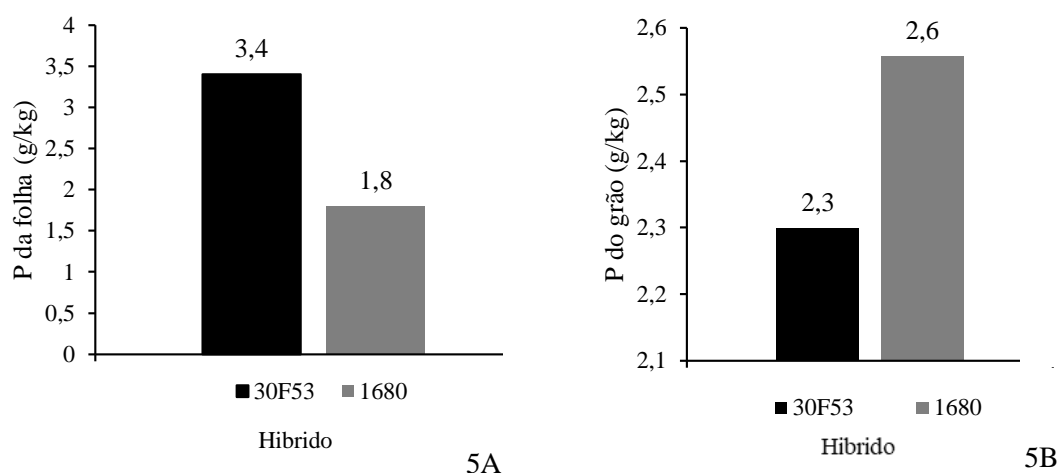
4.1.4 Teor de fósforo foliar e do grão

O teor de P da folha diagnose e do grão de milho variou somente com o efeito simples de híbrido ($p = 0,002$; $p = 0,004$, respectivamente; Apêndice II). O teor desse

Jonas Manica

nutriente na folha do híbrido P30F53VYHR (cerca de 3,4 g/kg) foi 90% maior, que o obtido no híbrido P1680VYHR (1,8 g/kg) (Figura 5A). O inverso foi constatado no grão. Nessa parte da planta, o teor de P foi 11% maior no híbrido P1680VYHR (2,6 g/kg), comparado ao P30F53VYHR (2,3 g/kg) (Figura 5B).

Figura 5 – Teor de fósforo (P) da folha diagnose (A) e do grão (B) de milho adubado com doses desse nutriente (P_2O_5) aplicadas na linha de semeadura dessa cultura (Estratégia 1). Média de doses. Passo Fundo, RS, 2018.



4.1.5 Eficiência nutricional

A EUI da cultura de milho variou com somente com o efeito simples de dose ($p = 0,021$) (Apêndice IV). EUI de P do Tratamento Controle e das doses de 30 e 60 kg de P_2O_5 /ha foi cerca de 1,3 kg/kg, decrescendo nas doses subsequentes até a maior dose (190 kg de P_2O_5 /ha), resultando em EUI de 0,5 kg/kg (Figura 6A).

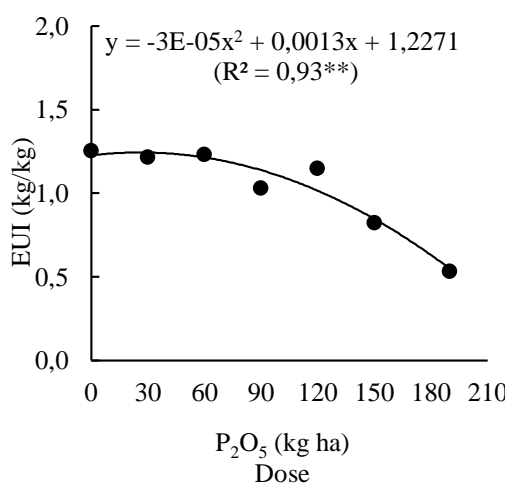
A EA e a EAP da cultura de milho variaram com os efeitos simples de dose e de híbrido ($p = 0,001$ e $p = 0,001$, respectivamente) e com a interação entre esses dois fatores ($p = 0,001$; Apêndice II). Os valores, e a variação em função das doses de P, da EA e da EAP foram semelhantes (Figuras 6B; 6C). O híbrido P30F53VYHR foi mais eficiente, e em todas as doses de P, comparado ao P1680VYHR. Verificou-se maiores EA e EAP nas doses mais baixas (30, 60 e 90 kg de P_2O_5 /ha), e no híbrido P30F53VYHR. Os maiores valores obtidos nesse híbrido foram de 399 kg/kg (EA e EAP) enquanto que o P1680VYHR foi de 244 kg/kg (EA e EAP). A EA e a EAP das maiores doses (120, 150

Jonas Manica

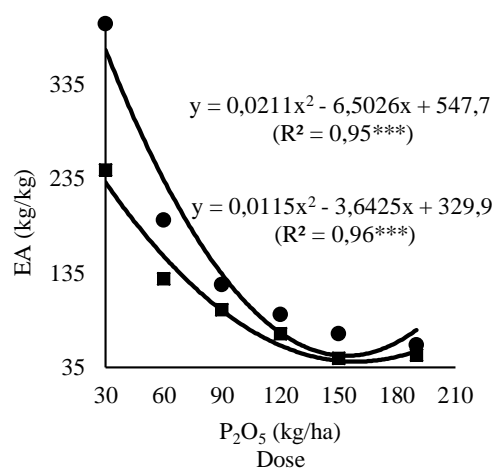
e 190 kg de P₂O₅/ha) foi cerca de 300% menor, em relação ao Tratamento Controle; e 150% menor comparado com a obtida na menor dose de P (30 kg de P₂O₅/ha).

As diferenças de EA e de EAP entre os híbridos diminuíram com aumento de P no solo. Nas doses de 120, 150 e 190 kg de P₂O₅/ha, a diferença foi pequena (cerca de 7%), até se igualarem na maior dose (Figuras 6B; 6C).

Figura 6 – Eficiência de utilização interna (EUI), eficiência agrônômica (EA) e eficiência agrônômica parcial (EAP) de milho adubado com doses de fósforo (P₂O₅) aplicadas na linha da semeadura dessa cultura (Estratégia 1). Média de híbridos (A), média de estratégias (B e C). Passo Fundo, RS, 2018.



6A



6B

4.2 Cultura de aveia-branca

4.2.1 Rendimento de grão

O RG da aveia, em resposta as doses de P aplicadas em ambas as estratégias de correção desse nutriente, variou com o efeito simples de dose e de cultivar ($p = 0,011$ e $0,0001$, respectivamente), e com efeito da interação entre esses fatores ($p = 0,0001$; Apêndice V).

O RG aumentou de forma linear sob o efeito da adubação residual realizada na cultura do milho (Estratégia 1) (Figura 7A), e de forma quadrática sob o efeito da adubação fosfatada realizada na própria cultura da aveia (Estratégia 2) (Figura 7B). Os maiores RG obtidos com a aplicação de P na semeadura do milho (Estratégia 1) foram de 1.828 e 1.782 kg/ha, das cultivares URS Taura (Eficiente) e UPFPS Farroupilha (Não eficiente), respectivamente (Figura 7A).

A cultivar UPFPS Farroupilha teve maior expressão em RG (1.782 kg/ha) quando cultivada sob a adubação residual do P aplicado na cultura do milho (Estratégia 1), mas com produção semelhante a máxima produtividade obtida com a dose de correção de 60 kg de P_2O_5 /ha realizada na cultura da aveia (1.725 kg/ha) (Figuras 7A; 7B).

Quando as aplicações de P foram realizadas na cultura da aveia (Estratégia 2), o RG da cultivar URS Taura foi maior na dose de 90 kg de P_2O_5 /ha, contrastando com o RG da UPFPS Farroupilha, que foi maior na dose de 60 kg de P_2O_5 /ha. Quando a adubação fosfatada foi efetuada nessa cultura, as diferenças de RG entre as cultivares URS Taura (maior RG) e UPFPS Farroupilha (menor RG) foram menores no Tratamento Controle e na maior dose de P (cerca de 17%). Por outro lado, as maiores diferenças entre os RG das cultivares foram obtidas nas doses entre 60 kg/ha e 150 kg/ha de P_2O_5 (Figura 7B).

O RG da aveia do Tratamento Controle variou entre as estratégias de adubação. Nas parcelas com o efeito da adubação residual da cultura do milho (Estratégia 1), o RG desse tratamento foi cerca de 1.200 kg/ha (ambas as cultivares), enquanto que com a Estratégia 2 o RG do Tratamento Controle foi de 1.544 (URS Taura) e 1.311 kg/ha

(UPFPS Farroupilha) (Figuras 7A; 7B). Com a Estratégia 2 de adubação fosfatada, o RG da URS Taura foi cerca de 12% superior, em todas as doses testadas, quando comparado ao da cultivar UPPFPS Farroupilha (Figura 7B).

O RG da URS Taura aumentou até a dose de 90 kg de P_2O_5 /ha, estabilizando na dose de 120 kg de P_2O_5 /ha, e diminuiu na dose de 190 kg de P_2O_5 /ha (Estratégia 2; Figura 6B). Já o RG da cultivar UPPFPS Farroupilha variou de forma semelhante ao da URS Taura, aumentando até a dose de 60 kg de P_2O_5 /ha, mas o RG dessa cultivar foi cerca de 38% menor, nessa dose, em relação ao da URS Taura (Figura 7B). Assim, essa cultivar foi mais eficiente, como esperado, em ambas as estratégias (Figura 7C).

A produção máxima estimada com a equação de regressão ajustada a curva de resposta da Estratégia 2, que relaciona o RG as doses aplicadas ($y = -0,0528x^2 + 11,421x + 1552,2$ e $y = -0,024x^2 + 5,8561x + 1391,2$, cultivar eficiente e não eficiente, respectivamente), foi de 2.098 e 1.724 kg/ha, na cultivar eficiente e não eficiente, respectivamente. Essas produções de grão foram obtidas com a dose de máxima eficiência técnica estimada em 157 e 178 kg P_2O_5 /ha, respectivamente. Com esse RG e dose, estima-se que a eficiência agrônômica das cultivares foi de 3,8 e 2,3 kg de grão por kg de P_2O_5 aplicado, respectivamente.

Figura 7 - Rendimento de grão (RG) de cultivares de aveia-branca adubada com doses de fósforo (P_2O_5) aplicadas na linha de semeadura de milho (Estratégia 1) (A) e na linha de semeadura de aveia-branca (Estratégia 2) (B) e RG da média das doses em cada cultivar, obtido com a Estratégia 1 (C) e a Estratégia 2 (D). Passo Fundo, 2019.

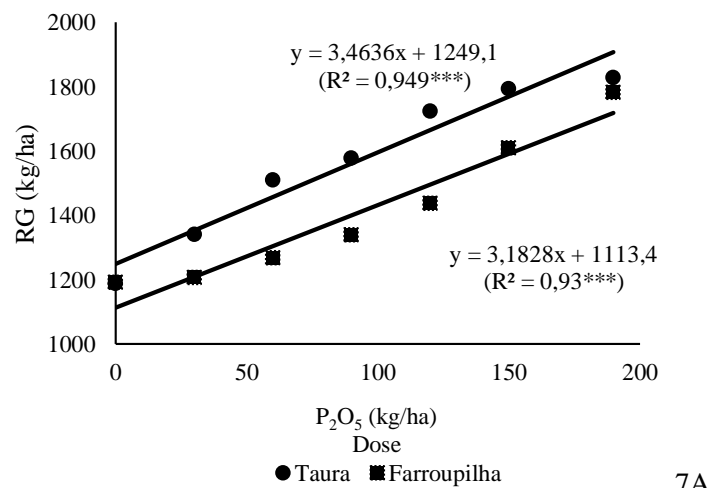
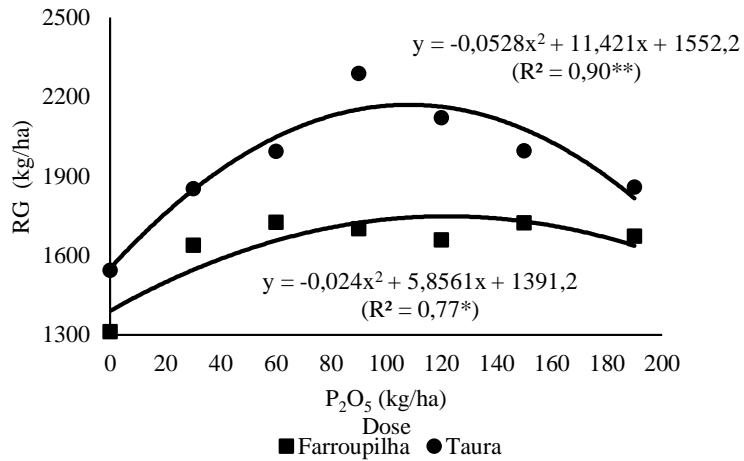
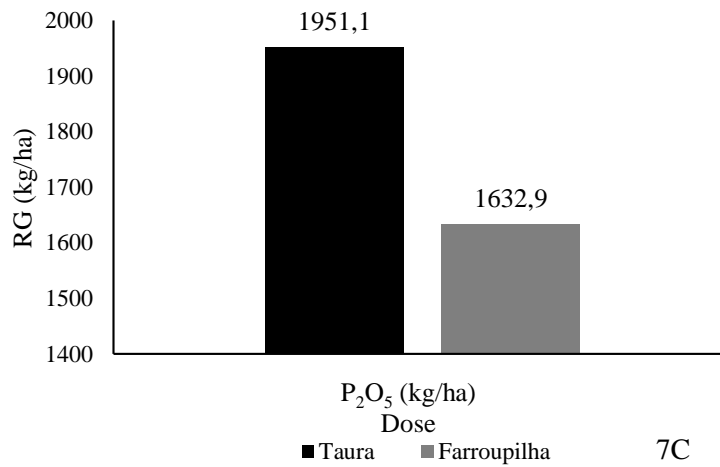


Figura 7 - Rendimento de grão (RG) de cultivares de aveia-branca adubada com doses de fósforo (P_2O_5) aplicadas na linha de semeadura de milho (Estratégia 1) (A) e na linha de semeadura de aveia-branca (Estratégia 2) (B) e RG da média das doses em cada cultivar, obtido com a Estratégia 1 (C) e a Estratégia 2 (D). Passo Fundo, 2019 (Continuação).

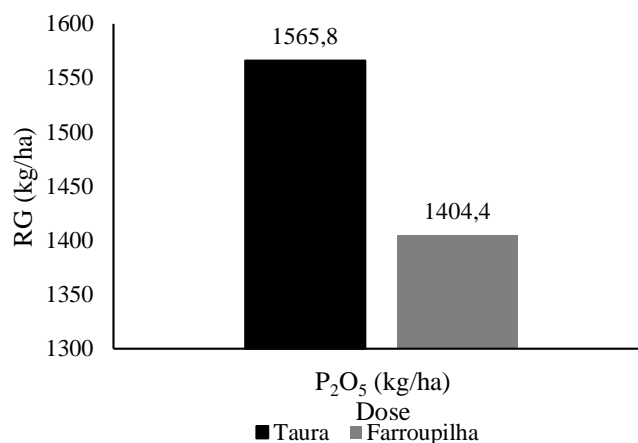


7B



7C

Figura 7 - Rendimento de grão (RG) de cultivares de aveia-branca adubada com doses de fósforo (P_2O_5) aplicadas na linha de semeadura de milho (Estratégia 1) (A) e na linha de semeadura de aveia-branca (Estratégia 2) (B) e RG da média das doses em cada cultivar, obtido com a Estratégia 1 (C) e a Estratégia 2 (D). Passo Fundo, 2019 (Continuação).



7D

4.2.2 Calibração de fósforo do solo rizosférico no perfilhamento

Com a Estratégia 1, o RG das cultivares, em resposta ao teor de P do solo do perfilhamento, aumentaram de forma linear, mas com a Estratégia 2 isso ocorreu de forma quadrática (Figuras 7A e 7B). Devido a isso, os RG máximos das cultivares foram estimados com esse modelo e essa estratégia de correção de P, obtendo-se 2.098 e 1.724 kg/ha, para a cultivar eficiente e não eficiente, respectivamente. Com esses RG máximos, calculou-se o RR (Figuras 8A e 8B). Como ilustrado nessas figuras, os valores de RR das cultivares foram semelhantes e a média das cultivares foi utilizada para calibrar o teor de P obtido no estágio de perfilhamento (Figura 9).

Os teores de P do solo estimado com a equação de regressão da curva de resposta da Figura 9B ($y = -0,3771x^2 + 12,638x - 4,3627$) indicaram as seguintes classes de disponibilidade desse nutriente no solo: Médio: < 9 mg P/kg; Alto: 9 a 18 mg P/kg; e Muito Alto: > 19,0 mg P/kg.

Figura 8- Rendimento de grão relativo (RR) das cultivares URS Taura (Eficiente) e UPFPS Farroupilha (Não eficiente) de aveia-branca adubada em função das doses de fósforo (P₂O₅) aplicadas na linha de semeadura dessa cultura (Estratégia 2) (A) e em função do teor desse nutriente no solo, no estágio de perfilhamento (B). Passo Fundo, 2019.

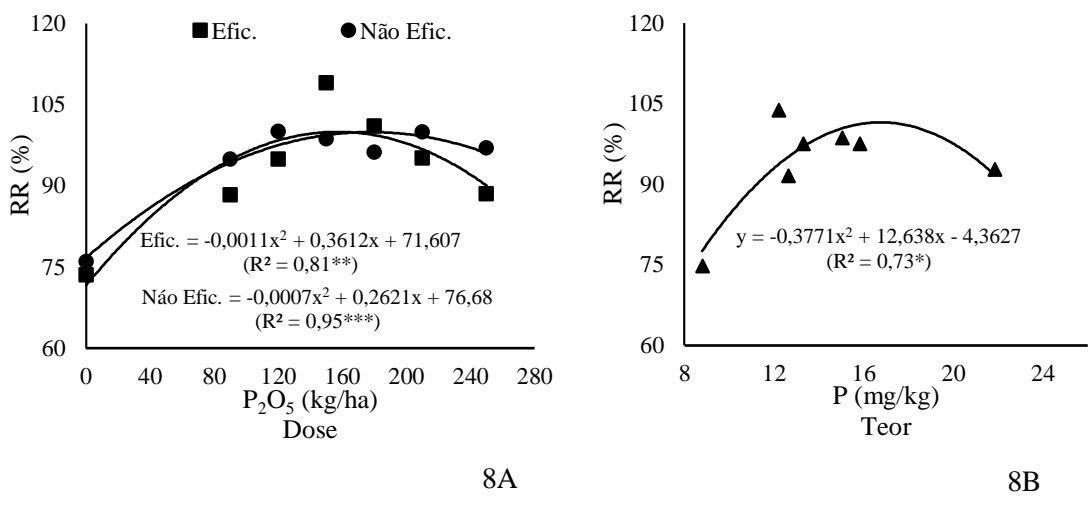
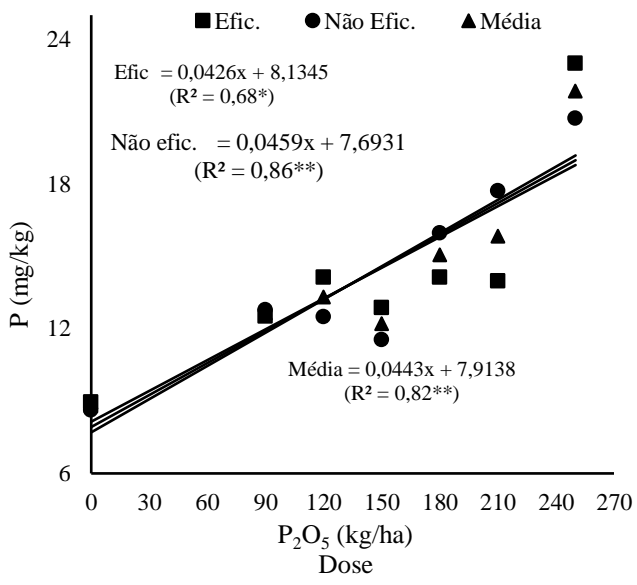


Figura 9 – Teor de fósforo (P) do solo rizosférico, no perfilhamento das cultivares URS Taura e UFPS Farroupilha de aveia-branca, adubadas com doses desse nutriente (P₂O₅), aplicadas na linha de semeadura dessa cultura (Estratégia 2) (A). Efeito de cultivar na média de doses (B). Passo Fundo, 2019.



