

MIRIAM SUZANE VIDOTTI

**SELEÇÃO RECORRENTE NA POPULAÇÃO CNA9 DE
ARROZ DE TERRAS ALTAS PARA TOLERÂNCIA E
RESPONSIVIDADE AO FÓSFORO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Genética e Melhoramento de Plantas.

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Patrícia Guimarães Santos Melo

Coorientadores:

Dr. José Manoel Colombari Filho

Dr^a. Tereza Cristina de Oliveira

Goiânia, GO - Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob orientação do Sibi/UFG.

Vidotti, Miriam Suzane

Seleção recorrente na população CNA9 de arroz de terras altas para
tolerância e responsividade ao fósforo [manuscrito] / Miriam Suzane
Vidotti. - 2015.

118 f.

Orientador: Profa. Dra. Patrícia Guimarães Santos Melo; co
orientadora Dra. Tereza Cristina de Oliveira Borba ; co-orientador
José Manoel Colombari Filho.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Agronomia (EA) , Programa de Pós-Graduação em Genética &
Melhoramentos de Plantas , Goiânia, 2015.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Oryza sativa L.. 2. genética quantitativa. 3. estresse abiótico. 4.
componentes de variância. 5. melhoramento populacional. I. Melo,
Patrícia Guimarães Santos , orient. II. Borba , Tereza Cristina de
Oliveira, co-orient. III. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: ☒ **Dissertação** ☐ **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor (a):	Miriam Suzane Vidotti		
E-mail:	miriamvidotti@hotmail.com		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página?	☒ Sim	☐ Não	
Vínculo empregatício do autor	mestranda		
Agência de fomento:	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico	Sigla: CNPq	
País:	Brasil	UF:	GO
CNPJ:	00.889.834/001-08		
Título:	Seleção recorrente na população CNA9 de arroz de terras altas para tolerância e responsividade ao fósforo		
Palavras-chave:	<i>Oryza sativa</i> L., genética quantitativa, estresse abiótico, componentes de variância, melhoramento populacional		
Título em outra língua:	Recurrent selection in CNA9 population of upland rice for tolerance and responsivity to phosphorus		
Palavras-chave em outra língua:	<i>Oryza sativa</i> L., quantitative genetics, abiotic stress, variance components, breeding population		
Área de concentração:	Melhoramento de espécies cultivadas		
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	12/02/2015		
Programa de Pós-Graduação:	Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas - PPGA		
Orientador (a):	Patrícia Guimarães Santos Melo		
CPF: 753.829.976-91	E-mail: pgsantos@gmail.com		
Co-orientador*	José Manoel Colombari Filho		
CPF: 218.402.678-60	E-mail: jose.colombari@embrapa.br		
Co-orientadora*	Tereza Cristina de Oliveira Borba		
CPF: 985.273.801-10	E-mail: tereza.borba@embrapa.br		

*Necessita do CPF quando não constar no SisPG

3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento ☒ **SIM** ☐ **NÃO¹**

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

Miriam Suzane Vidotti

Assinatura do (a) autor (a)

Data: 13 / 02 / 15

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

MIRIAM SUZANE VIDOTTI

TÍTULO: "Seleção recorrente na população CNA 9 de arroz de terras altas para tolerância e responsividade ao fósforo"

Dissertação DEFENDIDA em 12 de Fevereiro de 2015, e APROVADA pela Banca Examinadora constituída pelos membros:



Prof. Dr. Patricia Guimarães Santos Melo
Orientadora – EA/UFG



Prof. Dr. Roberto Fritsche Neto
ESALQ/USP



Dr. Paulo Hideo Nakano Rangel
Embrapa Arroz e Feijão



Dr. José Manoel Colombari Filho
Embrapa Arroz e Feijão

Goiânia - Goiás
Brasil

OFEREÇO

*Aos agricultores e trabalhadores rurais
que alimentam todos os dias a nação com
o fruto de seu trabalho, mas que, muitas
vezes, essa trata-lhes com descaso*

Aos meus pais **Celso Sebastião Vidotti e
Meire Albertina P. Vidotti**

*Pelo amor, valores, exemplos de determinação
e imensuráveis esforços para que eu alcançasse
esse objetivo*