4.2.3 Teor de fósforo do solo rizosférico na antese

Com a Estratégia 1 de adubação fosfatada (correção na cultura do milho), o teor de P do solo foi influenciado somente por doses ($p = 0,001$) e híbridos ($p = 0,021$). Com essa estratégia de aplicação de P, o teor desse nutriente acompanhou as doses aplicadas, aumentando de forma linear, partindo de 10 mg/kg, no Tratamento Controle; até 52 mg/kg, na maior dose (190 kg de P_2O_5 /ha) (Figuras 10A; 10B).

Com a Estratégia 2 de adubação fosfatada, o teor de P do solo rizosférico foi influenciado somente pelas doses aplicadas desse nutriente ($p = 0,001$, Apêndice IV), indicando que as cultivares não alteraram essa variável (Figura 10C). Com essa estratégia de aplicação de P, o teor desse nutriente acompanhou as doses aplicadas, aumentando de forma linear, partindo de 9 mg/kg, no Tratamento Controle; até 62 mg/kg, na maior dose (190 kg de P_2O_5 /ha) (Figuras 10C).

Com a Estratégia 2 de correção de P, o RG das cultivares avaliadas não acompanhou o incremento de P do solo, que aumentou de forma linear, enquanto que o RG aumentou de forma quadrática e foi relativamente baixo. A expressão do máximo RG das cultivares URS Taura e UPFPS Farroupilha foi observado nas doses 120 e 150 kg de P_2O_5 /ha, respectivamente (Figura 10C).

Figura 10 – Teor de fósforo (P) do solo rizosférico, na antese de aveia-branca adubada com doses desse nutriente (P_2O_5), aplicadas na linha de semeadura da cultura de milho (A e B) e de aveia-branca (C) (Estratégia 2). Média de cultivar (A; C), média de doses (B). Passo Fundo, 2021.

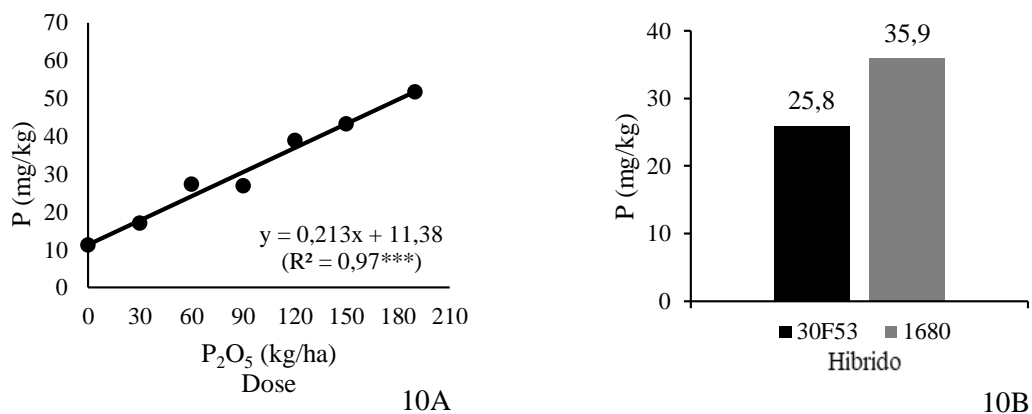
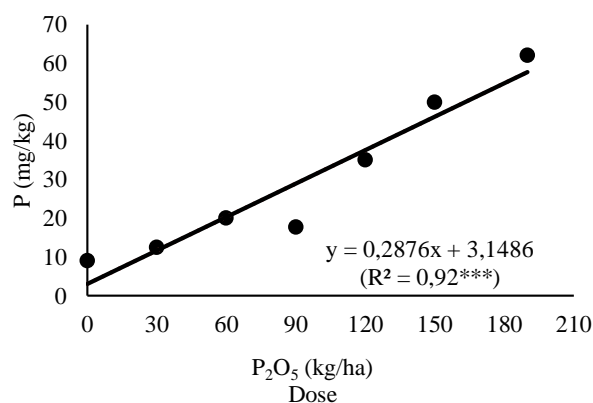


Figura 10 – Teor de fósforo (P) do solo rizosférico, na antese de aveia-branca adubada com doses desse nutriente (P_2O_5), aplicadas na linha de semeadura da cultura de milho (A e B) e de aveia-branca (C) (Estratégia 2). Média de cultivar (A; C), média de doses (B). Passo Fundo, 2021 (Continuação).



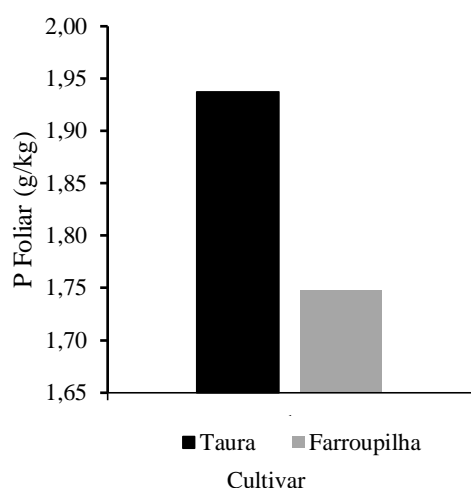
10C

4.2.4 Teor de fósforo foliar e do grão

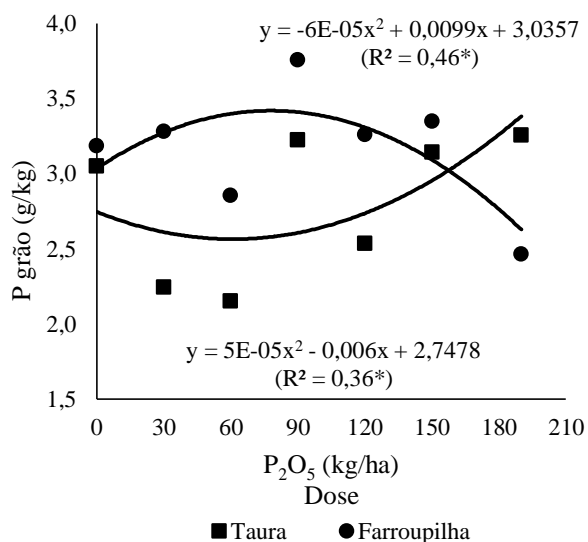
O teor de P da folha diagnose da cultura de aveia, adubada com a Estratégia 2, variou somente com o efeito simples de cultivar ($p = 0,020$; Apêndice IV). Por outro lado, o teor de P do grão variou somente com a interação entre cultivar e dose ($p = 0,0020$; Apêndice V).

Na folha da cultivar URS Taura, o teor desse nutriente (cerca de 1,94 g/kg) foi 10,8% maior, que o da UPFPS Farroupilha (1,85 g/kg; Figura 11A). Já o teor de P no grão de ambas as cultivares foi crescente até a dose de 90 kg/ha de P_2O_5 , decrescendo após essa dose. A cultivar UPFPS Farroupilha teve teores de P cerca de 20% menores que a do Tratamento Controle, até a dose de 60 kg/ha de P_2O_5 . Após essa dose, o teor de P do grão dessa cultivar aumentou até a maior dose aplicada (190 kg/ha de P_2O_5), quando superou o teor acumulado no grão da URS Taura (3,3 g/kg; Figura 11B).

Figura 11 – Teor de fósforo (P) da folha diagnose (A) e do grão (B) de aveia-branca adubada com doses desse nutriente (P_2O_5) (Estratégia 2). Média de doses (A) e média de cultivares (B). Passo Fundo, RS, 2019.



11A



11B

4.2.5 Eficiência nutricional

Como observado na cultura de milho, a EUI da cultura da aveia variou somente com o efeito simples de dose de P e de cultivar ($p = 0,041$ e $p = 0,030$, respectivamente; Apêndice VII).

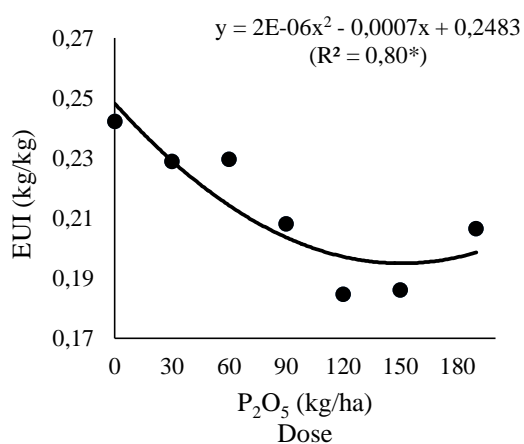
A EUI de P do Tratamento Controle foi cerca de 0,25 kg/kg, decrescendo nas doses subsequentes até a dose de 150 kg de P_2O_5 /ha, resultando em 0,20 kg/kg (Figura 12A). Já a EUI da cultivar URS Taura (0,23 kg/kg) foi cerca de 20% maior que a da UPFPS Farroupilha (0,19 kg/kg) (Figura 12B; Apêndice VII).

A EA da cultura da aveia variou com somente com o efeito simples de dose de P ($p = 0,001$; Apêndice VII). A EA, como a EUI, foi maior no Tratamento Controle (8,5 kg/kg), cerca de 280% maior que a da dose de 150 kg de P_2O_5 /ha (2,2 kg/kg) (Figura 12C).

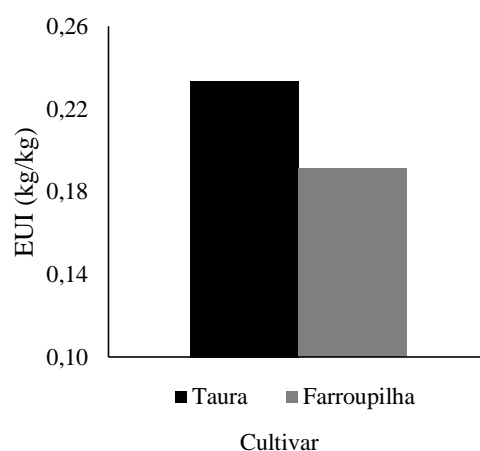
A EAP da aveia variou com os efeitos simples de dose e de cultivar ($p = 0,0264$ e $p = 0,001$, respectivamente) e com a interação entre esses dois fatores ($p = 0,031$; Apêndice VII). A EAP da URS Taura foi maior, e em todas as doses de P, comparada a

da UPFPS Farroupilha. Verificou-se maior EAP nas doses de 30 kg de P₂O₅/ha, com cerca de 0,06 kg/kg, na URS Taura; e 0,04 kg/kg, na URS 21. Já na dose de 60 kg de P₂O₅/ha, a EUP diminuiu para cerca de 0,03 kg/kg, em ambas as cultivares, e essa tendência seguiu até a maior dose de P (190 kg de P₂O₅/ha), em que a EUP foi de 0,01kg/kg (Figura 12D).

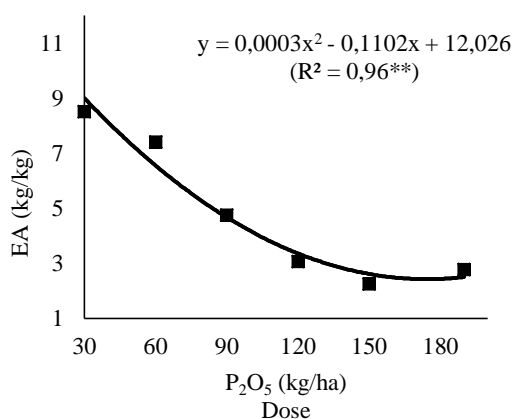
Figura 12 – Eficiência de utilização interna (EUI), eficiência agrônômica (EA) e eficiência agrônômica parcial (EAP) de aveia adubada com doses de fósforo (P₂O₅) aplicadas na linha de semeadura dessa cultura (Estratégia 2). Média simples de cultivar (A, C), média de doses (B). Passo Fundo, RS, 2019.



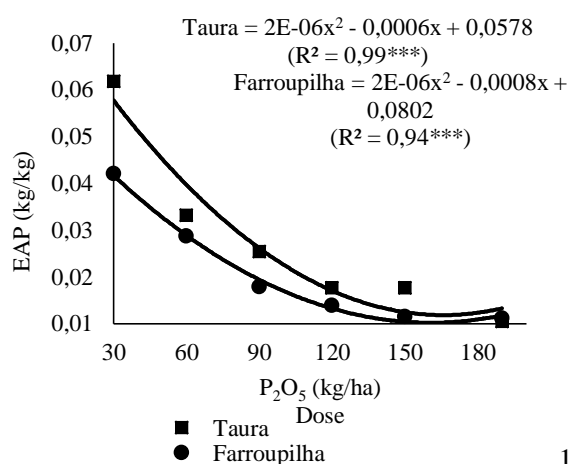
12A



12B



12C



12D

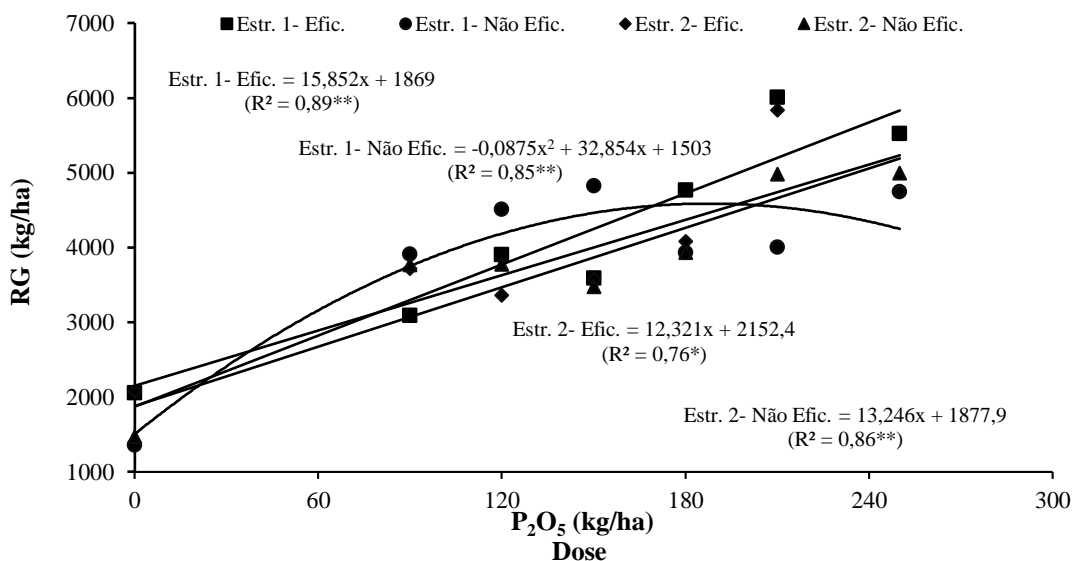
4.3 Cultura da soja

4.3.1 Rendimento de grão

O RG da cultura da soja variou com os efeitos simples de cultivar e dose, com a interação desses dois fatores e a interação tripla dos tratamentos (Apêndice VIII). Os resultados da interação tri-fatorial de cultivar x dose x estratégia de adubação foram muito semelhantes ao efeito bifatorial de cultivar x dose (Figura 10).

O RG das cultivares de soja aumentou de forma linear com o efeito residual da adubação fosfatada, exceto o da cultivar não eficiente Na Estratégia 1, que aumentou de forma quadrática ($Y = -0,0875x^2 + 32,854x + 1503$) (Figura 13). A produção máxima estimada com essa equação de regressão foi de 4.587 kg/ha, obtida com a dose de máxima eficiência técnica estimada em 188 kg P₂O₅/ha. Com esse RG e dose, estima-se que a eficiência agrônômica dessa cultivar e estratégia de correção foi 16,4 kg de grão por kg de P₂O₅ aplicado.

Figura 13 - Rendimento de grão (RG) de cultivares de soja sob efeito residual de doses de fósforo (P₂O₅) aplicadas na linha da semeadura de milho (Estratégia 1) ou da aveia-branca (Estratégia 2). Passo Fundo, RS, 2019.



No Tratamento Controle, o RG das cultivares de soja foi cerca de 45% maior com a cultivar eficiente (BMX Ativa), em relação a não eficiente (DM 53i54), na médias das estratégias (Figura 13). Na cultivar eficiente (Ativa), o maior RG foi observado com a dose de 210 kg P₂O₅/ha, em que o RG foi 6.010 kg/ha (Estratégia 1) e 5.838 kg/ha (Estratégia 2), e o incremento no RG foi cerca de 3 vezes maior que o do Tratamento Controle. Na cultivar não eficiente (53i54), o maior efeito residual dessa adubação foi

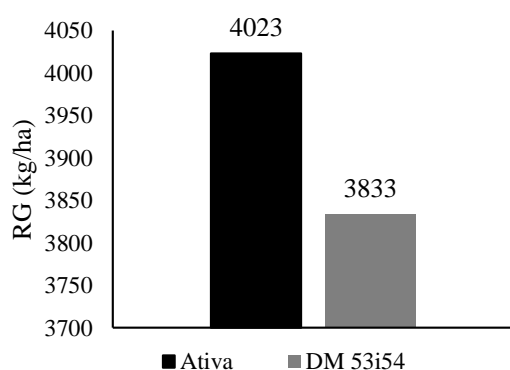
observado com a dose de 150 kg P₂O₅/ha (4.820 kg/ha; Estratégia 1) e 250 kg P₂O₅/ha (4.991 kg/ha; Estratégia 2), e o incremento em relação ao RG do Tratamento Controle também foi cerca de 3 vezes maior (Figura 13).

Nas doses de P menores que 180 kg P₂O₅/ha, aplicadas com a Estratégia 1, o RG da cultivar não eficiente (53i54) foi maior que o da eficiente (Ativa), e o contrário foi verificado com a aplicação de doses maiores que essa. Com a Estratégia 2 essa diferença foi menor e observada nas doses de 90, 120 e 240 kg P₂O₅/ha (Figura 13).

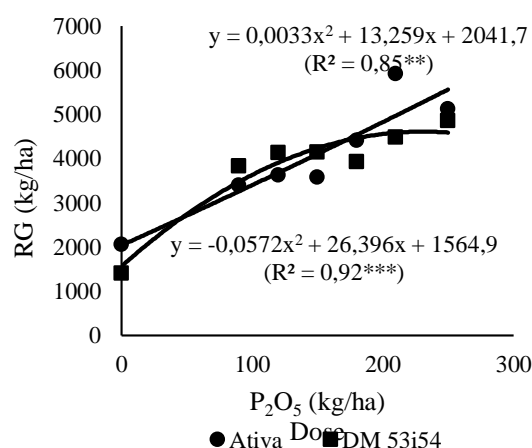
Na Figura 14, comparou-se o efeito das cultivares de soja com o efeito residual das doses e das estratégias de adubação. Na média das doses de P, o RG da cultivar BMX Ativa (4.023 kg/ha, Eficiente) foi cerca de 5% superior ao da cultivar DM53i54 (3.833 kg/ha, Não eficiente; Figura 14A). Essa diferença foi, principalmente, influenciada pelo maior RG dessa última cultivar, nas doses de 90 a 150 kg de P₂O₅/ha, da Estratégia 1 (Figura 14 B).

Na média das estratégias de correção de P, as cultivares BMX Ativa e DM53i54 partiram de baixos rendimentos (2.065 e 1.412 kg/ha, respectivamente, Tratamento Controle).

Figura 14- Rendimento de grão (RG) de cultivares de soja sob o efeito residual da adubação fosfatada. Efeito de cultivar, na média das doses de fósforo (P₂O₅) e de estratégia de correção (A) e média das estratégias (B). Passo Fundo, 2019.



14A



14B

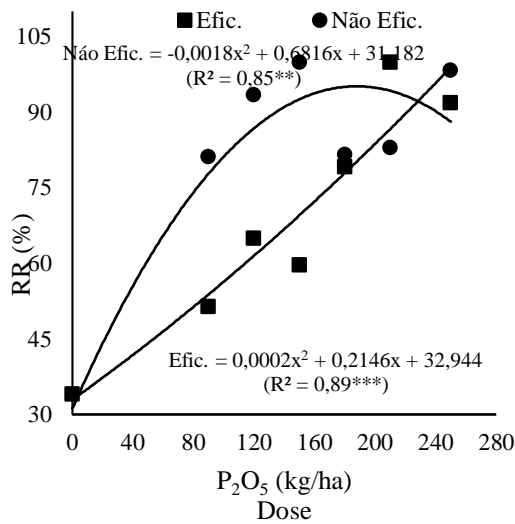
4.3.2 Calibração de fósforo do solo amostrado antes da semeadura da soja

Das quatro curvas de respostas do RG da soja, obtidas em função doses de P, o modelo de regressão quadrático foi ajustado em somente uma das curvas (Figura 14B). Como as outras curvas de respostas da soja seguiram o modelo linear, o RG máximo considerado para calcular o RR da soja (Ambas as estratégias e cultivares) foi o valor de RG máximo obtido nos resultados experimentais, e não foi estimado com os modelos de regressão, ao contrário do procedimento utilizado no milho e na aveia.

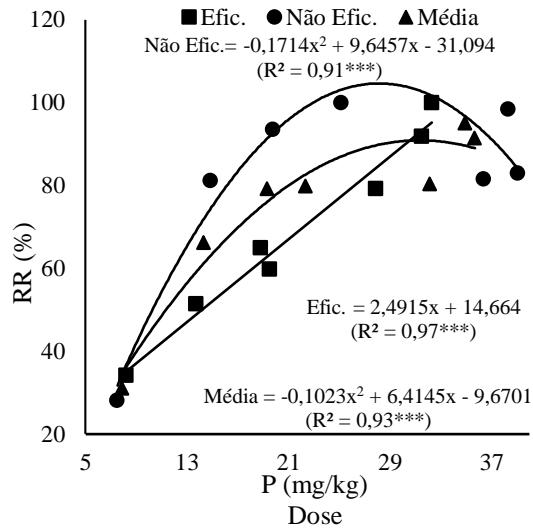
Na estratégia 1, o RR da cultivar eficiente aumentou de forma linear em função do teor de P do solo, e, por isso, não foi possível calibrar os teores desse nutriente (Figura 15 B). Por outro lado, a curva de resposta da cultivar não eficiente ($y = -0,1714x^2 + 9,6457x - 31,094$) e a curva de resposta da média das cultivares seguiu tendência quadrática ($y = -0,1023x^2 + 6,4145x - 9,6701$). Com essas equações, estimou-se as seguintes classes de disponibilidade desse nutriente no solo, para a cultivar não eficiente: Muito Baixo: < 9 mg P/kg; Baixo: 9 a 14 mg P/kg; Médio: 15 a 19 mg P/kg; Alto: 20 a 38,0 mg P/kg; e Muito Alto: > 38 mg P/kg. Para a média das cultivares, as classes de interpretação de P foram: Muito Baixo: < 10 mg P/kg; Baixo: 10 a 18 mg P/kg; Médio: 19 a 28 mg P/kg; Alto: 29 a 58 mg P/kg; e Muito Alto: > 58 mg P/kg.

Na estratégia 2, o maior RR estimado para a cultivar eficiente foi 84%, quando o teor de P foi 32 mg/kg. Com o modelo ajustado a essa cultivar ($y = -0,0818x^2 + 5,2261x + 0,7099$; Figura 15 D), o RR não atingiu o valor esperado no teor crítico (90%), e o teor de P do solo não foi calibrado. Por outro lado, isso não ocorreu com a cultivar não eficiente e com a média das cultivares, e o teor de P foi calibrado, obtendo-se as seguintes classes de disponibilidade desse nutriente no solo, para cultivar não eficiente: Muito Baixo: < 10 mg P/kg; Baixo: 10 a 16 mg P/kg; Médio: 17,0 a 22 mg P/kg; Alto: 23 a 46 mg P/kg; e Muito Alto: > 47 mg P/kg. A calibração de P da média das cultivares indicou as seguintes classes de disponibilidade desse nutriente no solo: Muito Baixo: < 9,0 mg P/kg; Baixo: 9,0 a 18 mg P/kg; Médio: 19 a 26 mg P/kg; Alto: 27 a 54 mg P/kg; e Muito Alto: > 54 mg P/kg.

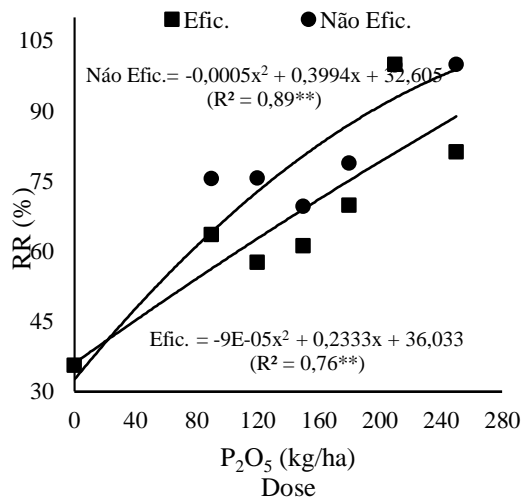
Figura 15 - Rendimento de grão relativo (RR) das cultivares BMX Ativa (Eficiente) e DM 53i54 (Não eficiente) de soja, adubadas em função de doses de fósforo (P_2O_5) aplicadas na linha de semeadura de milho (Estratégia 1) (A) ou de aveia-branca (C), e em função do teor desse nutriente no solo, no estágio V5 (B; D; Estratégias 1 e 2, respectivamente). Passo Fundo, 2019.



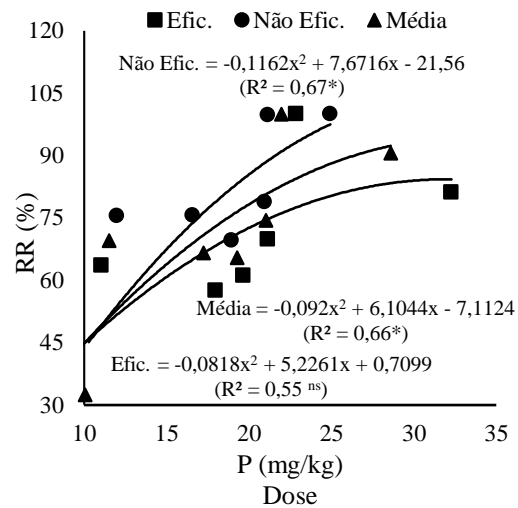
15A



15B



15C



15D

4.3.3 Teor de fósforo do solo no estágio de florescimento pleno

Com exceção dos efeitos simples de cultivar e estratégia, os demais fatores e interações testadas entre eles influenciaram o teor de P do solo rizosférico da cultura da soja, no estágio R2 (Apêndice VIII).

Embora o teor de P do solo variou com o efeito trifatorial de cultivar x dose x estratégia (Figura 16A) e com o efeito bifatorial de cultivar x dose (Figura 16B), as maiores diferenças nos valores dessa variável foram observadas entre as doses de P (Figura 16C). Como as diferenças observadas entre as estratégias de correção de P ou entre as cultivares de soja e a associação desses dois fatores, em função das doses de P, foi pequena, e de difícil aplicação prática dos resultados, será destacado o efeito simples de doses nas culturas precedentes a soja.

Na média de cultivares e de estratégias, o teor de P do solo variou de 10 mg/kg (Tratamento Controle), ou da Classe Média de interpretação desse nutriente; a 23 mg/kg (maior dose), correspondendo a Classe de P Alto (Figura 16C). Essa variação foi linear e o teor Alto de P (≥ 12 a 24 mg/kg) foi observado já na menor dose de P (90 kg P_2O_5 /ha). Essa dose consistiu em 30 kg P_2O_5 /ha, adicionada na menor dose de correção testada; mais 60 kg P_2O_5 /ha, adicionada para a manutenção do P extraído pela cultura de milho ou aveia, em ambas as estratégias de correção testadas. As demais doses de P (120, 150, 190, 210 e 250 kg de P_2O_5 /ha) proporcionaram teores de P no solo classificados como Alto (16, 14, 20, 21 e 23 mg/kg, respectivamente) (Figura 16C).

Figura 16 – Teor de fósforo (P) do solo rizosférico de cultivares de soja no estágio de florescimento pleno (R2), sob efeito residual de doses desse nutriente (P_2O_5) aplicadas na linha de semeadura do milho (Estratégia 1) ou da aveia-branca (Estratégia 2). Média das estratégias de correção (B) e média de cultivar de soja e estratégia de correção (C). Passo Fundo, RS, 2019.

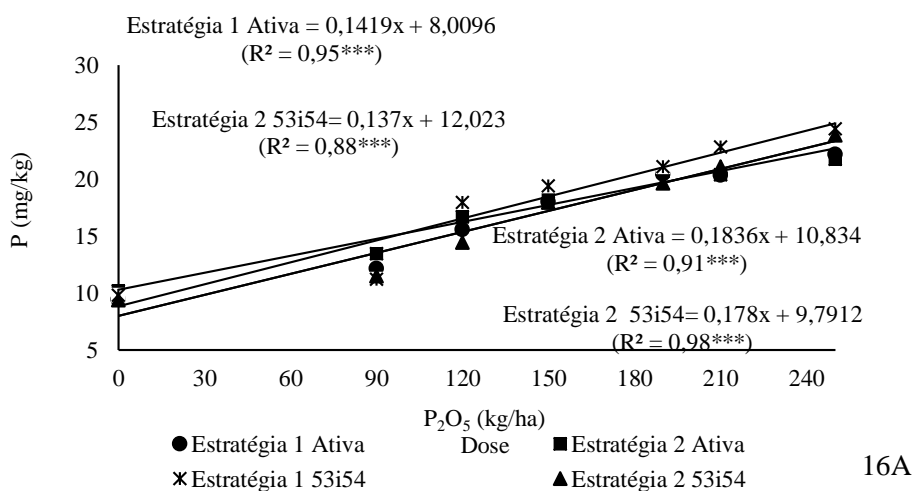
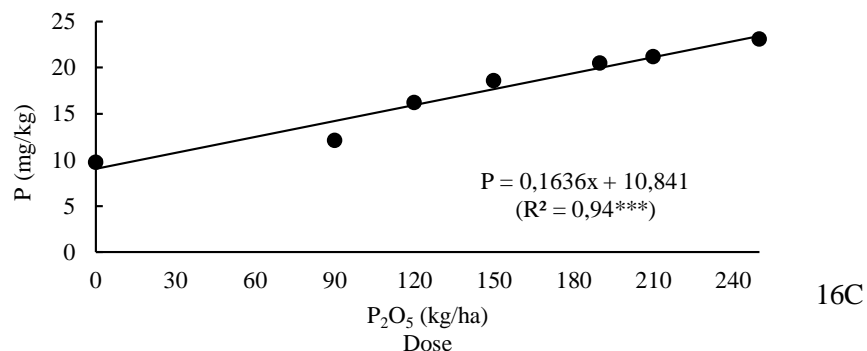
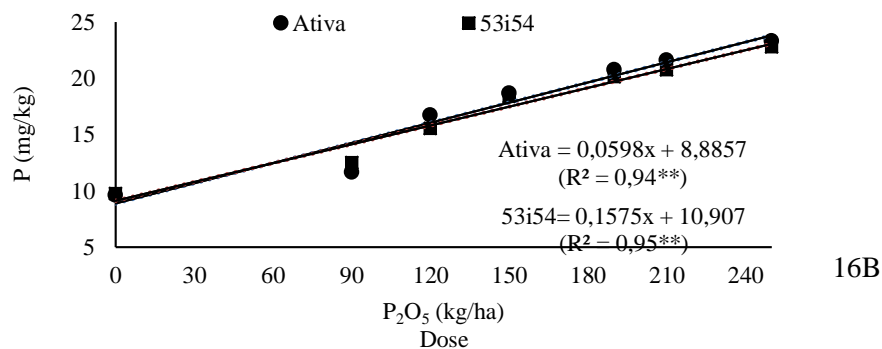


Figura 16 – Teor de fósforo (P) do solo rizosférico de cultivares de soja no estágio de florescimento pleno (R2), sob efeito residual de doses desse nutriente (P_2O_5) aplicadas na linha de semeadura do milho (Estratégia 1) ou da aveia-branca (Estratégia 2). Média das estratégias de correção (B) e média de cultivar de soja e estratégia de correção (C). Passo Fundo, RS, 2019 (Continuação).



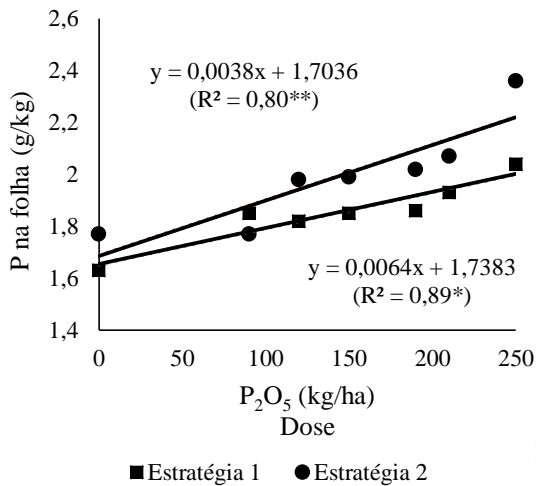
4.3.4 Teor de fósforo foliar e do grão

O teor de P da folha diagnose da soja somente variou com o efeito simples da estratégia de correção ($p = 0,031$) e da interação desse fator com as doses de P aplicadas nas culturas precedentes ($p = 0,028$; Apêndice VIII). Esse último efeito também foi observado no teor de P do grão da soja, que variou somente com a interação desses fatores ($p = 0,032$; Apêndice VIII; Figura 17B).

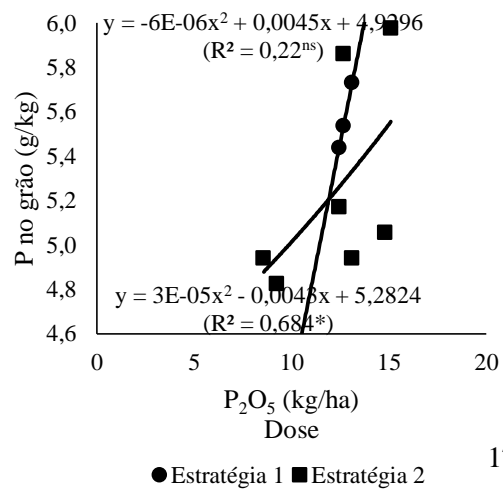
Em ambas as estratégias de correção de P do solo, o teor foliar desse nutriente aumentou com o efeito residual das doses de P aplicadas nas culturas precedentes, e, em

geral, foi maior com o efeito residual das doses aplicadas na cultura da aveia (Estratégia 2; Figura 17A).

Figura 17 – Teor de fósforo (P) na folha diagnose da soja, no florescimento pleno (A), e no grão dessa cultura, na maturação fisiológica (B), sob efeito residual de doses de fósforo (P_2O_5), aplicadas na semeadura do milho (Estratégia 1) ou da aveia-branca (Estratégia 2). Média de cultivares. Passo Fundo, RS, 2019.



17A



17B

4.3.5 Eficiência nutricional

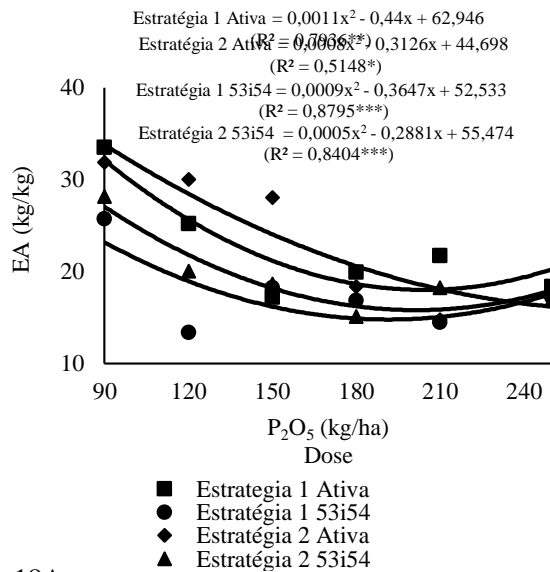
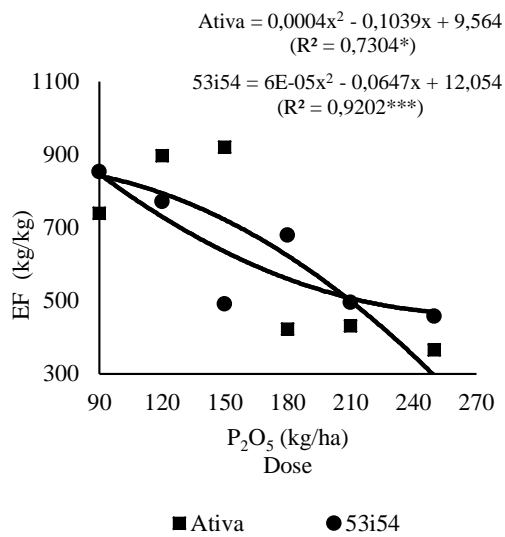
A EF da soja variou somente com a interação entre cultivar e dose ($p = 0,021$; Apêndice X). A EF da cultivar BMX Ativa foi maior que a da cultivar DM 53i54. A EF da BMX Ativa foi cerca de 15% maior, na dose acumulada de 90 kg de P_2O_5 /ha; e cerca de 100% maior, nas doses de 150 e 180 kg de P_2O_5 /ha, até se igualarem na dose de 210 kg de P_2O_5 /ha e a partir desta a DM 53i54 teve maior EF (Figura 18A).

A EA da soja variou somente com o efeito simples de estratégia de correção ($p = 0,032$) e de dose ($p = 0,001$), além dos efeitos da interação entre cultivar e dose ($p = 0,001$), e da interação tripla de doses, estratégias e cultivares ($p = 0,021$; Apêndice X; Figura 18B).

A EF da BMX Ativa foi maior que da DM 53i54, em todas as doses de P, exceto na maior dose de P acumulado (250 kg de P₂O₅/ha). A estratégia de correção pouco influenciou os resultados, de modo que o efeito de cultivar explicou melhor as diferenças de EA (Figura 18B).

A EAP da soja variou somente com o efeito simples de dose ($p = 0,001$) e com a interação entre cultivar e dose ($p = 0,021$; Apêndice X). A EAP foi cerca de 200% maior na menor dose de P residual (90 kg de P₂O₅/ha), comparado com a maior (250 kg de P₂O₅/ha). A EAP da BMX ativa foi 30% maior que a da DM 53i54, em todas as doses de P; Figura 18C).

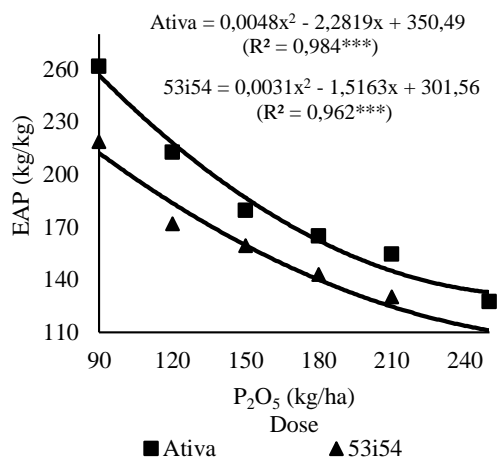
Figura 18 – Eficiência de utilização interna (EF), eficiência agrônômica (EA) e eficiência agrônômica parcial (EAP) de aveia-branca adubada com doses de fósforo (P₂O₅) aplicadas na linha de semeadura dessa cultura (Estratégia 2). Média de estratégias (A e C). Passo Fundo, RS, 2019.



18A

18B

Figura 18 – Eficiência de utilização interna (EF), eficiência agrônômica (EA) e eficiência agrônômica parcial (EAP) de aveia-branca adubada com doses de fósforo (P_2O_5) aplicadas na linha de semeadura dessa cultura (Estratégia 2). Média de estratégias (A e C). Passo Fundo, RS, 2019.



18C

4.4 Rendimento de grão do sistema milho-aveia-soja

Com exceção dos efeitos simples da estratégia de correção e da interação desse fator com cultivar, os demais fatores e interações testados no trabalho influenciaram o RG do sistema milho-aveia-soja (Apêndices II; V; VIII).

A interação trifatorial ilustrada na Figura 19A mostra que o RG acumulado no sistema de culturas respondeu as doses de P, e essa resposta variou mais entre os genótipos eficientes e não eficiente, que entre as estratégias de correção.