Ao meu irmão **Miller Vinicius Vidotti**

*Pela cumplicidade, alegria, incentivo e
conhecimentos de nossa profissão
compartilhados*

Aos meus avós **Albertina da S. R. Pinto,
Laurindo Antônio Pinto** (*in memorian*),
Alzira ZanattaVidotti (*in memorian*) e
Guerino Vidotti (*in memorian*)

*Que constituindo os esteios de nossa família
souberam ensinar os bons princípios e semear
entre as gerações o gosto pela agricultura*

DEDICO

Feliz o homem que encontrou sabedoria, daquele que adquiriu inteligência, porque vale mais este lucro que a prata, e o fruto que se obtém é melhor do que o fino ouro. Meu filho, guarda a sabedoria e a reflexão, não as percas de vista. Então, caminharás com segurança sem que teu pé tropece.

Quanto mais sábio foi o mestre, mais ensinou conhecimento ao povo. Ele estudou, inventou e compôs muitos provérbios. Procurou também encontrar as palavras certas, e o que escreveu é reto e verdadeiro. As palavras dos sábios são como agulhões, e como pregos bem fixados são as palavras coligidas dos mestres, provenientes do único pastor. Demais disto, filho meu, atenta: Não há limites para produzir livros, e muito estudo se torna uma fadiga para o corpo. De tudo que se tem ouvido, a conclusão é: tema a Deus e obedeça aos seus mandamentos, porque isso é o essencial para o homem.”

*Provérbios 3,13.21.23; Eclesiastes 12, 9-12
(Bíblia Sagrada)*

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por seu infinito amor, proteção, bênçãos, suprir todas minhas necessidades, amparo nos momentos difíceis e por ter iluminado meu caminho até aqui, e a **Maria Santíssima**, fiel intercessora.

Ao **Programa de Pós-graduação em Genética e Melhoramento da Escola de Agronomia (Universidade Federal de Goiás)**, pela oportunidade de cursar o mestrado, à **Embrapa Arroz e Feijão**, pelo suporte físico e financeiro para a elaboração desse trabalho e ao **CNPq**, pela concessão da bolsa de estudos.

A professora Dr^a. **Patrícia Guimarães Santos Melo**, orientadora, pela atenção e orientação dada antes mesmo de ingressar nesse programa de pós-graduação, por seu empenho, confiança e contribuição para o meu aprendizado.

Ao Dr. **José Manoel Colombari Filho**, coorientador, por toda sua dedicação ao me auxiliar na elaboração desse trabalho, por sua paciência, competência, exemplo profissional e pessoal.

A Dr^a. **Tereza Cristina de Oliveira Borba**, coorientadora, por todos os ensinamentos, por sua disponibilidade, confiança, humildade e otimismo em me orientar na execução das atividades de laboratório.

Aos meus pais **Celso Sebastião Vidotti e Meire Albertina P. Vidotti** e meu irmão **Miller Vinicius Vidotti**, que compreenderam minha ausência em muitos momentos desde que iniciei a pós-graduação, por cada gesto concreto de apoio durante toda minha trajetória até aqui e por acreditarem em minha capacidade mais do que eu mesma, me estimulando olhar sempre além do horizonte. E à todos os familiares que sempre estiveram ao meu lado torcendo para o sucesso do meu trabalho, em especial, minha avó **Albertina da Silva Ramos Pinto**.

Aos docentes do programa de pós-graduação em genética e melhoramento de plantas da UFG: **Dr. João Batista Duarte, Dr. Lázaro José Chaves, Dr^a. Leila Garcês de Araújo, Dr. Sérgio Tadeu Sibov, Dr^a Mariana Pires de Campos Telles e Dr. Alexandre Siqueira Guedes Coelho**, pelos ensinamentos acadêmicos e dedicação.

Aos funcionários do laboratório de biotecnologia da Embrapa Arroz e Feijão, **Luana Alves Rodrigues, Paula Valdisser, Gesimaria Coelho, João Antônio, Fernanda e Zezinho**, pela amizade, ensinamentos, paciência e apoio nos momentos difíceis.