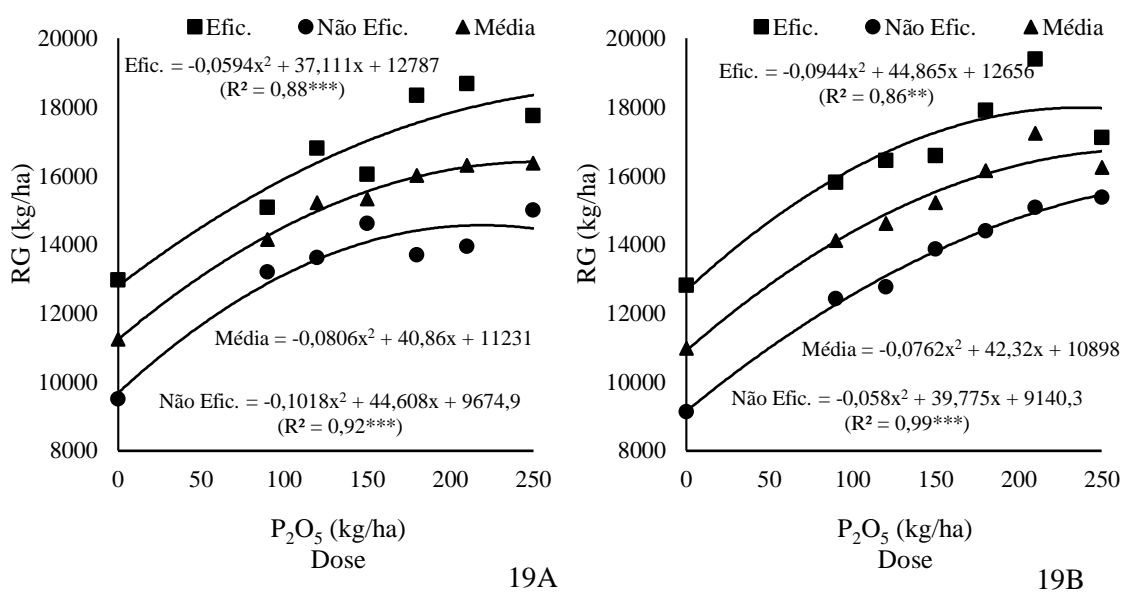
Nas duas estratégias de correção, o RG acumulado das três culturas avaliadas aumentou de forma quadrática, em função das doses de P. O maior acúmulo de RG dos genótipos eficientes foi observado com a dose de 210 kg P_2O_5 /ha, e com a dose de 250 kg P_2O_5 /ha, nos genótipos não eficientes (Figura 19A).

Na estratégia 1, a produção máxima estimada com as equações de regressão da Figura 19A, foi 18.583 (Eficientes), 16.409 (Não eficientes) e 16.409 (Média dos genótipos) kg/ha Esses RG foram estimados com as seguintes doses de máxima eficiência técnica: 312, 219 e 253 kg P_2O_5 /ha, respectivamente. Com esses resultados a eficiência

agronômica máxima dos genótipos eficientes foi estimada em 18,6 kg de grão por kg de P_2O_5 aplicado no milho (Adubação de correção) e na aveia-branca (Adubação de manutenção). Nos genótipos não eficientes essa eficiência foi estimada em 22,3 kg de grão por kg de P_2O_5 aplicados. Na média dos genótipos a eficiência máxima da adubação fosfatada foi estimada em 20,4 kg de grão por kg de P_2O_5 aplicado.

Na estratégia 2, a produção máxima estimada com as equações de regressão da Figura 19B foi 17.987 (Eficientes), 15.959 (Não eficientes) e 16.774 kg/ha (Média dos genótipos). Esses RG foram estimados com as seguintes doses de máxima eficiência técnica: 238, 343 e 278 kg P_2O_5 /ha, respectivamente. Com esses resultados, a eficiência agrônômica máxima dos genótipos eficientes foi estimada em 22,4 kg de grão por kg de P_2O_5 aplicado no milho (Adubação de manutenção) e na aveia-branca (Adubação de correção). Nos genótipos não eficientes essa eficiência foi estimada em 19,9 kg de grão por kg de P_2O_5 aplicados. Na média dos genótipos a eficiência máxima da adubação fosfatada foi estimada em 21,2 kg de grão por kg de P_2O_5 aplicado.

Figura 19 - Rendimento de grão (RG) acumulado de genótipos de milho, aveia-branca e soja, com eficiência de P contrastante, sob efeito de doses de fósforo (P_2O_5) aplicadas na linha de semeadura do milho (Estratégia 1) (A) ou da aveia-branca (Estratégia 2) (B). Passo Fundo, 2019.



4.4.1 Calibração de fósforo do sistema milho-aveia-soja

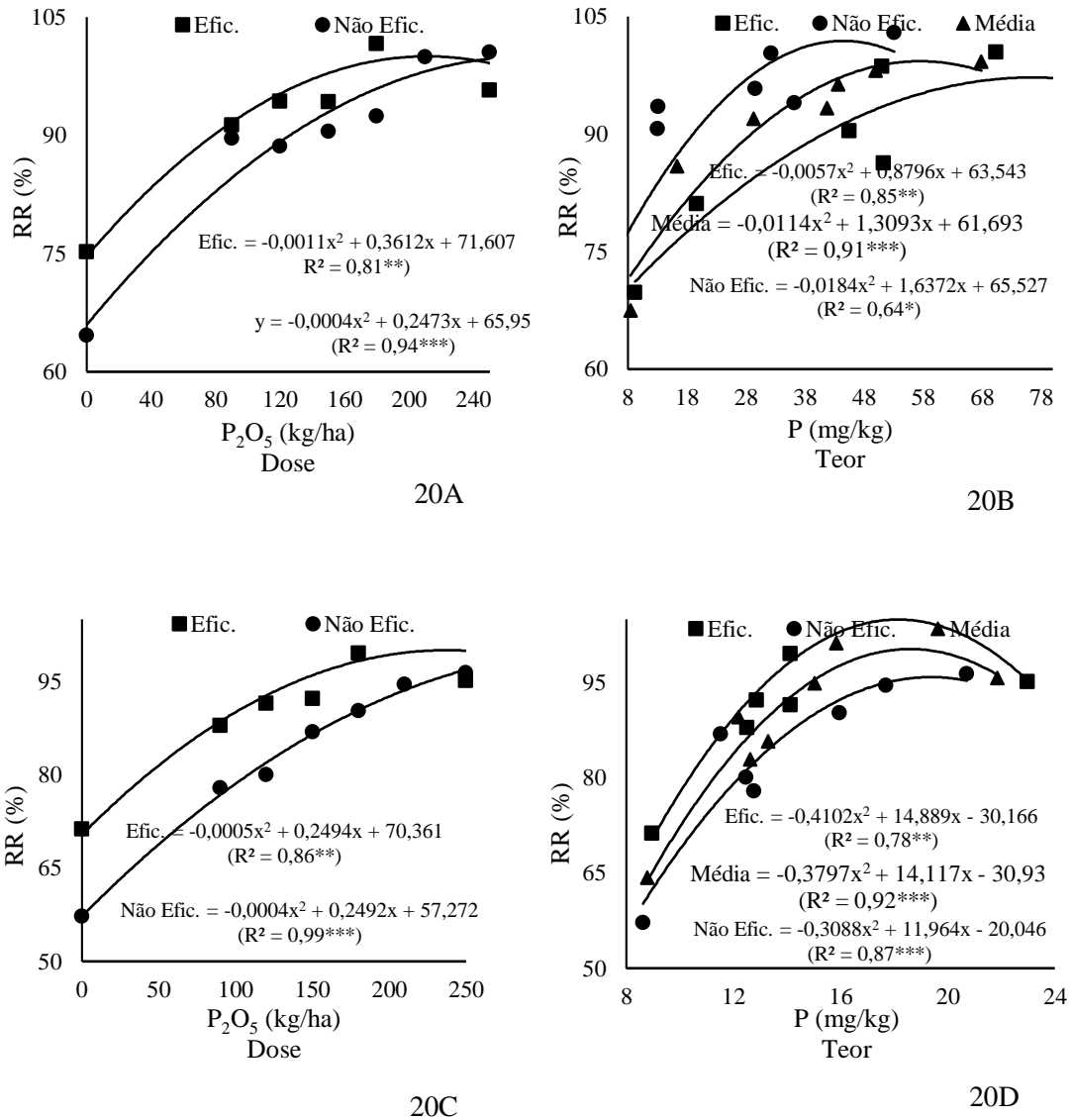
Os RRs acumulados dos genótipos foram calculados usando como valor de RG máximo acumulado o RG estimado para as doses de máxima eficiência técnica, obtidas com as equações de regressão das figuras 20 A e 20 C.

Com os valores do RR acumulado e os teores de P do solo de cada estratégia (Figuras 20B; 20D), as classes de interpretação desse nutriente foram calibradas, como realizado nos cultivos individuais das culturas. Considerando que a calibração é para a adubação do sistema de culturas, na estratégia 1, o teor de P utilizado foi o da cultura de milho, do solo amostrado no estágio V5; enquanto que na estratégia 2, o teor de P utilizado foi o da cultura da aveia, do estágio do perfilhamento.

Na estratégia 1, estimou-se as seguintes classes de disponibilidade de P do solo amostrado na cultura de milho, para os genótipos eficientes: Baixo: < 15 mg P/kg; Médio: 15 a 39 mg P/kg; Alto: 40 a 80 mg P/kg; e Muito Alto: > 81 mg P/kg. Para os genótipos não eficientes, as classes de interpretação de P foram: Baixo: < 8 mg P/kg; Médio: 8 a 19 mg P/kg; Alto: 20 a 40 mg P/kg; e Muito Alto: > 41 mg P/kg. Para a média dos genótipos, as classes de interpretação de P foram: Baixo: < 12 mg P/kg; Médio: 12 a 28 mg P/kg; Alto: 29 a 58 mg P/kg; e Muito Alto: > 58 mg P/kg.

Na estratégia 2, estimou-se as seguintes classes de disponibilidade de P do solo amostrado na cultura da aveia, para os genótipos eficientes: Baixo: < 9 mg P/kg; Médio: 9 a 12 mg P/kg; Alto: 13 a 26 mg P/kg; e Muito Alto: > 26 mg P/kg. Para os genótipos não eficientes, as classes de interpretação de P foram: Baixo: < 11 mg P/kg; Médio: 12 a 15 mg P/kg; Alto: 16 a 32 mg P/kg; e Muito Alto: > 32 mg P/kg. Para a média dos genótipos, as classes de interpretação de P foram: Baixo: < 11 mg P/kg; Médio: 11 a 13 mg P/kg; Alto: 14 a 28 mg P/kg; e Muito Alto: > 28 mg P/kg.

Figura 20 - Rendimento de grão relativo (RR) acumulado de genótipos de milho, aveia-branca e soja, com eficiência de P contrastante, sob efeito de doses de fósforo (P_2O_5) aplicadas na linha de semeadura do milho (Estratégia 1) (A) ou da aveia-branca (Estratégia 2) (C), e em função do teor desse nutriente no solo, no estágio V5 do milho (B) ou no perfilhamento da aveia (D).



5. Discussão

5.1 – Rendimento de grão das culturas

As culturas avaliadas responderam as doses de P, ou aumento dos teores desse nutriente no solo. Contudo, o RG de milho do Tratamento Controle foi relativamente alto

Jonas Manica

(8.346 kg/ha, na média dos híbridos), em comparação aos obtidos com as doses testadas. Além disso, verificou-se que o maior RG de milho (10.088 kg/ha, obtido com a dose de 120 kg P₂O₅/ha) diferiu pouco, em relação ao do Tratamento Controle, considerando a quantidade de P aplicado nessa cultura. Isso pode ser atribuída a disponibilidade inicial de P do solo (Discutido no item 6.3), para essa cultura.

A resposta a adubação fosfatada da cultura de milho indica que as recomendações de doses de P, anteriormente adotadas na região do trabalho (CQFS-RS/SC, 2004), são adequadas a condição do experimento. Em 2004, a dose de correção sugerida para solos da classe de P Médio era 60 kg P₂O₅/ha, enquanto que atualmente é 80 kg P₂O₅/ha, ou 120 kg P₂O₅/ha, em solos com P baixo. Os resultados dos teores de P do solo dessa cultura e do RG mostram que esse nutriente foi corrigido com doses que variaram entre 30 a 60 kg de P₂O₅/ha, que são menores também que as descritas em outros estudos (ANDRADA 2005; SCHLINDWEIN; GIANELLO, 2008; VIEIRA, 2014). Além disso, indicam que doses maiores que 120 kg/ha decrescem o RG de milho, elevando a disponibilidade de P do solo para a Classe Muito Alta. Nessa classe, não é esperado incremento em RG (SCHLINDWEIN; GIANELLO, 2004; SALVAGOTTI et al., 2013; GATIBONI et al., 2016), e, quando há excesso de P do solo, pode ainda ocorrer decréscimo de RG (SUCUNZA et al., 2018).

Constrastando com a cultura de milho, o RG da cultura de aveia-branca foi relativamente baixo, e em todos os tratamentos. Possivelmente, isso está relacionado com fatores que não foram controlados no experimento, e que limitaram o crescimento da cultura, como o excesso de precipitação pluvial. Contudo, o RG dessa cultura respondeu as doses de P e diferiu pouco entre as estratégias de correção de P. Os resultados indicaram que a correção de P para o cultivo da aveia-branca também pode ser realizada na semeadura do milho (Estratégia 1). Além de possibilitar a correção de P para a cultura de milho, essa estratégia tem a vantagem de corrigir o teor de P em camada mais profunda do solo, que a correção na própria cultura da aveia-branca (Estratégia 2). Dessa forma, pode-se melhorar a distribuição de P no perfil do solo e potencializar o RG das culturas de verão, com maiores valores comerciais, em situação de estiagem, situação em que demandam maior teor de P em profundidade (PARK et al., 2016). Entretanto, a correção de P do solo com o uso da Estratégia 1, ainda deve ser confirmada ao cultivo de aveia-

branca de alta produtividades, pois os RG dessa cultura foram relativamente baixos no trabalho.

O RG da soja foi relativamente alto, nos tratamentos com maiores teores de P do solo, evidenciando boa resposta dessa cultura ao efeito residual da adubação fosfatada. Isso refletiu o manejo adotado desde a implantação do ensaio, as condições climáticas adequadas e o potencial genético das cultivares. O RG da soja pouco diferiu entre as estratégias de adubação. Embora esse fator teve interação com o tipo de cultivar e as doses de P aplicadas nas culturas precedentes, os efeitos no RG não foram expressivos. Esperava-se que o RG da soja fosse menor sob o efeito residual da correção de P na semeadura do milho (Estratégia 1), comparado a correção de P na cultura da aveia-branca (Estratégia 2), devido a baixa produtividade dessa última cultura (cerca de 7 vezes menor) e os relativamente altos RG de milho. Com a menor exportação de P do solo nos grãos da aveia, isso poderia resultar em maior teor de P disponível para a soja, e, conseqüentemente, maior RG. Mas, nossos resultados indicaram o contrário (Discutido no item 6.3).

A pouca diferença entre os efeitos das estratégias de correção de P no RG da soja pode ser atribuído ao efeito semelhante dessas estratégias no teor de P do solo rizosférico. Possivelmente, a diluição das doses de P aplicadas na linha de semeadura da aveia-branca, devido ao menor espaçamento entre-linhas dessa cultura (17 cm), e a concentração desse nutriente, quando a correção foi realizada na cultura de milho (45 cm entre-linhas), compensaram as diferenças dos teores de P do solo entre essas duas estratégias. Assim, embora essa cultura exportou mais P, isso foi compensado pela maior concentração desse nutriente na linha de semeadura, e o oposto ocorreu na cultura da aveia-branca, que exportou menos e o fertilizante foi distribuído em menores quantidades ao longo da linha de semeadura.

Ressalta-se que a localização da linha de semeadura do milho, praticamente coincidiu com a da soja, e que o teor de P disponível para essa cultura foi obtido em amostras de solo rizosférico, coletadas na linha de plantio. O P em solos adubados concentra na linha de aplicação do fertilizante, devido a baixa mobilidade desse nutriente no solo (NUNES et al., 2016). Assim, em sistema de cultivo que a cultura da soja é semeada na mesma linha de semeadura do milho, ou próximo a ela, essa maior

concentração de P na linha potencializa a absorção desse nutriente e o RG da soja (VANEECKHAUT et al., 2016). Contudo, nossos resultados não indicaram diferenças expressivas entre as estratégias de adubação. Possivelmente, isso foi devido a baixa exportação de P da cultura de aveia-branca, o que compensou a diluição desse nutriente na linha de adubação dessa cultura (Estratégia 2).

Além da quantidade de P concentrada na linha de adubação, as estratégias de correção de P do solo também diferem quanto a profundidade de aplicação do fertilizante fosfatado. Na estratégia 1, o fertilizante foi depositado em cerca de 7 cm de profundidade, enquanto que na Estratégia 2 (correção na aveia), a profundidade de deposição do fertilizante foi cerca de 2 cm da superfície do solo. Assim, essa última estratégia de correção de P concentra esse nutriente em camada mais superficial. No entanto, isso não foi suficiente para influenciar o RG da soja, que foi semelhante entre as estratégias de correção. Além disso, o teor de P foliar da soja foi maior na estratégia 2, que na estratégia 1, indicando que esse nutriente não foi deficiente, embora tenha sido aplicado em menor profundidade e em menores quantidades ao longo da linha de semeadura da aveia.

Como consequência das respostas positivas de cada uma das culturas do sistema milho-aveia-branca-soja, o RG acumulado desse sistema também aumentou com as doses de P. Esse efeito foi mais acentuado nas menores doses e diminuiu a partir da dose de 150 kg de P₂O₅/ha, quando os teores de P do solo foram maiores que o NC desse nutriente, na média dos genótipos eficiente e não eficientes. Isso é esperado nesse nível de P, já que a probabilidade de resposta a adubação é baixa quando o teor desse nutriente é maior que o teor crítico (COSTA et al., 2009). Em geral, nossos resultados indicam que a correção de P pode ser realizada tanto na cultura de milho como na de aveia-branca, com efeito residual para a cultura da soja, que não

5.2 – Calibração de fósforo do solo

Antes do experimento, a disponibilidade de P do solo, na camada de 0-10 cm, era da Classe de P Médio (8,1 a 12,0 mg P/kg), de acordo com os critérios de interpretação de análise de solo da pesquisa regional (GATIBONI et al., 2016). O teor obtido nessa camada foi 10 mg P/kg, aproximando-se ao limite superior da Classe Baixo (4,1 a 8,0 mg P/kg), na média dos blocos experimentais. A disponibilidade média de P também foi

constatada no solo não adubado (Tratamento Controle), nas análises das amostras coletadas no início do crescimento das culturas e das amostras coletadas no florescimento pleno, estágio em que ocorre a máxima absorção desse nutriente pelas plantas cultivadas (POULTON et al., 2013). No entanto, a calibração da disponibilidade de P do solo indicou que essa variou com a cultura, corroborando os resultados de MESSINGA et al. (2015), e a eficiência dos genótipos; fatores que não tem sido considerado nas recomendações da pesquisa regional do Sul do Brasil (CQFS-RS/SC, 2004; GATIBONI et al., 2016), possivelmente, por falta de dados de pesquisa.

Na cultura de milho, a calibração de P do solo indicou que os teores das classes de interpretação desse nutriente foram semelhantes ao atualmente sugeridos pela pesquisa regional, para culturas de grãos, em plantio direto (GATIBONI et al., 2016). Por outro lado, na cultura da aveia-branca, os teores da classe Alto e, conseqüentemente, da Classe Muito Alto de P foram menores que os da pesquisa regional, enquanto o oposto ocorreu na cultura da soja.

Na cultura de aveia-branca, a calibração de P indicou que a concentração mais baixa desse nutriente (9 mg/kg) foi suficiente para RR pouco maior que o do NC, e essa concentração correspondeu ao limite inferior da Classe de P Alto (9 - 18 mg/kg). Esses valores diferem dos teores sugeridos pela pesquisa regional (Alto, 12,1 a 24 mg/kg; GATIBONI et al., 2016) ou em outros trabalhos (SCHLINDWEIN; ANGHINONI, 2000; CIOTTA et al., 2002; ANDRADA, 2005; COSTA et al., 2009). Isso pode ser atribuído aos relativamente baixos RG dessa cultura, observado em todas as doses testadas. Além disso, pode ser atribuído as diferenças de procedimentos de amostragem de solo, já que, no trabalho, amostrou-se o solo rizosférico e isso pode superestimar o teor de P, quando a adubação fosfatada é localizada na linha de semeadura. Os baixos RG da cultura da aveia-branca indicam que a calibração de P dessa cultura deve ser interpretada com cautela, e confirmados em trabalhos futuros.

As classes de disponibilidades de P calibradas com o RG da soja foram maiores que os propostos pelos critérios sugeridos pela pesquisa para solos de plantio direto (CQFS/RS-SC, 2004; GATIBONI et al., 2016), ou relatados em outros trabalhos com essa cultura (ANDRADA, 2005; SCHLINDWEIN et al., 2011; VIEIRA 2014). Isso pode ser atribuído a adubação fosfatada testada no trabalho, que consistiu em aplicar o P nas

culturas precedentes a cultura da soja. Assim, a calibração do teor de P do trabalho foi relacionada ao efeito residual da adubação e isso não foi utilizado nestas referências. Embora as indicações da pesquisa regional foram estabelecidas considerando a média de culturas de grãos, esperava-se que os resultados da Estratégia 2 fosse semelhante aos sugeridos pela pesquisa regional, já que essa prevê a adubação de correção total, no primeiro de dois cultivos de grão consecutivos (GATIBONI et al., 2016). Os maiores teores de P das classes de interpretação da cultura da soja podem ser atribuídos a adubação residual testada nessa cultura. Sem adubação fosfatada na cultura da soja, as classes de interpretação de P do solo aumentam, já que o teor desse nutriente diminui em cerca de 60 a 70% (VIEIRA 2014; VANEECKHAUT et al., 2016), ao longo dos cultivos, com isso exigindo maiores doses de P nas culturas precedentes, para que o efeito residual resulte em altos RG da soja.

Os teores de P do solo amostrado na cultura da soja pouco diferiram entre as estratégias de correção, corroborando com o efeito desse fator no RG dessa cultura e, conseqüentemente, na receita líquida. Além do discutido no item 6.1, isso pode ser atribuído ao tempo entre a adubação fosfatada e a semeadura da soja, principalmente, em relação a Estratégia 1 (Correção na cultura de milho). Nessa estratégia, o P aplicado reagiu mais tempo com o solo e isso pode diminuir a disponibilidade desse nutriente, pois maior é a fixação do P nos constituintes do solo, como os óxidos de Fe e de Al (MACHADO et al., 2011). Com a Estratégia 2, o tempo de reação do P com o solo foi menor, já que a soja foi semeada após a colheita da aveia-branca, mas isso não resultou em maior disponibilidade de P. Isso pode ser atribuído a influência de outros fatores que variam junto com a estratégia de correção, como as diferenças de quantidades exportadas de P pelas culturas, a localização do fertilizante (Profundidade e concentração na linha de adubação), etc. Independente da estratégia adotada, os resultados obtidos indicam que o efeito residual da adubação fosfata é importante para a cultura da soja, e que as estratégias testadas podem ser adotadas por produtores que visam otimizar a operação de semeadura na cultura dessa cultura, em áreas com sistemas de cultivo e ambiente semelhantes aos do trabalho.

Assim como verificado na cultura da soja, as classes de disponibilidades de P calibradas com o RG acumulado no sistema milho-aveia-branca-soja foram maiores que as sugeridas pela pesquisa regional (CQFS/RS-SC, 2004; GATIBONI et al., 2016), ou

Jonas Manica

relatados em outros trabalhos com essa cultura (ANDRADA, 2005; SCHLINDWEIN et al., 2011; VIEIRA 2014), como era esperado já que a adubação fosfatada foi aplicada em somente 2 dos 3 cultivos desse sistema. No entanto, a calibração do teor de P do sistema milho-aveia-branca-soja variou mais com a estratégia de correção, o que não ocorreu com a cultura da soja. Na calibração do sistema de culturas, os teores das classes de interpretação da Estratégia 1 foram maiores que o da pesquisa regional (Gatiboni et al., 2016) e maiores que os obtidos na cultura da soja. Por outro lado, as classes de interpretação da Estratégia 2 indicou teores semelhantes aos sugeridos pela pesquisa, como verificado com a cultura de milho.

A calibração de P do sistema milho-aveia-branca-soja evidenciou as diferenças entre os genótipos eficientes ou não eficientes, e a interação desse fator com a estratégia de correção de P. Na Estratégia 1, os teores das classes de interpretação foram maiores nos genótipos eficientes, principalmente, na Classe Alto de P, que correspondeu ao dobro do valor (40 a 80 contra 20 a 40 mg P/kg, eficiente e não eficiente, respectivamente). Por outro lado, na Estratégia 2 os teores das classes de interpretação diferiram pouco entre os genótipos e foram semelhantes aos sugeridos pela pesquisa regional. Assim, os resultados do sistema de culturas indicaram que a eficiência nutricional a P dos genótipos devem ser considerados em conjunto com a estratégia de correção. Contudo, ressalta-se que nossos resultados foram obtidos em somente um tipo de solo e com dois genótipos de cada cultura, enquanto que os da pesquisa regional são baseados em médias de vários solos, safras, cultivares e culturas de grãos, além de serem baseados em genótipos mais antigos. Assim, são necessários mais trabalhos de pesquisa, com maior variabilidade de ambiente e genótipo, para comparar melhor o obtido no trabalho com as recomendações da pesquisa.

No RS e SC, sugere-se 40 kg de P_2O_5 /ha, para a correção do P do solo, quando o nível desse nutriente é Médio. A essa dose deve ainda ser acrescentada a dose de manutenção (15 kg P_2O_5 /t de grão), para que, após o cultivo, o nível de P seja Alto (maior que o NC) (GATIBONI et al. 2016). Por outro lado, os resultados obtidos na Estratégia 1 indicam que o NC de P foi obtido com a aplicação de aproximadamente 120 ou 150 kg P_2O_5 /ha, nos genótipos eficientes e não eficientes, respectivamente, no sistema milho-aveia-branca-soja. Na Estratégia 2, o nível alto de P foi obtido com doses 30 kg maiores que essas (150 ou 180 kg P_2O_5 /ha, nos genótipos eficientes e não eficientes,

respectivamente). Considerando os RG obtidos nessas doses e a dose de correção e de manutenção sugeridas pela pesquisa regional, constata-se que as doses sugeridas superestimam as obtidas no trabalho.

Os resultados também mostram que, se a disponibilidade de P do solo, antes do experimento, fosse baseada em amostra de solo da camada de 0-20 cm, o teor obtido seria de 4,3 mg P/kg (Média das camadas de 0-10 e 10-20 cm). Embora a camada de 0-20 cm tem sido utilizada por consultores e empresas de amostragem de solo, esse teor seria interpretado como sendo próximo do limite inferior da Classe de P Baixo (4,1 a 8,0 mg P/kg), ou seja, próximo também da Classe de P Muito Baixo (< 4,0 mg P/kg), o que não condiz com os RG obtidos nas culturas de milho e de aveia-branca. Nessas culturas, os RR foram maiores ou iguais ao da Classe de P Médio. Além disso, os RG de milho do solo sem adubação fosfatada (Tratamento Controle) também evidenciam que a camada de 0-20 cm não é adequada para diagnóstico do P do solo. Os altos RG de milho estão relacionados com a disponibilidade adequada de água do solo, durante o ciclo dessa cultura (Figura 1), além da irrigação complementar. Nesse contexto, o sistema radicial do milho concentra mais nessa camada (COSTA et al., 2009; ROSSET et al., 2016) e a difusão de P até a raiz aumenta (ANGHINONI, 2007). Isso favoreceu a absorção desse nutriente pelas plantas, como indicaram os teores de P da folha diagnose e dos grãos, em geral, adequados, nas três culturas analisadas, também corroborando com a disponibilidade média de P indicada com a análise de solo da camada de 0-10 cm.

A disponibilidade média de P da camada de 0-10 cm foi um dos fatores que levaram a menor influência das estratégias de correção de P no RG acumulado no sistema milho-aveia-soja. Em solos com nível Médio de P o crescimento e o desenvolvimento da planta é favorecido, podendo expressar de 75 a 90 % do RR máximo (GATIBONI et al., 2016). Isso ocorre, principalmente, quando a disponibilidade de água do solo não limita o crescimento, além de possibilitar a difusão e o aproveitamento de P (FISCHER et al., 2018). Nas culturas de milho e de aveia-branca, essa faixa de RR foi obtida no Tratamento Controle. Isso também ocorreu com as duas menores doses na cultura da soja ou no sistema milho-aveia-branca-soja, dos genótipos eficiente, e com os genótipos não eficientes o RR foi cerca de 10 a 20% menor nessas doses ou no Controle. Essas diferenças entre os genótipos sugerem que a disponibilidade de P do solo da camada de

0-10 cm possa estar mais relacionada com genótipos de maior potencial produtivo, ou com maior eficiência ao P.

5.3 – Eficiência nutricional

A eficiência dos genótipos de milho, aveia-branca e soja influenciaram mais o RG, ou RG acumulado no sistema de cultivo composto por essas culturas, que a estratégia de correção de P. E, na cultura da aveia-branca, a influência da eficiência dos genótipos foi maior que o efeito das doses de P.

Na cultura de milho, o RG do híbrido eficiente foi relativamente elevado, mesmo no menor teor de P do solo, produzindo cerca de 35% mais grãos, que o híbrido de menor eficiência nutricional ao P. Os teores de P foliares foram maiores nesse híbrido, sendo considerados adequados de acordo com a faixa de suficiência sugerida pela pesquisa regional (2,0 a 4,0 g/kg) (CQFS-RS/SC, 2004). Por outro lado, os teores foliares do híbrido não eficiente foram próximos ao limite inferior dessa faixa (1,8 g/kg). Vale ressaltar que essa faixa de suficiência de P é antiga e foi baseada em diferentes materiais genéticos de milho, além de diferentes tipos e classes de solo. Na época em que foi definida esta faixa, foram utilizados materiais de milho de ciclo médio e precoce, e os hiperprecoces não foram incluídos, uma vez que não estavam disponíveis para cultivo (SCHLINDWEIN et al., 2011). Híbridos mais precoces tem marcha de absorção de nutrientes mais rápida e muitas vezes menor acúmulo nos tecidos, comparados aos de ciclo mais longo (BORBA, 2018). Considerando esse aspecto o teor de P das plantas do híbrido não eficiente pode ser considerado adequado. Além disso, não se observou sintomas visuais de deficiência de P no experimento. Coerente com isso, os teores de P do grão, na média das doses e estratégia de correção, foram maiores no híbrido eficiente (2.6 mg/kg), comparado ao não eficiente (2.3 mg/kg), embora a diferença entre os híbridos (11%) não tenha sido elevada.

Os maiores RG da cultivar eficiente de aveia-branca (URS Taura), em relação a não eficiente (UPFPS Farroupilha), principalmente no Tratamento Controle, pode ser atribuído a maior eficiência nutricional ao P da Taura. Isso foi evidenciado pelos maiores valores dos índices de eficiência interna (EUI) e de eficiência agrônômica parcial (EAP) dessa cultivar. Além disso, isso corrobora com a classificação dessas cultivares como

eficiente e não eficientes ao uso de P, respectivamente (MANICA ; ESCOSTEGUY, 2019). A resposta positiva dessas cultivares as doses de P aplicadas em ambas as estratégias de correção também corroboram com o relatado por esse autor, que considerou essas cultivares responsivas a adubação fosfatada. A maior eficiência nutricional da Taura também foi corroborada com o maior teor foliar de P (Cerca de 12%) e menor teor de P no grão, em relação a cultivar não eficiente. O maior teor de P foliar dessa cultivar indica maior absorção desse nutriente, durante o crescimento vegetativo, potencializando os processos metabólicos, e com menor dependência e acúmulo desse nutriente no grão, o que significa maior eficiência de uso do P em produzir grão, como constatado por Manica (2017). A eficiência nutricional das cultivares de aveia-branca influenciou não somente o RG, estimado em cerca de 400 kg/ha maior, na dose de MET, a favor da cultivar eficiente, mas nessa dose, que foi cerca de 20 kg P₂O₅/ha nessa cultivar.

Além de refletir o manejo adotado desde a implantação do ensaio, o RG da cultura de soja refletiu o potencial genético e a eficiência nutricional ao P das cultivares. Essa foi maior com a cultivar eficiente ao P (BMX Ativa), em relação a cultivar de menor eficiência (DM 53i54). Isso pode ser atribuído a maior eficiência da BMX Ativa em adquirir, translocar e utilizar o P absorvido, convertendo-o em grão, como indicam, em geral, os maiores valores dos índices de eficiência nutricional avaliados (EF, EA, EAP).

Contrastando com o constatado nas folhas de milho e aveia, o teor de P foliar e do grão não diferiu entre as cultivares de soja. Por outro lado, verificou-se que a Estratégia 1 de correção do P do solo proporcionou maior acúmulo desse nutriente na folha diagnose. Contudo, os teores obtidos foram menores que o mínimo estabelecido para a faixa de suficiência da cultura. Essa faixa é baseada em cultivares antigas de soja (CQFS-RS/SC, 2004), com ciclo vegetativo maior, que as atuais cultivares, como as avaliadas no trabalho. Sabe-se que isso reflete diretamente na capacidade de acumular P nos tecidos e, conseqüentemente, o valor da faixa de suficiência deve ser atualizado. Por outro lado, outros autores demonstram que o teor foliar de P que obtivemos no trabalho é adequado, considerando as atuais cultivares e estratégias de semeaduras da cultura da soja (SALVADOR et al., 2011). Embora o teor de P foliar diferiu pouco entre as cultivares de soja, a característica genética em transformar o P dos tecidos vegetais em RG variou entre as cultivares, sendo maior na cultivar eficiente (BMX Ativa).

O RG acumulado no sistema milho-aveia-branca-soja também evidenciou a diferença entre os genótipos eficientes e não eficientes, em usar o P do solo. No Tratamento Controle, a produção de grão dos genótipos eficientes foi de 15.000 kg/ha, e a dos não eficientes essa produção somente foi alcançada com a aplicação de 210 kg de P_2O_5 /ha, acumulado nas adubações dos cultivos de milho e da aveia. As diferenças de RG acumulado entre os genótipos eficientes e não eficientes também foram observadas nos tratamentos com aplicação de P, e também foram mais evidentes que as diferenças entre as estratégias de adubação fosfatada, como constatado nas culturas de aveia-branca e soja. Isso nos remete a importância de conhecer o material genético a ser cultivado, pois a eficiência nutricional pode ser um fator determinante na resposta a adubação, como constatamos neste trabalho. Assim, nossos resultados mostram que para potencializar o RG deve-se escolher materiais genéticos eficientes e adicionar P ao solo até atingir o nível crítico das culturas. Isso melhora o aproveitamento do P adicionado, com elevada produção de grãos.

Em geral, os resultados indicaram que a escolha de materiais genéticos com maior eficiência nutricional, aliada ao aumento de P do solo até o NC, foram as estratégias que mais maximizaram o RG e a receita líquida.

6 CONCLUSÕES

A adubação fosfatada pode ser suprimida na cultura da soja, uma vez que pode ser realizada na cultura atecessora (milho ou aveia-branca), que precedem o cultivo da soja.

Em geral, o efeito da correção de fósforo na linha de semeadura de milho (Estratégia 1) ou de aveia-branca (Estratégia 2) do sistema de cultura milho-aveia-branca-soja não mostra-se determinante para o rendimento de grãos. Por outro lado, a dose de fósforo e a eficiência nutricional dos genótipos são fatores fundamentais no rendimento de grãos.

A interpretação dos teores de fósforo do solo para a adubação do sistema de cultura milho-aveia-branca-soja requer classes de calibração próprias, e os teores dessas classes são maiores que os sugeridos para a adubação fosfatada de culturas de grãos, pela pesquisa do Sul do Brasil. Além disso, a calibração do teor de fósforo do sistema milho-aveia-branca-soja deve considerar a estratégia de correção desse nutriente e a eficiência nutricional dos genótipos.

Entre os fatores estudados, a eficiência nutricional dos genótipos ao fósforo é o fator que mais influencia a resposta de rendimento de grão das culturas de aveia-branca soja e os sistema de cultura milho-aveia-branca-soja a adubação fosfatada. Com a correção de fósforo na linha de semeadura do milho (Estratégia 1), os genótipos eficientes respondem mais a doses de fósforo, além de produzirem mais grão, que os não eficientes. Por outro lado, com a correção desse nutriente na linha da cultura da aveia-branca (Estratégia 2), os genótipos eficientes produzem maior rendimento de grão máximo, mas com menores doses de fósforo.

Conclui-se que com o uso de genótipos mais eficientes pode-se produzir maior quantidade de grãos com a menor dose de fósforo aplicado ao solo. A escolha do material genético é fundamental para definir a quantidade de P no solo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo verificou a importância do fator genético no rendimento de grãos quanto a eficiência nutricional de P. Além disso, o rendimento de grãos das culturas de milho, aveia-branca e soja, foi superior quanto as doses de P testadas no trabalho, refletindo em maior RG, nem sempre com a maior dose de P utilizada, mas sim, influenciada por material genético. Dessa forma, é importante ampliar os estudos da eficiência nutricional ao P, incluindo maior diversidade de material genético, para a escolha da dose de P que possibilita o maior RG, proporcionando maior retorno econômico da adubação fosfatada.

Para complementar os resultados obtidos neste trabalho, pode ser avaliado estratégias de correção de P, em anos com limitação hídrica. Com isso, há possibilidade de se detectar maiores diferenças entre as estratégias de correção. Além disso, é importante avaliar esse fator e as doses testadas, em solos com teor de P mais limitante, que o do trabalho, o que possibilitaria construir curvas de respostas mais apropriadas para a definição das doses de MET e MEE do sistema de cultura avaliado.

Em relação ao efeito residual da adubação fosfatada para a cultura da soja, futuros trabalhos poderão avaliar melhor esse efeito se parcelas subdivididas forem utilizadas, aplicando o P em uma subparcela e não aplicando em outra, no segundo e no terceiro cultivo do sistema de culturas.

Em relação a eficiência nutricional entre genótipos de faz necessários novos estudos que explicam essa classificação de cada material genético, demonstrando qual foi a estratégia desencadeada por cada material genético para caracterização quanto a eficiência nutricional.

REFERÊNCIAS

AGGANGAN, N. S.; CORTES, A. D. Screening mined-out indigenous mycorrhizal fungi for the rehabilitation of mine tailing areas in the Philippines. **Reforesta Scientific Society** **71**, v. 6, p. 71-85, 2018.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. *In*: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). Fertilidade do Solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 873-928, 2007.

ANTHONY, P. M.; MALZER, G. L.; SPARROW, S. D.; ZHANG, M. Corn and Soybean Grain Phosphorus Content Relationship with Soil Phosphorus, Phosphorus Fertilizer, and Crop Yield. **Communications in soil Science and Plant Analysis**, v. 39, p. 1016-1071, 2013.

BAKHSHANDEHA, S.; CORNEOA, P. E.; PIERRE MARIOTTEA, B. C.; KERTESZA, M. A.; DIJKSTRA, F. A. Effect of crop rotation on mycorrhizal colonization and wheat yield under different fertilizer treatments. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 247, p. 130-136, 2017.

BARAZETTI, A. R.; SIMIONATO, A. S.; NAVARRO, M. O.; SANTOS, I. M.; MODOLON, F.; ANDREATA, M. F.; LIUTIA, G.; CELYB, M. V.; LAZAROS, A.; DEALISA, C. M.; ANDRADEA, G. Formulations of arbuscular mycorrhizal fungi inoculum applied to soybean and corn plants under controlled and field conditions. **Applied Soil Ecology**, v. 142, p. 25–33, 2019.

BATES, T. R.; LYNCH, J. P. Stimulation of root hair elongation in *Arabidopsis thaliana* by low phosphorus availability. **Plant Cell and Environ**, v. 19, p. 529–538, 1996.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 105-112, 1997.

BERTOLAZI, A. A.; DA DILVA, D. D.; DAIONE, D.; DASSAMANI, L. Z.; COLODETE, C. M.; DE SOUZA, S. B.; RAMOS, A. C.; RASOOL, N.; SEBEN JÚNIOR, F.; SCHONINGER, E. L. Linking Plant Nutritional Status to Plant-AMF Interactions. **Microorganisms for Sustainability**, 5th ed. p. 384, 2018.

BONA, F. D.; ESCOSTEGUY, P. A.; SOUSA, R. O.; SILVA, L. S.; GATIBONI, L. C. *In*. Comissão De Química E Fertilidade Do Solo- Rs/ Sc. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11. ed. Frederico Westphalen: SBCS-NRS, p. 101-134, 2016.

BORCH, K. B. et al. Ethylene: are gulatorof root architectural responses to soil phosphorus availability. **Plant Cell and Environment**, v. 22, p. 425–431, 1999.

BOULET, F. M.; LAMBERS, H. Characterization of arbuscular mycorrhizal fungi colonization in cluster roots of *Hakea verrucosa* F. Muell (Proteaceae), and its effect on growth and nutrient acquisition in ultramafic soil. **Plant and Soil**, v. 269, p. 357–367, 2005.

BRESSAN, W.; VASCONCELLOS, C. A.; Alterações morfológicas no sistema radicular do milho induzidas por fungos micorrízicos e fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 509-517, 2002.

CHIN, J.; GAMUYAO, R.; BUSTAMAM, M.; WISSUWA, M.; HEUER, S. Developing Rice with high yield under phosphorus deficiency: Pup1 sequence to application. **Plant Physiology**, v. 156, p. 1202-1216, 2011.