A Dr^a. **Maria Luiza Peres Villar** da Empresa Mato-grossense de Assistência e

Extensão Rural (EMPAER), pela valiosa colaboração na condução dos ensaios a campo em Sinop-MT.

*Aos colegas e amigos da pós-graduação em Genética e Melhoramento de Plantas com os quais trabalhei e estudei, pelo companheirismo, ensinamentos e consideração, de modo especial ao **Paulo Henrique Guimarães, Polianna Dias, Poliana Carloni, Saulo Muniz, Mariana Vaz, Mariana Rodrigues, Gabriela Queiroz, Stella Cristina, Rodrigo Branquinho, e Odilon Moraes.***

*Aos estagiários e pós-graduandos do laboratório de biotecnologia da Embrapa Arroz e Feijão, especialmente **João Augusto, Wendell Pereira, Luma Cascão, Danilo Santana, Jacqueline Nascimento, Fernanda Raquel, Dayan Costa, José Umberto, Gabriel Feresin, Carlos Batista, Ricardo Diógenes, Ana Paula Motta, Daniany Adorno, Débora Gonçalves, Ariadna Faria, Karise Mamede, Crislene Castro, Nayara, Lorrayne Rosa, Loane Guimarães, Rebecca Santos e Dannilo Miranda,** pelo companheirismo no dia-a-dia, auxílio em minhas atividades e troca de conhecimentos.*

*Aos funcionários da Fundação Mato Grosso que me incentivaram e auxiliaram a iniciar a pós-graduação nesse programa, **Sandro Romão Viana e Sérgio Otsubo.***

*Aos **moradores do bairro Granada**, Herculândia-SP, por de alguma forma terem contribuído para que eu abraçasse a Agronomia como profissão e pelo apoio aos meus estudos.*

*A todos colegas e amigos, especialmente a **Delma Luz, Edmar Araújo e Tatiane Lobak,** pela amizade sincera, que mesmo com a distância sempre se fizeram presentes.*

*Aos amigos de Goiânia, sou grata pelo carinho e cuidado, por tudo que me proporcionaram tornando meus dias nessa cidade mais felizes, em especial **Barbara Lemos, Jordene Aguiar, Renato Ornelas, Jefson Alves, Rosiane Brito, Pedro Vilela,** aos do grupo Anjos das Ruas, Resgate e os da paróquia Nossa Senhora da Assunção.*

Seria muito difícil agradecer de forma correta a todas as pessoas com as quais convivi nos últimos anos e que me auxiliaram a chegar até aqui, mas a todos que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma, meus mais sinceros agradecimentos.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	13
RESUMO.....	14
ABSTRACT.....	16
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1 IMPORTÂNCIA SOCIOECONÔMICA DA CULTURA DO ARROZ...	20
2.2 FÓSFORO: LIMITAÇÕES NA DISPONIBILIDADE NO SOLO E DECLÍNIO DAS RESERVAS NATURAIS.....	23
2.3 MECANISMOS DE ADAPTAÇÃO AOS BAIXOS NÍVEIS DE FÓSFORO NO SOLO E CONTROLE GENÉTICO.....	26
2.4 MELHORAMENTO GENÉTICO VISANDO A TOLERÂNCIA À DEFICIÊNCIA DE FÓSFORO.....	30
2.5 SELEÇÃO RECORRENTE: MÉTODO ALTERNATIVO DE MELHORAMENTO PARA ESTRESSES ABIÓTICOS.....	35
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	40
3.1 MATERIAL GENÉTICO.....	40
3.2 DADOS EXPERIMENTAIS.....	43
3.2.1 Caracterização dos sítios de fenotipagem.....	44
3.2.2 Avaliação para tolerância à deficiência de fósforo no solo.....	45
3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICO-GENÉTICAS.....	46
3.3.1 Análises de variância individuais.....	46
3.3.2 Análises de variância conjunta por nível de fósforo e estimação dos componentes de variância.....	47
3.3.3 Análises de variância conjunta e estimação dos componentes de variância.....	53
3.3.4 Correlações fenotípica, genética e ambiental entre caracteres.....	58
3.3.5 Resposta esperada à seleção.....	59
3.3.6 Avaliação da tolerância à deficiência de fósforo.....	61
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.1 ANÁLISES DE VARIÂNCIA INDIVIDUAIS.....	63
4.1.1 Produção de grãos.....	63
4.1.2 Altura de planta.....	65
4.1.3 Dias para o florescimento.....	67
4.2 ANÁLISES DE VARIÂNCIA CONJUNTAS.....	69
4.3 ESTIMATIVA DE PARÂMETROS QUANTITATIVOS.....	77
4.4 CORRELAÇÕES FENOTÍPICA, GENÉTICA E AMBIENTAL ENTRE CARACTERES.....	81
4.5 RESPOSTA ESPERADA À SELEÇÃO.....	86
4.6 AVALIAÇÃO DA TOLERÂNCIA À DEFICIÊNCIA DE FÓSFORO...	89
5 CONCLUSÕES.....	99