CIOTTA, M. N. et al. Acidificação de um latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 1055-1064, 2002.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT, 224 p, 1995.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO. **Recomendações de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 2. ed. Passo Fundo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 128 p, 1989.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO- RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. SBCS-NRS, Porto Alegre, p. 394, 2004.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Brasil, série histórica de área plantada, produtividade e produção. v. 9, p. 1976-2019. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252>. Acesso em: 7 jun. 2020.

COSTA, S. E. et al. Phosphorus and root distribution and corn growth as related to long-term tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1237-1247, 2009.

COVACEVICH, F.; ECHEVERRÍA, H. E.; AGUIRREZABAL, L. A. Soil available phosphorus status determines indigenous mycorrhizal colonization of field and glasshouse-grown spring wheat from Argentina. **Applied Soil Ecology**, v. 35, p. 1-9, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.06.001>. Acesso em: 09 dez. 2022.

COVACEVICH, F.; ECHEVERRÍA, H. E.; AGUIRREZABAL, L. A. Soil available phosphorus status determines indigenous mycorrhizal colonization of field and glasshouse-grown spring wheat from Argentina. **Applied Soil Ecology**, v. 35, p. 1–9, 2007.

COZZOLINO, V. MEO, V. D.; PICCOLO, A. Impact of arbuscular mycorrhizal fungi applications on maize production and soil phosphorus availability. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 129, p. 40-44, 2013.

CUBILLA, M. M. et al. Calibração visando à fertilização com fósforo para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1463-1474, 2007.

DOBERMANN, A. Nutrient use efficiency- measurement and management. **General principles of FBMPs**. v. 1, p. 1-28, 2007.

ELTZ, F. L.; PEIXOTO, R. T.; JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, p. 259-267, 1989.

ESCOSTEGUY, P. A.; ANGUIONI I.; SILVA, L. S.; GATIBONI, L. C.; ACOSTA, J. A. *In*. Comissão De Química E Fertilidade Do Solo- RS/ SC. Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 11. ed. **Frederico Westphalen: SBCS-NRS**, p. 101-134, 2016.

FAGERIA N. K.; et al. Dry bean genotypes evaluation for growth, yield components and phosphorus use efficiency. **Journal of Plant Nutrition**, v. 33, p. 2167–2181, 2010.

FAGERIA N. K.; MOREIRA A.; SANTOS A. B. Phosphorus uptake and use efficiency in field crops. **Journal of Plant Nutrition**, v. 36, n. 13, p. 2013-2022, 2013.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 2, p. 6-16, 1998.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR V. C. Phosphorus-use efficiency by corn genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 20, p 1267–1277, 1997.

FAIRCHILD, M. H.; MILLER. G. L. Vesicular-arbuscular mycorrhizas and the soil-disturbance-induced reduction of nutrient absorption in maize. **New Phytology**, v. 114, p. 641–650, 1990.

FENG G.; SONG Y. C.; LI X. L.; CHRISTIE P. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to utilization of organic sources of phosphorus by red clover in a calcareous soil. **Soil Ecology**, v. 22, n. 2, p. 139–148, 2003.

GAHOONIA, T. S.; NIELSEN, N. E. Barley genotypes with long root hairs sustain high grain yields in low-P field. **Plant and Soil**, v. 262, p. 55–62, 2004.

GATIBONI, L. C.; SILVA, L. S.; ANGHINONI, I. *In*. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO- RS/ SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11. ed. Frederico Westphalen: SBCS-NRS, p. 135-154, 2016.

GONDIM, A. R.; et al. Eficiência nutricional do milho cv. BRS 1030 submetido á omissão de macronutrients em solução nutritive. **Ceres**, v. 57, p. 539-544, 2014.

HARRISON, M.J. Molecular and cellular aspects of arbuscular mycorrhizal symbiosis. **Revista Plant Physiology**, v. 50, p. 361 – 89, 1999.

HERREJÓN, M. A.; LARSEN J.; GAVITO, M. E.; JARAMILLO-LÓPEZ, P. F.; VESTBERG, M.; TRUJILLO, M. A.; CARREÓN-ABUD. Y. Relation between arbuscular mycorrhizal fungi, root-lesion nematodes and soil characteristics in maize agroecosystem. **Applied Soil Ecology**. v. 135, p. 1-8, 2019.

HU, J.; LIN, X.; WANG, J.; CUI, X., DAI, J.; CHU, H.; ZHANG, J. Arbuscular mycorrhizal fungus enhances P acquisition of wheat (*Triticum aestivum* L.) in a sandy loam soil with long-term inorganic fertilization regime. **Applied Microbiol Biotechnol**, v. 88, p. 781–787, 2016.

HU, J.; LIN, X.; WANG, J.; CUI, X.; DAI, J.; CHU, H.; ZHANG, J. Arbuscular mycorrhizal fungus enhances P acquisition of wheat (*Triticum aestivum* L.) in a sandy loam soil with long-term inorganic fertilization regime. **Applied Microbiol Biotechnol**, v. 88, p. 781–787, 2010.

ILYAS, F.; ARIF, M.; IFTIKHAR, A.; SATTAR, A.; CUONG, D. M.; ILYAS, M.; PARVEEN, A. Indigenous vesicular mycorrhizal fungi effect on maize under different textures. **Earth Sciences Pakistan**, v. 2, p. 12-15, 2018.

IMAZ, P. A.; BARBIERI, P. A.; ECHEVERRÍA, H. E.; ROZAS, H. R.; COVACEVICH F. Indigenous mycorrhizal fungi from Argentina increase Zn nutrition of maize modulated by Zn fertilization. **Soil Science Society of Pakistan**, v. 33, p. 23–32, 2014.

JEFFERY, R. P.; SIMPSON, R. J.; LAMBERS, H.; KIDD, D. R.; RYAN, M. H. Root morphology acclimation to phosphorus supply by six cultivars of *Trifolium subterraneum* L. **Plant Soil**, v. 1007, p. 11104-2869, 2016.

JONER, E. J. The effect of long-term fertilization with organic or inorganic fertilizers on mycorrhiza-mediated phosphorus uptake in subterranean clover. **Biology Fertility Soils**, n. 3, p. 435–440, 2000.

JONER, E.J. The effect of long-term fertilization with organic or inorganic fertilizers on mycorrhiza-mediated phosphorus uptake in subterranean clover. **Biology Fertility Soils**. v. 3, p. 435–440, 2000.

KLEIN, V. A. Física do Solo. 2. ed. Passo Fundo: **editora UPF**, p. 240, 2012.

KUINCHTNER, A.; BURIAL, G. A. Clima do estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação de Köppen e Thornthwaite. *Disciplinarum Scientia*. **Ciência Exatas**, n. 2, p.

171-182, 2001.

KUINCHTNER, A.; BURIAL, G.A. Clima do estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação de Köppen e Thornthwaite. *Disciplinarum Scientia. Ciências Exatas*, v. 2, p. 171-182, 2001.

LAMBERS H; RAVEN J.A; SHAVER G.R; SMITH S.E. Plant nutrient- manganese accumulation and phosphorus-acquisition strategies change with soil age. *Trends Ecol Evol efficiency. Trends Plant Science*, v. 20, p. 83-90, 2016.

LAMBERS, H.; ALBORNOZ, F.; KOTULA, L.; LALIBERTÉ, E.; RANATHUNGE, K.; TESTE, F. P.; ZEMUNIK, G. How belowground interactions contribute to the coexistence of mycorrhizal and nonmycorrhizal species in severely phosphorus-impooverished hyper diverse ecosystems. *Plant Soil*, v. 424, p. 11–34, 2018.

LAMBERS, H.; MARTINOIA, E.; RENTON, M. Plant adaptations to severely phosphorus-impooverished soils. *Current Opinion in Plant Biology*, v. 25, p. 23-31, 2015.

LENOIR, I.; FONTAINE, J.; SAHRAOUI, A. L. Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses. 2016. *Phytochem*, v. 123, p. 4-15, 2016.

LIU, R.; WANG, F. Selection of appropriate host plants used in trap culture of arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, v. 13, p. 123-127, 2003.

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

MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. *Agronômica Ceres*. São Paulo, p. 638, 2006.

MANICA, J.; ESCOSTEGUY, P. A. Phosphorus requirement and partitioning in oat cultivars. *Ciência Rural*, v. 49, p. 2-6, 2019.

MESSIGA, A. J.; ZIADI, N.; JOUANY, C.; VIRKAJÄRVI, P.; SUOMELA, R.; SINAJ, S.; BÉLANGER, G.; STROIA, C.; MOREL, C. Soil test phosphorus and cumulative phosphorus budgets in fertilized grassland. *AMBIO*, v. 44, p. 252–262, 2015.

MENGUE, J.A.; STEIRLE, D.; BAGYARAJ, D. J.; JOHNSON, E. L.V.; LEONARD, R.T. Phosphorus concentration in plant responsible for inhibition of mycorrhizal infection. *New Phytology*, v. 80, p. 575–578, 1978.

MIELNICZUK, J.; LUDWICK, A.; BOHNEN, H. Recomendações de adubo e calcário para as principais culturas do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: **Faculdade de Agronomia e Veterinária da UFRGS**, p. 36, 1969 (Boletim Técnico, 2).

MOODY, P. W.; EDWARDS, D. G.; BELL, L. C. Effect of banded fertilizers on soil solution composition and short-term root growth. *Australian Journal Soil Research*, p. 689–707, 1995.

MOTTA, P. E.; SIQUEIRA, J. O.; RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H.; POGGERE, G. C.; CURI, N. Crescimento e absorção de P por *Urochloa decumbens* afetado por longos períodos de adubação fosfatada, inoculação micorrízica e histórico de uso em Latossolos contrastantes do Cerrado brasileiro. **Ciência Agrotecnica**, v. 41, p. 209-219, 2017.

MOTTA, P. E.; SIQUEIRA, J. O.; RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H.; POGGERE, G. C.; CURI, N. Adubação fosfatada, inoculação micorrízica e histórico de uso do solo no crescimento da soja e absorção de P. **Ciência Agrotecnica**, v. 40, p. 418-431, 2016.

MOTTA, P. E.; SIQUEIRA, J. O.; RIBEIRO, B. T.; SILVA, S. H.; POGGERE, G. C.; CURI, N. Crescimento e absorção de P por *Urochloa decumbens* afetado por longos períodos de adubação fosfatada, inoculação micorrízica e histórico de uso em Latossolos contrastantes do Cerrado brasileiro. **Ciência Agrotecnica**, v. 41, p. 209-219, 2017.

NARANG, R. A.; BRUENE, A.; ALTMANN, T.; Analysis of phosphate acquisition efficiency in different Arabidopsis accessions. **Plant Physiology**, v. 124, p. 1786–1799, 2000.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; SALET, R.; HENNIGEN, F. J. Rendimento de grãos e nutrição da soja sob diferentes doses de calcário e fósforo no sistema plantio direto em Latossolo Vermelho distrófico. **Reunião brasileira de fertilidade do solo e nutrição de plantas**, Fertbio. Rio de Janeiro, p. 26, 2002.

NOVAIS, C. B.; BORGES, W. L.; JESUS, E. C.; JÚNIOR, O. J.; SIQUEIRA, J. O. Inter- and intraspecific functional variability of tropical arbuscular mycorrhizal fungi isolates colonizing corn plants. **Applied Soil Ecology**, v.76, p. 78–86, 2014.

NUNES, R. M.; ALVARO, A. H.; SILVA, G.; DENARDIN, J. E.; NEYDE, B.; GIAROLA, F. B.; VAZ, C. M.; VAN, H. M.; SILVA, A. R. Soil chemical management drives structural degradation of Oxisols under a NT cropping system. **Soil Research**, v. 10, p. 1-4, 2017.

OLIVEIRA, R. S.; VOSÁTKA, M.; DODD, J. C.; CASTRO, P. M. Studies on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and the efficacy of two native isolates in a highly alkaline anthropogenic sediment. **Mycorrhiza**, v. 16, p. 23–31, 2005.

PARK, N. D.; MICHAEL R. P.; THRING, R. W.; HELLE, S. S. Wood pellet fly ash and bottom ash as an effective liming agent and nutrient source for rye grass (*Lolium perenne* L.) and oats (*Avena sativa* L.). **Chemosphere**, v. 86, p. 427–432, 2016.

PHILLIPS, J. M.; HAYMAN, D. S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular fungi for rapid assessment of infection. **Transactions of the British Mycological Society**, v. 55, p. 158-161, 1970.

POULTON, P. R.; JOHNSTON, A. E.; WHITE, R. P. Plant-available soil phosphorus. Part I: the response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam. **Soil Use Manage**, v. 29, p. 4–11, 2013.

RAKSHIT, A., KUMARI, S., PAL, S., SINGH, A., SINGH, H.B. Bio-priming mediated nutrient use efficiency of crop species. Nutrient Use Efficiency. **Basics Advance**, p. 181-191, 2015.

RAMAEKERS, L.; REMANS, R.; RAO, I. M.; BLAIR, M. W.; VANDERLEYDEN, J. Strategies for improving phosphorus acquisition efficiency of crop plants. **Field Crops Research**, v. 11, p. 169-176, 2010.

RAVEN, J. A.; LAMBERS, H.; SMITH, S. E.; WESTOBY, M. Costs of acquiring phosphorus by vascular land plants: patterns and implications for plant coexistence. **New Phytology**, v. 217, p. 1420–1427, 2018.

- REIS, E. F.; CARNEIRO, M. A.; JÚNIOR, O. J.; ROTTA, D. A.; SOUSA, M. Y. Absorção de fósforo em doze genótipos de milho inoculados com fungo micorrízico arbuscular em solo de cerrado. **Ciência Rural**, v. 38, p. 2441-2447, 2008.
- RODRIGUES, M.; PAVINATO, P. S.; WITHERS, P. J.; TELES, A. P.; HERRERA, W. F. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science Total Environ**, v. 542, p. 1050–1061, 2016.
- ROSSET, J. S.; GUARESCHI, R. F.; SILVA, L. A.; PINTO, R.; PEREIRA, M. G.; SEMINA, M. do C. L. Phosphorus fractions and correlation with soil attributes in a chronosequence of agricultural under no-ti. **Ciências Agrárias**, v. 37, p. 3915-3926, 2016.
- ROY, E. D.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; COLETTA, L. D.; LINS, S. R.; VAZQUEZ, F. F.; WILLIG, E.; SPERA, S. A.; VANWEY, L. K.; PORDER. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, n. 2, p. 2–7, 2016
- SATTARI, S. Z.; BOUWMAN, A. F.; MARTINEZ RODRIGUEZ, R.; BEUSEN, A. H. W.; VAN ITTERSUM, M. K. Negative global phosphorus budgets challenge sustainable intensification of grasslands. **Nature Commun**, n. 7, p. 10696, 2016.
- SCHLINDWEIN, J. A.; BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de extração de potássio em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1669-1678, 2011.
- SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Necessidades de novos estudos de calibração e recomendação de fertilizantes para as culturas cultivadas sob plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v. 79, p. 12-15, 2004.
- SCHROEDER, M. S.; JANOS, D. P. Plant growth, phosphorus nutrition, and root morphological responses to arbuscular mycorrhizas, phosphorus fertilization, and intraspecific density. **Mycorrhiza**, v. 15, p. 203–216, 2005.
- SHENOY, V. V.; KALAGUDI, G. M. Enhancing plant phosphorus use efficiency for sustainable cropping. **Biotechnology Advance**, v. 23, p. 501-513, 2006.
- SINCLAIR, G.; CHAREST, C.; DALPÉ, Y.; KHANIZADEH, S. Influence of colonization by arbuscular mycorrhizal fungi on three strawberry cultivars under salty conditions. **Agricultural and Food Sci**, v. 23, p. 146-158, 2014.
- SIQUEIRA, O. J. de; SCHERER, E. E.; TASSINARI, G. et al. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Passo Fundo: **EMBRAPA/CNPT**, p. 100. 1987.

- SMITH, S. E.; SMITH, F. A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: New paradigms from cellular to ecosystem scales. **Revista Plant Biology**, v. 62, p. 227–250, 2011.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Fertilidade do solo, 1. ed. Viçosa: **editora SBCS**, p. 1016, 2007.
- SOIL SURVEY STAFF. Keys to soil taxonomy. DC: United States Department of Agriculture, **Natural Resources Conservation Service**, 12. ed. 2014. Washington.
- STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. Solos do Rio Grande do Sul. 2. ed. ver. e ampl. Porto Alegre: **Emater/RS**, p. 222, 2008.
- STUTTER, M.; GRAEBER, D.; EVANS, C. D.; WADE, A. J.; WITHERS, P. J. Equilibrium of macronutrient stoichiometry to alleviate eutrophication. **Science Total Environment**, v. 634, p. 439 – 447, 2018.
- TABATABAI, M. A.; BREMNER J. M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil and Biochemistry**, v. 1, p. 301-307, 1969.
- TABELAS de adubação corretiva e adubação de manutenção para solos e culturas dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Trigo e Soja, Porto Alegre, v. 10, p. 15-23, 1976.
- TABELAS de adubação corretiva e adubação de manutenção para solos e culturas dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Trigo e Soja, Porto Alegre, v. 10, p. 10-21, 1973.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal, 6ed., **Artmed**, Porto Alegre. Tedesco, M.J. et al. 1995 Análise de solo, plantas e outros materiais. Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 174 e 888, 2017.
- TEDESCO, M. J.; GIANELLO, T.; BISSANI, H, C; BOHNEN A. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 174, 1995.
- TIAN, H.; DRIJBER, R. A.; ZHANG, J. L.; LI, X. L. Impact of long-term nitrogen fertilization and rotation with soybean on the diversity and phosphorus metabolism of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi within the roots of maize (*Zea mays L.*). **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 164, p. 53-6, 2013.
- TRINDADE, R. S.; ARAÚJO, A. P. Variability of root traits in common bean genotypes at different levels of phosphorus supply and ontogenetic stages. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1170-1180, 2014.
- TROUVELOT, A.; KOUCH, J.; GIANINAZZI-PEARSON, V. Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire: recherche of method d'estimation ayant

une signification fonctionnelle. In: SEMINAIRE DIJON, 1. 1986, Paris. Anais... **Les Mycorrhizes: Physiologie and Genetique**. Paris: ed. Inra, p. 217-221, 1986.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; MARTIN, F. M.; SELOSSE, M. A.; SANDERS, I. R. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. **New Phytologist**, v. 205, p. 1406–1423, 2015.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; MARTIN, F. M.; SELOSSE, M. A.; SANDERS, I. R. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. **New Phytologist**. v. 205, p. 1406–1423, 2015.

VÖTTERLA, J.C.; ZEBELIA, Q.; HENNIG-PAUKAB, I.; METZLER-ZEBELIA, B. U. Soaking in lactic acid lowers the phytate-phosphorus content and increases the resistant starch in wheat and corn grains. **Anim. Feed Sci. and Technol**, v. 252, p. 115–125, 2019.

WANG, X.; SHEN, J.; LIAO, H. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops?. **Plant Science**, v. 179, p. 302-306, 2010.

WANG, Y.; KROGSTAD, T.; LIU, C. J.; HALLAMA, M.; ØGAARD, A.; EICH-GREATOREX, S.; KANDELER, E.; CLARKE, N. Rhizosphere organic anions play a minor role in improving crop species ability to take up residual phosphorus (P) in agricultural soils low in P availability. **Front Plant Science**, n. 7, p. 160-166, 2016.

WANG, Y.; KROGSTAD, T.; LIU, C. J.; HALLAMA, M.; ØGAARD, A.; EICH-GREATOREX, S.; KANDELER, E.; CLARKE, N. Rhizosphere organic anions play a minor role in improving crop species ability to take up residual phosphorus (P) in agricultural soils low in P availability. **Front Plant Science**, v.7, p. 160-166, 2005.

WANG, Y.; LAMBERS, H. Root-released organic anions in response to low phosphorus availability: recent progress, challenges and future perspectives. **Plant Soil**, n. 2, p. 101-116, 2019.

WANG. W.; LIANG, T.; WANG, L. The effects of fertilizer applications on runoff loss of phosphorus. **Environmental Earth Science**, v. 68, p. 1-5, 2012.

WENDLING, A. et al. Recomendação de adubação potássica para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1929-1939, 2008.

WITHERS, P. J.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R.; BENITES, V. M.; GATIBONI, L. C.; SOUSA, D. M.; NUNES, R. S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA, A. J.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, p. 25-37, 2018.

ZHUA, H. H.; YAOB, Q.; SUNA, X. T.; HUB, Y. L. Colonization, ALP activity and plant growth promotion of native and exotic arbuscular mycorrhizal fungi at low ph. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 39, p. 942–950, 2007.

APÊNDICE

Apêndice I

Receita líquida do milho

O custo do superfosfato triplo, mesmo na maior dose aplicada, representou menos de 20% do custo dos outros insumos, e da aplicação desses, na cultura do milho adubada com ambas as estratégias testadas (Tabelas 1; 2). Embora o custo da correção de P, comparando a menor e a maior dose aplicada, aumentou de 83,0 para 525,0 R\$/ha (Tabela 1), e o aumento da dose resultou em maior custo por tonelada de grão colhido, o retorno econômico da adubação de correção deve ainda considerar o RG proporcionado por esse tipo de custo, pois isso influencia a receita advinda da comercialização do grão. Os resultados mostraram que a dose de correção que proporcionou maior RG (120 kg de P₂O₅/ha) foi a que proporcionou maior receita bruta (7.060,00 R\$/ha) e líquida (3.930,00 R\$/ha; Estratégia 1), proporcionando o maior retorno econômico, entre as doses testadas no milho.

Os resultados da adubação de manutenção do milho (Estratégia 2) mostram que a média do RG foi de 9.440 kg/ha, e que esse variou entre as parcelas casualizadas para testar doses de correção de P aplicadas cultura da aveia, em sucessão o cultivo de milho (Tabela 2). No entanto, o RG médio e a receita líquida média (3.700,00 R\$/ha) foram semelhantes ao obtido com a aplicação da dose de 60 kg de P₂O₅/ha, na área em que a Estratégia 1 foi testada (R\$ 3.770,00) (Tabela 1).

Tabela 1 – Receita líquida estimada com o rendimento de grão (RG) de milho e os custos de insumos e doses de correção de fósforo (P₂O₅) aplicadas nessa cultura (Estratégia 1). Média dos híbridos P30F53VYHR e P1680VYHR. Passo Fundo, 2018.

Dose de correção	Custo		RG	Custo do P ₂ O ₅ ³	Receita	
	P ₂ O ₅ ¹	Insumos ²			Bruta ⁴	Líquida ⁵
P ₂ O ₅ (kg/ha)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t de grão)	(1000 R\$/ha)	
0	0,000	2,80	8347	00,0	5,84	3,04
30	0,083	2,80	9370	08,8	6,56	3,68
60	0,166	2,80	9622	17,2	6,74	3,77
90	0,249	2,80	9663	25,7	6,76	3,72
120	0,331	2,80	10088	32,9	7,06	3,93

150	0,414	2,80	9611	43,1	6,73	3,51
190	0,525	2,80	9440	55,6	6,61	3,28

¹ P₂O₅ (R\$/ha) = Custo do kg do P₂O₅ do superfosfato triplo (2,76 R\$/kg) * kg P₂O₅/ha.

² Custo de semente, herbicidas, fungicidas, inseticidas e fertilizantes, exceto o superfosfato triplo.

³ P₂O₅ (R\$/t de grão) = Custo do P₂O₅ (R\$/ha) / RG (t/ha).

⁴ Valor do grão (0,70 R\$/kg) x RG (kg/ha) /1000.

⁵ Receita líquida: Receita bruta – (Custo de insumos + custo do P₂O₅).

Tabela 2 – Receita líquida estimada com os resultados do rendimento de grão (RG) de milho e os custos de insumos e dose de manutenção de fósforo (P₂O₅) aplicada nessa cultura (Estratégia 2). Média dos híbridos P30F53VYHR e P1680VYHR. Passo Fundo, 2018.

Dose de manutenção	Custo		RG	Custo do P ₂ O ₅ ³	Receita	
	P ₂ O ₅ ¹	Insumos ²			Bruta ⁴	Líquida ⁵
P ₂ O ₅ (kg/ha)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t de grão)	(1000 R\$/ha)	
0	0,000	2,80	7775	00,0	5,44	2,64
60	0,166	2,80	8632	19,2	6,04	3,08
60	0,166	2,80	9185	18,0	6,43	3,46
60	0,166	2,80	9709	17,1	6,80	3,83
60	0,166	2,80	10258	16,2	7,18	4,21
60	0,166	2,80	9975	16,6	6,98	4,02
60	0,166	2,80	9615	17,2	6,73	3,76
Média	0,166	2,80	9562	17,00	6,60	3,70

¹ P₂O₅ (R\$/ha) = Custo do kg do P₂O₅ do superfosfato triplo (2,76 R\$/kg) * kg P₂O₅/ha.

² Custo de semente, herbicidas, fungicidas, inseticidas e fertilizantes, exceto o superfosfato triplo.

³ P₂O₅ (R\$/t de grão) = Custo do P₂O₅ (R\$/ha) / RG (t/ha).

⁴ Valor do grão (0,70 R\$/kg) x RG (kg/ha) /1000.

⁵ Receita líquida: Receita bruta – (Custo de insumos + custo do P₂O₅).

Embora não houve efeito significativo dos híbridos de milho no RG, optou-se por comparar a receita líquida obtida com cada um dos híbridos (Tabela 3). Os resultados obtidos mostram que a receita líquida da cultura de milho variou com a eficiência nutricional ao P dos híbridos, além da do efeito das doses. A receita líquida do híbrido eficiente (P30F53) foi maior que a do híbrido não eficiente (P1680), em todas as doses, o que resultou da diferença de RG entre esses híbridos.

Tabela 3 – Receita líquida estimada com o rendimento de grão (RG) de híbridos de milho, com eficiência contrastante ao P, e os custos de insumos e doses de correção de fósforo (P₂O₅) aplicadas nessa cultura (Estratégia 1). Passo Fundo, 2018.

¹ P₂O₅ (R\$/ha) = Custo do kg do P₂O₅ do superfosfato triplo (2,76 R\$/kg) * kg P₂O₅/ha.

² Custo de semente, herbicidas, fungicidas, inseticidas e fertilizantes, exceto o superfosfato triplo.

Jonas Manica

Dose	Custo		P30F53VYHR (Eficiente)				P1680VYHR (Não eficiente)			
			RG	Custo do P ₂ O ₅ ³	Receita		RG	Custo do P ₂ O ₅	Receita	
	P ₂ O ₅ ¹	Insumos ²			Bruta ₄	Líquida ₅			Bruta	Líquida
P ₂ O ₅ (kg/ha)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t grão)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t grão)	(1000 R\$/ha)	
0	0,000	2,80	9739	0,0	6,82	4,02	6955	0,0	4,87	2,07
30	0,083	2,80	10651	7,8	7,46	4,57	8090	10,2	5,66	2,78
60	0,166	2,80	11395	14,5	7,98	5,01	7849	21,1	5,49	2,53
90	0,249	2,80	10871	22,9	7,61	4,56	8454	29,4	5,92	2,87
120	0,331	2,80	11853	28,0	8,30	5,17	8324	39,8	5,83	2,70
150	0,414	2,80	10877	38,1	7,61	4,40	8344	49,6	5,84	2,63
190	0,525	2,80	10403	50,4	7,28	3,96	8478	61,9	5,93	2,61

³ P₂O₅ (R\$/t de grão) = Custo do P₂O₅ (R\$/ha) / RG (t/ha).

⁴ Valor do grão (0,70 R\$/kg) x RG (kg/ha) /1000.

⁵ Receita líquida: Receita bruta – (Custo de insumos + custo do P₂O₅).

Receita líquida da aveia-branca

O custo da adubação de manutenção de P representou cerca de 50% do custo dos outros insumos, e da aplicação desses, na cultura de aveia-branca (Tabela 4), e foi cerca de 6 vezes menor que o da cultura de milho (Tabelas 1; 2; 3). Embora o custo do superfosfato triplo utilizado na cultura da aveia-branca (3,14 R\$/kg) foi maior que o do milho (2,76 R\$/kg) e o valor do grão dessa cultura (0,70 R\$/kg) foi maior que o da aveia (0,50 R\$/kg), o maior impacto da adubação fosfatada nessa última cultura está relacionado com o menor valor gasto com os outros insumos (380 R\$/ha), em comparação aos utilizados no milho (2.800 R\$/ha) (Tabela 1).

O efeito residual da correção de P na cultura de milho (Estratégia 1) na receita líquida da cultura da aveia-branca variou com a cultivar (Tabela 4). Com a URSTaura (Eficiente), essa receita foi maior que a do Tratamento Controle somente a partir da dose de 90 kg P₂O₅/ha, aplicada no cultivo de milho que precedeu ao da aveia-branca (Estratégia 1); enquanto na UPFPSFarroupilha (Não eficiente), isso ocorreu a partir da dose de 150 kg P₂O₅/ha, também aplicada na cultura de milho.

Conforme observado na cultura de milho, a maior receita líquida obtida com a adubação de manutenção e a comercialização do grão da aveia-branca resultaram do aumento de RG proporcionados pelas maiores doses de P aplicadas no milho (> 90 e > 150 kg de P₂O₅/ha, na Taura e Farroupilha, respectivamente). Com essas doses, as receitas brutas e líquida foram maiores, proporcionando maior retorno econômico, e que aumentou até a maior dose aplicada (Tabela 4).

Embora o RG da aveia-branca aumentou com a correção de P realizada nessa cultura (Estratégia 2), a receita líquida foi maior que a obtida no Tratamento Controle somente nas menores doses de P aplicada (30 a 90 e 30 a 60 kg de P₂O₅/ha, na Taura e Farroupilha, respectivamente) (Tabela 5). Com essas doses de correção de P a receita líquida foi maior que a do Tratamento Controle somente quando o custo da adubação fosfatada foi menor que cerca de 280 (Taura) e 190 R\$/ha (Farroupilha). Com a Estratégia 2 de correção de P, a maior receita líquida foi obtida com a aplicação de 90 (URS Taura) ou 30 kg de P₂O₅/ha (UPFPPS Farroupilha). Salienta-se, que ao efeito dessas doses aplicadas na cultura da aveia-branca, possivelmente, o RG também foi influenciado pelo efeito residual da dose de manutenção, aplicada na cultura de milho (60 kg de P₂O₅/ha).

Comparando as duas estratégias em cada cultivar, constata-se que a Estratégia 2 proporcionou maior receita líquida da cultivar URS Taura (R\$ 480), que foi 37% maior que a obtida com a Estratégia 1 (R\$ 350). Por outro lado, a maior receita líquida da cultivar UPFPPS Farroupilha pouco diferiu entre as estratégias (R\$ 320 e 340, Estratégia 1 e 2, respectivamente) (Tabelas 4; 5).

Tabela 4 – Receita líquida estimada com os resultados do rendimento de grão (RG) de cultivares de aveia-branca, com eficiência contrastante nutricional ao P, e os custos de insumos e dose de manutenção de fósforo (P₂O₅) aplicada nessa cultura (Estratégia 1). Passo Fundo, 2018.

Dose	Custo		URS Taura (Eficiente)				UPFPPS Farroupilha (Não eficiente)			
			RG	Custo do P ₂ O ₅ ³	Receita		RG	Custo do P ₂ O ₅	Receita	
	P ₂ O ₅ ¹	Insumos ²			Bruta ⁴	Líquida ⁵			Bruta	Líquida
P ₂ O ₅ (kg/ha)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t grão)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t grão)	(1000 R\$/ha)	
0	0,000	0,38	1188	0,0	0,59	0,21	1191	0,0	0,60	0,22
60	0,189	0,38	1340	140,7	0,67	0,10	1207	156,3	0,60	0,03

60	0,189	0,38	1510	124,9	0,75	0,19	1268	148,7	0,63	0,07
60	0,189	0,38	1578	119,5	0,79	0,22	1339	140,9	0,67	0,10
60	0,189	0,38	1724	109,4	0,86	0,29	1436	131,3	0,72	0,15
60	0,189	0,38	1793	105,2	0,90	0,33	1609	117,2	0,80	0,24
60	0,189	0,38	1828	103,2	0,91	0,35	1782	105,8	0,89	0,32

¹ P₂O₅ (R\$/ha) = Custo do kg do P₂O₅ do superfosfato triplo (3,14 R\$/kg) * kg P₂O₅/ha.

² Custo de semente, herbicidas, fungicidas, inseticidas e fertilizantes, exceto o superfosfato triplo.

³ P₂O₅ (R\$/t de grão) = Custo do P₂O₅ (R\$/ha) / RG (t/ha).

⁴ Valor do grão (0,50 R\$/kg) x RG (kg/ha) /1000.

⁵ Receita líquida: Receita bruta – (Custo de insumos + custo).

Tabela 5 – Receita líquida estimada com os resultados do rendimento de grão (RG) de cultivares de aveia-branca, com eficiência contrastante nutricional ao P, e os custos de insumos e dose de correção de fósforo (P₂O₅) aplicada na cultura do milho (Estratégia 2). Passo Fundo, 2018.

Dose	Custo		URS Taura (Eficiente)				UPFPS Farroupilha (Não eficiente)			
			RG	Custo do P ₂ O ₅ ³	Receita		RG	Custo do P ₂ O ₅	Receita	
	P ₂ O ₅ ¹	Insumos ²			Bruta ⁴	Líquida ⁵			Bruta	Líquida
P ₂ O ₅ (kg/ha)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t grão)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t grão)	(1000 R\$/ha)	
0	0,000	0,38	1545	0,0	0,77	0,39	1312	0,00	0,66	0,28
30	0,940	0,38	1854	50,9	0,93	0,45	1638	57,56	0,82	0,34
60	0,189	0,38	1994	94,6	1,00	0,43	1726	109,29	0,86	0,29
90	0,283	0,38	2289	123,6	1,14	0,48	1701	166,29	0,85	0,19
120	0,377	0,38	2122	177,8	1,06	0,30	1660	227,26	0,83	0,07
150	0,471	0,38	1997	236,1	1,00	0,15	1723	273,61	0,86	0,01
190	0,597	0,38	1859	321,2	0,93	-0,05	1672	357,12	0,84	-0,14

¹ P₂O₅ (R\$/ha) = Custo do kg do P₂O₅ do superfosfato triplo (3,14 R\$/kg) * kg P₂O₅/ha.

² Custo de semente, herbicidas, fungicidas, inseticidas e fertilizantes, exceto o superfosfato triplo.

³ P₂O₅ (R\$/t de grão) = Custo do P₂O₅ (R\$/ha) / RG (t/ha).

⁴ Valor do grão (0,50 R\$/kg) x RG (kg/ha) /1000.

⁵ Receita líquida: Receita bruta – (Custo de insumos + custo do P₂O₅).

Receita líquida da soja

O custo de insumos utilizados na cultura da soja foi de 2.400 R\$/ha (Tabelas 5; 6), e foi pouco menor que o da cultura de milho (Tabelas 1; 2; 3), mas cerca de seis vezes maior que o da cultura da aveia (Tabelas 4; 5).

Na cultura da soja não houve aplicação de P, para que fosse possível testar o efeito residual da adubação nas culturas de milho e de aveia-branca, que precederam o cultivo da soja, e verificar qual a melhor estratégia de correção desse nutriente, no sistema de culturas milho-aveia-branca-soja. Sem custo da adubação de P e ainda com o maior valor do grão dessa cultura (1,28 R\$/kg), comparado as culturas de aveia (0,50 R\$/kg) e milho (0,70 R\$/kg), a receita líquida foi maior na cultura da soja, em comparação as demais culturas (Tabelas 6; 7).

Em ambas as estratégias de correção de P, a maior receita líquida obtida com a cultivar BMX Ativa foi proporcionada pelo efeito residual da dose de 210 kg de P_2O_5 . Essa dose inclui a quantidade de P aplicada com a adubação de correção (150 kg de P_2O_5) mais a aplicada com a adubação de manutenção (60 kg de P_2O_5), nos cultivos de milho e aveia-branca,. Com o efeito residual dessa dose, o RG dessa cultivar foi cerca de 6.000 (Estratégia 1) e 5.838 kg/ha (Estratégia 2), proporcionando rendimento líquido de cerca de 5.300 e 5.000 R\$/ha, respectivamente (Tabelas 6; 7).

O maior RG da cultivar não eficiente em P (DM 53i54) foi cerca de 4.800 e 5.000 kg/ha, com as Estratégias 1 e 2, respectivamente (Tabelas 6; 7). Esses rendimentos foram obtidos com o efeito residual das doses de 150 e 210 kg de P_2O_5 (Estratégias 1 e 2, respectivamente), proporcionando receitas líquidas de cerca de 3.700 e 4.000 R\$/ha, respectivamente.

As menores receitas líquidas foram as dos Tratamentos Controle, de ambas as estratégias e cultivares (Tabelas 6; 7). Nesse tratamento, as receitas líquidas proporcionadas pelas cultivar eficiente (BMX Ativa) foram semelhantes as da aveia-branca (Tabelas 4; 5) e menores que as do milho (Tabelas 1; 2; 3). Já a receita líquida proporcionada pela cultivar não eficiente (DM 53i54) foi negativa, em ambas as estratégias.

Tabela 6 – Receita líquida estimada com os resultados do rendimento de grão (RG) de cultivares de soja, com eficiência contrastante nutricional ao P, e os custos de insumos em área com adubação fosfatada de correção na cultura do milho e de manutenção na cultura da aveia-branca (Estratégia 1). Passo Fundo, 2019.

Dose	Custo		BMX Ativa (Eficiente)				DM 53i54 (Não eficiente)			
			RG	Custo do P ₂ O ₅ ³	Receita		RG	Custo do P ₂ O ₅	Receita	
	P ₂ O ₅ ¹	Insumos ²			Bruta ⁴	Líquida ⁵			Bruta	Líquida
P ₂ O ₅ (kg/ha)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t grão)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t grão)	(1000 R\$/ha)	
0,0	0,000	2,4	2051	0,0	2,63	0,23	1357	0,0	1,74	-0,67
0,0	0,000	2,4	3091	0,0	3,96	1,56	3913	0,0	5,01	2,61
0,0	0,000	2,4	3906	0,0	5,00	2,60	4508	0,0	5,77	3,37
0,0	0,000	2,4	3591	0,0	4,60	2,20	4820	0,0	6,17	3,77
0,0	0,000	2,4	4764	0,0	6,10	3,70	3934	0,0	5,04	2,64
0,0	0,000	2,4	6010	0,0	7,69	5,29	4001	0,0	5,12	2,72
0,0	0,000	2,4	5523	0,0	7,07	4,67	4743	0,0	6,07	3,67

¹Sem adubação fosfatada nessa cultura.

²Custo de semente, herbicidas, fungicidas, inseticidas e fertilizantes, exceto o superfostato triplo.

³P₂O₅ (R\$/t de grão) = Custo do P₂O₅ (R\$/ha) / RG (t/ha).

⁴Valor do grão (1,28 R\$/kg) x RG (kg/ha) /1000.

⁵Receita líquida: Receita bruta – (Custo de insumos + custo do P₂O₅).

Tabela 7 – Receita líquida estimada com os resultados do rendimento de grão (RG) de cultivares de soja, com eficiência contrastante nutricional ao P, os custos de insumos em área com adubação fosfatada de manutenção na cultura do milho e de correção na cultura da aveia-branca (Estratégia 2). Passo Fundo, 2019.

Dose	Custo		BMX Ativa (Eficiente)				DM 53i54 (Não eficiente)			
			RG	Custo do P ₂ O ₅ ³	Receita		RG	Custo do P ₂ O ₅	Receita	
	P ₂ O ₅ ¹	Insumos ²			Bruta ⁴	Líquida ⁵			Bruta	Líquida
P ₂ O ₅ (kg/ha)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t grão)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t grão)	(1000 R\$/ha)	
0,0	0,000	2,4	2079	0,0	2,66	0,26	1467	0,0	1,88	-0,52
0,0	0,000	2,4	3714	0,0	4,75	2,35	3770	0,0	4,82	2,42
0,0	0,000	2,4	3364	0,0	4,31	1,91	3775	0,0	4,83	2,43
0,0	0,000	2,4	3574	0,0	4,57	2,17	3475	0,0	4,45	2,05
0,0	0,000	2,4	4078	0,0	5,22	2,82	3934	0,0	5,04	2,64
0,0	0,000	2,4	5838	0,0	7,47	5,07	4981	0,0	6,38	3,98
0,0	0,000	2,4	4743	0,0	6,07	3,67	4991	0,0	6,39	3,99

Jonas Manica

¹ Sem adubação fosfatada nessa cultura.

² Custo de semente, herbicidas, fungicidas, inseticidas e fertilizantes, exceto o superfostato triplo.

³ P_2O_5 (R\$/t de grão) = Custo do P_2O_5 (R\$/ha) / RG (t/ha).

⁴ Valor do grão (1,28 R\$/kg) x RG (kg/ha) / 1000.

⁵ Receita líquida: Receita bruta – (Custo de insumos + custo do P_2O_5).

Receita líquida do sistema milho – aveia branca - soja

A receita líquida acumulada com as três culturas avaliadas foi mais influenciada pelo RG da cultura do milho, que representou cerca de 65% do total do RG acumulado. Embora as culturas adubadas (milho e aveia-branca) receberam a mesma quantidade de fertilizante, o custo da Estratégia 2 de correção de P foi cerca de 15% maior que o da Estratégia 1, devido ao maior valor do fertilizante aplicado na Estratégia 2. Assim, a receita líquida resultante da correção de P do solo com a Estratégia 1 foi beneficiada pelo menor custo da adubação fosfatada (Tabelas 8; 9).

A receita líquida do sistema de cultura milho-aveia-branca-soja variou com a estratégia de correção, a dose de P e a eficiência nutricional dos genótipos. Em ambas as estratégias, a maior receita líquida dos genótipos eficientes foi obtida com a dose acumulada de 210 kg de P_2O_5 /ha (R\$ 10.020 e 10.350, Estratégia 1 e 2, respectivamente; Tabelas 8; 9). Essas maiores receitas resultaram do efeito dessa dose de P no RG acumulado (18.680 e 19400 kg/ha) com essas estratégias e essa dose de P, respectivamente.

A maior receita líquida acumulada no sistema milho-aveia-branca-soja foi obtida com os genótipos eficientes (P30F53VYHR, URSTaura e BMXAtiva), e resultou do maior RG acumulado com esses genótipos (Tabelas 8; 9). Na Estratégia 1, a diferença de receita líquida entre os genótipos eficientes e não eficientes foi mais evidente nas doses maiores que 180 kg P_2O_5 /ha. Já a Estratégia 2, os genótipos eficientes proporcionaram maior receita líquida que os não eficientes, em todas as doses, embora a diferença tenha diminuído na maior dose de P.

A estratégia de correção de P influenciou pouco a receita líquida dos genótipos eficientes. Por outro lado, a receita líquida dos genótipos não eficientes foi maior com a Estratégia 1, até a dose de 150 kg P_2O_5 /ha. A partir dessa dose, a Estratégia 2 possibilitou maior retorno financeiro da adubação do sistema (Tabelas 8; 9).

Jonas Manica

Tabela 8 – Receita líquida estimada com os resultados do rendimento de grão acumulado no sistema milho-aveia-branca-soja (RG), de genótipos com eficiência nutricional ao P contrastante, custos de insumos e dose de fósforo (P₂O₅) aplicadas na cultura de milho (Adubação de correção) e na cultura de aveia-branca (Adubação de manutenção) (Estratégia 1). Passo Fundo, 2019.

Dose	Custo		Genótipos eficientes				Genótipos não eficientes			
			RG	Custo do P ₂ O ₅ ³	Receita		RG	Custo do P ₂ O ₅	Receita	
	P ₂ O ₅ ¹	Insumos ²			Bruta ⁴	Líquida ⁵			Bruta	Líquida
P ₂ O ₅ (kg/ha)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t grão)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t grão)	(1000 R\$/ha)	
0,0	0,00	5,6	12978	0,0	10,04	4,46	9502	0,0	7,20	1,62
90	0,271	5,6	15081	17,91	12,08	6,23	13209	20,33	11,27	5,42
120	0,354	5,6	16811	21,07	13,73	7,80	13625	25,93	11,90	5,96
150	0,437	5,6	16041	27,24	13,00	6,98	14612	29,91	12,76	6,74
180	0,520	5,6	18340	28,35	15,26	9,16	13695	38,09	11,58	5,48
210	0,603	5,6	18680	33,75	16,20	10,02	13954	43,21	11,77	5,58
250	0,713	5,6	17754	40,16	15,27	8,97	15003	47,43	12,90	6,60

¹ P₂O₅ (R\$/ha) = Soma do custo do kg do P₂O₅ do superfosfato triplo, aplicado nas culturas de milho e aveia-branca * kg P₂O₅/ha.

² Custo de semente, herbicidas, fungicidas, inseticidas e fertilizantes, exceto o superfosfato triplo.

³ P₂O₅ (R\$/t de grão) = Custo do P₂O₅ (R\$/ha) / RG acumulado (t/ha).

⁴ Valor do grão de cada cultura x RG (kg/ha) /1000.

⁵ Receita líquida: Receita bruta – (Custo de insumos + custo).

Tabela 9 – Receita líquida estimada com os resultados do rendimento de grão acumulado no sistema milho-aveia-branca-soja (RG), de genótipos com eficiência nutricional ao P contrastante, custos de insumos e dose de fósforo (P₂O₅) aplicadas na cultura da aveia-branca (Adubação de correção) e na cultura de milho (Adubação de manutenção) (Estratégia 2). Passo Fundo, 2019.

Dose	Custo		Genótipos eficientes				Genótipos não eficientes			
			RG	Custo do P ₂ O ₅ ³	Receita		RG	Custo do P ₂ O ₅	Receita	
	P ₂ O ₅ ¹	Insumos ²			Bruta ⁴	Líquida ⁵			Bruta	Líquida
P ₂ O ₅ (kg/ha)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t grão)	(1000 R\$/ha)		(kg/ha)	(R\$/t grão)	(1000 R\$/ha)	
0,0	0,00	5,6	12819	0,0	9,87	4,29	9.134	0,0	6,98	1,40
90	0,260	5,6	15806	16,41	12,85	7,01	12433	20,91	10,56	4,72
120	0,354	5,6	16452	21,54	13,07	7,13	12776	27,72	10,79	4,85
150	0,449	5,6	16591	27,01	13,23	7,20	13866	32,95	11,38	5,35
180	0,543	5,6	17904	30,38	14,47	8,35	14405	37,69	12,03	5,91
210	0,637	5,6	19400	32,84	16,57	10,35	15089	32,83	13,11	6,89
250	0,763	5,6	17115	44,63	14,36	8,02	15379	49,64	13,33	6,98

¹ P_2O_5 (R\$/ha) = Soma do custo do kg do P_2O_5 do superfosfato triplo, aplicado nas culturas de milho e aveia-branca * kg P_2O_5 /ha.

² Custo de semente, herbicidas, fungicidas, inseticidas e fertilizantes, exceto o superfosfato triplo.

³ P_2O_5 (R\$/t de grão) = Custo do P_2O_5 (R\$/ha) / RG acumulado (t/ha).

⁴ Valor do grão de cada cultura x RG (kg/ha) /1000.

⁵ Receita líquida: Receita bruta – (Custo de insumos + custo).

Apêndice 2

Croqui do ensaio cultivado a campo

Estratégia 1

Correção no verão → Milho

G ¹	Dose de P ₂ O ₅						
1	190	150	120	90	60	30	0
2	0	190	150	120	90	60	30
1	120	90	60	30	0	190	150
2	90	60	30	0	190	150	120
1	30	190	0	150	120	90	60
2	30	190	0	150	120	90	60
1	150	120	90	60	30	0	190
2	0	90	60	150	120	190	30

Correção no inverno → Aveia

G ¹	Dose de P ₂ O ₅						
3	60	60	60	60	60	60	0
4	0	60	60	60	60	60	60
3	60	60	60	60	0	60	60
4	60	0	60	60	60	60	60
3	60	60	60	60	60	60	0
4	60	60	0	60	60	60	60
3	60	60	60	0	60	60	60
4	60	60	60	60	60	0	60

Estratégia 2

Manutenção no verão → Milho

G ¹	Dose de P ₂ O ₅						
1	60	60	60	60	60	60	0
2	0	60	60	60	60	60	60
1	60	60	60	60	0	60	60
2	60	0	60	60	60	60	60
1	60	60	60	60	60	60	0
2	60	60	0	60	60	60	60
1	60	60	60	0	60	60	60
2	60	60	60	60	60	0	60

Manutenção no inverno → Aveia

G ¹	Dose de P ₂ O ₅						
3	190	150	120	90	60	30	0
4	0	190	150	120	90	60	30
3	120	90	60	30	0	190	150
4	90	60	30	0	190	150	120
3	30	190	0	150	120	90	60
4	30	190	0	150	120	90	60
3	150	120	90	60	30	0	190
4	0	90	60	150	120	190	30

Efeito da adubação residual (Milho → Soja)

G ¹	Dose de P ₂ O ₅						
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	00
6	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0

Efeito da adubação residual (Aveia → Soja)

G ¹	Dose de P ₂ O ₅						
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0

G¹ Genótipo. 1Pionner 30F53RR; 2Pionner 1830; 3URS Taura; 4UPFPS Farroupilha; 5BMX Ativa; 6DM 53i54. Bloco 1; Bloco 2; Bloco 3; Bloco 4.

Apêndice III - Resumo da análise da variância do rendimento de grão (RG), teor de fósforo (P) em solo (PS) e teor (g/kg) e quantidade (mg/planta) de P em folhas (PF), no florescimento, matéria seca de parte aérea na maturação fisiológica (g/planta), quantidade de P₂O₅ (kg/ha) e teor de P (g/kg) no grão, teor (g/kg) de P na parte aérea (P-PA) e a soma deste nutriente na parte aérea mais o grão (P-Total) de híbridos de milho adubados com doses de P, aplicadas na semeadura dessa cultura. Passo Fundo, RS, (2017-2018).

Causa de variação	GL	RG (kg/ha)	PS – V5 (mg/kg)	PS (mg/kg)	PF (g/kg)	PF (mg/planta)	CM (%)	MS-PA (g/planta)	P ₂ O ₅ -grão (kg/ha)	P-Grão (g/kg)	P-PA (g/kg)	P-Total (g/kg)
Bloco	3	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
Dose	6	***	**	***	ns	*	**	ns	ns	ns	ns	ns
Híbrido	1	*	ns	ns	**	ns	ns	ns	**	ns	*	*
D X H	6	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	*	ns	ns
C.V. (%)		11,8	10,1	12,1	11,9	15,7	29,2	12,5	8,2	10,4	8,8	14,1
Média		9420	16,2	16,4	2,6	9,3	30,1	97,2	52,1	2,5	1,7	6,4

ns, *, **: Teste F não significativo, significativo a 5 e 1% de probabilidade de erro, respectivamente. C.V.: coeficiente de variação. G.L.: Graus de liberdade.

Apêndice IV - Resumo da análise do número de pontas, área superficial específica (ASE), comprimento, volume, área, diâmetro, ramificação e número de intersecções do sistema radicial e classes de diâmetro de raízes (0-0,5; 0,5-1,0; 1-1,5) de híbridos de milho adubados com doses de P, aplicadas na semeadura dessa cultura. Passo Fundo, RS, (2017-2018).

Causa de variação	GL	Pontas (número)	ASE (g/cm ²)	Comprimento (cm)	Volume (cm ³)	Área (cm ²)	Diâmetro (mm)	Ramificação (número)	Intersecções (número)	Classes de diâmetro (mm)		
										0,5	0,5/1,0	1/1,5
Bloco	3	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cultivar	6	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose	1	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cultivar x Dose	6	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		24,2	25,4	22,1	24,3	17,1	12,1	8,4	42,1	18,1	17,6	16,8
Média		15963	647	25	20,2	809	0,82	241	1304	921	294	148

ns, *, **: Teste F não significativo, significativo a 5 e 1% de probabilidade de erro, respectivamente. C.V.: coeficiente de variação. G.L.: Graus de liberdade.

Apêndice V - Resumo da análise da eficiência de utilização interna (EUI), eficiência de recuperação aparente (ERA), eficiência fisiológica (EF), eficiência agrônômica (EA) e eficiência agronomia parcial (EAP), de híbridos de milho adubados com doses de P, aplicadas na semeadura dessa cultura. Passo Fundo, RS, (2017-2018).

Causa de variação	GL	EUI	ERA	EF	EA	EAP
Bloco	3	ns	ns	ns	*	*
Cultivar	1	ns	ns	ns	***	***
Dose	6	**	*	ns	***	***
Cultivar x Dose	6	ns	*	ns	***	***
C.V. (%)		9,5	7,1	6,2	8,2	9,1
Média		1,8	8,3	130,0	131,4	132,2

ns, *, **: Teste F não significativo, significativo a 5 e 1% de probabilidade de erro, respectivamente. C.V.: coeficiente de variação. G.L.: Graus de liberdade

Apêndice VI- Resumo da análise da variância do rendimento de grão (RG), teor de fósforo em solo (PS) e teor (g/kg) e quantidade (mg/planta) de fósforo (P) em folhas (PF), no florescimento, massa seca de parte aérea na maturação fisiológica (g/planta), quantidade de P₂O₅ (kg/ha) e teor de P (g/kg) no grão, teor (g/kg) de P na parte aérea (P-PA) e a soma deste nutriente na parte aérea mais o grão (P-Total) de cultivares de aveia adubadas com doses de P, aplicadas na semeadura dessa cultura. Passo Fundo, RS, (2018-2018).

Causa de variação	GL	RG (kg/ha)	PS – V5 (mg/kg)	PS (mg/kg)	FP (g/kg)	FP (mg/planta)	CM (%)	MS-PA (g/planta)	P ₂ O ₅ -grão (kg/ha)	P-Grão (kg/t)	P-PA (g/kg)	P-Total (g/kg)
Bloco	3	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cultivar	1	**	ns	ns	*	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
Dose	6	***	***	***	ns	ns	***	**	**	ns	*	*
Cultivar x Dose	6	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	*	ns	ns
C.V. (%)		4,5	10,4	14,7	12,3	14,2	16,7	18,2	18,84	10,1	1,03	32,0
Média		1852	26,2	24,1	1,8	7,2	54	5314	12,44	14,2	16,2	42

ns, *, **: Teste F não significativo, significativo a 5 e 1% de probabilidade de erro, respectivamente. C.V.: coeficiente de variação. G.L.: Graus de liberdade.

Apêndice VII- Resumo da análise do número de pontas, área superficial específica (ASE), comprimento, volume, área, diâmetro, ramificação e número de intersecções do sistema radicial e classes de diâmetro de raízes (0-0,5; 0,5-1,0; 1-1,5) de cultivares de aveia adubadas com doses de P, aplicadas na semeadura dessa cultura. Passo Fundo, RS, (2018-2018).

Causa de variação	GL	Pontas	ASE (g/cm ²)	Comprimento (cm)	Volume (cm ³)	Área (cm ²)	Diâmetro (mm)	Ramificação (número)	Intersecções (número)	Classes de diâmetro (mm)		
										0,5	0,5/1,0	1/1,5
Bloco	3	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cultivar	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Dose	6	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cultivar x Dose	6	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)		28,1	48,8	15,1	28,3	26,6	16,9	21,0	18,2	21,1	18,4	16,2
Média		648,1	19,1	18,1	0,70	26,0	1,0	214	41,1	1,2	1,4	4,2

ns, *, **: Teste F não significativo, significativo a 5 e 1% de probabilidade de erro, respectivamente. C.V.: coeficiente de variação. G.L.: Graus de liberdade.

Apêndice VIII - Resumo da análise da eficiência de utilização interna (EUI), eficiência de recuperação aparente (ERA), eficiência fisiológica (EF), eficiência agrônômica (EA) e eficiência agronomia parcial (EAP), de cultivares de aveia adubadas com doses de P, aplicadas na semeadura dessa cultura. Passo Fundo, RS, (2017-2018).

Causa de variação	GL	EUI	ERA	EF	EA	EAP
Bloco	3	ns	ns	ns	ns	ns
Cultivar	1	*	ns	ns	ns	*
Dose	6	*	***	ns	**	***
Cultivar x Dose	6	ns	ns	ns	ns	*
C.V. (%)		21,3	19,6	34,1	24,1	13,7
Média		0,21	17,3	127,1	4,7	0,02

ns, *, **: Teste F não significativo, significativo a 5 e 1% de probabilidade de erro, respectivamente. C.V.: coeficiente de variação. G.L.: Graus de liberdade.

Apêndice IX - Resumo da análise da variância do rendimento de grão (RG), teor de fósforo em solo (PS) e teor (g/kg) e quantidade (mg/planta) de fósforo (P) em folhas (PF), no florescimento, massa seca de parte aérea na maturação fisiológica (g/planta), quantidade de P₂O₅ (kg/ha) e teor de P (g/kg) no grão, teor (g/kg) de P na parte aérea (P-PA) e a soma deste nutriente na parte aérea mais o grão (P-Total) de cultivares de soja sob efeito residual de doses de P aplicadas na semeadura de milho ou de aveia-branca (Estratégia de correção). Passo Fundo, RS, (2018-2019).

Causa de variação	GL	RG (kg/ha)	PS – V5 (mg/kg)	PS (mg/kg)	FP (g/kg)	FP (mg/planta)	CM (%)	MS-PA (g/planta)	P ₂ O ₅ -grão (kg/ha)	P-Grão (kg/t)	P-PA (g/kg)	P-Total (g/kg)
Bloco	3	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cultivar	1	**	Ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Estratégia	1	ns	Ns	ns	*	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns
Cultivar x Estratégia	1	ns	*	**	ns	ns	ns	ns	*	ns	*	ns
Dose	6	***	***	***	ns	ns	ns	***	ns	ns	*	ns
Cultivar x Dose	6	***	*	*	ns	ns	***	*	***	ns	ns	**
Estratégia x Dose	6	ns	**	**	*	ns	ns	*	*	*	ns	*
Cultivar x Estratégia x Dose	6	***	**	*	ns	ns	ns	**	*	ns	ns	ns
C.V. (%)		11,9	17,2	15,1	8,2	10,1	23,6	12,4	8,2	10,1	10,4	11,7
Média		3892	18,4	17,2	1,8	6,85	24,8	3,2	34,8	4,0	2,9	7,5

ns, *, **: Teste F não significativo, significativo a 5 e 1% de probabilidade de erro, respectivamente. C.V.: coeficiente de variação. G.L.: Graus de liberdade.

Apêndice X - Resumo da análise do número de pontas, área superficial específica (ASE), comprimento, volume, área, diâmetro, ramificação e número de intersecções do sistema radicial e classes de diâmetro de raízes (0-0,5; 0,5-1,0; 1-1,5) de cultivares de soja sob efeito residual de doses de P aplicadas na semeadura de milho ou de aveia-branca (Estratégia de correção). Passo Fundo, RS, (2018-2019).

Causa de variação	GL	Pontas	ASE (g/cm ²)	Comprimento (cm)	Volume (cm ³)	Área (cm ²)	Diâmetro (mm)	Ramificação (número)	Intersecções (número)	Classes de diâmetro (mm)		
										0,5	0,5/1,0	1/1,5
Blocos	3	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cultivar	1	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Estratégia	1	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cultivar x Estratégia	1	**	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	**	***	ns
Dose	6	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cultivar x Dose	6	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	**
Estratégia x Dose	6	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**
Cultivar x Estratégia x Dose	6	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*
C.V. (%)		32,2	14,3	33,1	22,3	21,1	13,1	22,1	31,1	20,1	22,0	24,8
Média		1916	301	845,3	9,45	96,0	1,16	6918	663	279	87,1	36,6

ns, *, **: Teste F não significativo, significativo a 5 e 1% de probabilidade de erro, respectivamente. C.V.: coeficiente de variação. G.L.: Graus de liberdade.

Apêndice XI - Resumo da análise da eficiência de utilização interna (EUI), eficiência de recuperação aparente (ERA), eficiência fisiológica (EF), eficiência agrônômica (EA) e eficiência agronomia parcial (EAP), de cultivares de soja sob efeito residual de doses de P aplicadas na semeadura de milho ou de aveia-branca (Estratégia de correção). Passo Fundo, RS, (2018-2019).

Causa de variação	GL	EUI	ERA	EF	EA	EAP	RG Milho – Aveia -Soja
Blocos	3	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cultivar	1	ns	ns	ns	ns	ns	**
Estratégia	1	ns	ns	ns	*	ns	*
Cultivar x Estratégia	1	ns	ns	ns	ns	ns	**
Dose	6	ns	***	ns	***	***	**
Cultivar x Dose	6	ns	**	*	***	***	***
Estratégia x Dose	6	ns	ns	ns	ns	ns	*
Cultivar x Estratégia x Dose	6	ns	ns	ns	**	ns	**
C.V. (%)		9,71	13,1	26,3	18,3	10,2	12,8
Média		68,1	86,1	327,2	21,2	52,4	14930

ns, *, **: Teste F não significativo, significativo a 5 e 1% de probabilidade de erro, respectivamente. C.V.: coeficiente de variação. G.L.: Graus de liberdade.



PPGAgro
Programa de Pós-Graduação
em Agronomia