6	REFERÊNCIAS.....	100
	APÊNDICES.....	114

LISTA DE TABELAS

	Pág.
1 <i>Quantitative Trait Loci</i> (QTL) para caracteres relacionados com a absorção e uso de fósforo em arroz.....	28
2 Estimativas do progresso genético com a seleção recorrente para a tolerância aos diferentes estresses abióticos.....	37
3 Composição da população CNA9 de seleção recorrente sintetizada pela Embrapa Arroz e Feijão.....	41
4 Cronograma da utilização da população CNA9 de seleção recorrente sintetizada pela Embrapa Arroz e Feijão.....	41
5 Esquema da análise de variância individual por local e nível de P no solo.....	47
6 Esquema da análise de variância conjunta por nível de P no solo com as respectivas esperanças dos quadrados médios.....	50
7 Esquema da análise de variância conjunta com as respectivas esperanças dos quadrados médios.....	55
8 Esquema da análise de variância dos caracteres x , y e da soma $(x + y)$, para o delineamento látice quadrado simples duplicado, com os produtos médios e suas respectivas esperanças.....	58
9 Análises de variância individuais por local e por nível de fósforo (P) no solo (alto e baixo), coeficiente de variação experimental ($CV\%$), eficiência do látice ($EL\%$) e média geral ($\bar{M}$) para o caráter produção de grãos, em kg ha ⁻¹	63
10 Análises de variância individuais por local e por nível de fósforo (P) no solo (alto e baixo), coeficiente de variação experimental ($CV\%$), eficiência do látice ($EL\%$) e média geral ($\bar{M}$) para o caráter altura de planta, em cm.....	65
11 Análises de variância individuais por local e por nível de fósforo (P) no solo (alto e baixo), coeficiente de variação experimental ($CV\%$), eficiência do látice ($EL\%$) e média geral ($\bar{M}$) para o caráter dias para o florescimento.....	67
12 Análises de variância conjunta de locais para cada nível de fósforo (P) no solo (alto e baixo), e de locais e níveis de P, coeficiente de variação experimental ($CV\%$), eficiência do látice ($EL\%$), média geral ($\bar{M}$), média das progênes $S_{0:2}(\bar{P})$, média das testemunhas ($\bar{T}$), média geral de Santo Antônio de Goiás/GO ($\bar{M}_{SAG}$) e média geral de Sinop/MT ($\bar{M}_{SNP}$), para o caráter produção de grãos, em kg ha ⁻¹	70
13 Estimativas dos parâmetros genéticos para o caráter produção de grãos (kg ha ⁻¹), com seus respectivos limites superiores (LS) e inferiores (LI) dos intervalos de confiança. Variância genotípica entre progênes $S_{0:2}(\hat{\sigma}_p^2)$, variância da interação progênie x local ($\hat{\sigma}_{pa}^2$), variância da interação progênie x nível de fósforo ($\hat{\sigma}_{pn}^2$), variância da interação progênie x local x nível de fósforo ($\hat{\sigma}_{pan}^2$), variância ambiental ($\hat{\sigma}^2$), coeficiente de herdabilidade entre médias de progênes $S_{0:2}(\hat{h}_p^2)$ e índice de variação (b) obtidos pelas análises de variância conjuntas de locais por nível de P no solo (alto e baixo); e, de locais e níveis de fósforo (conjunta).....	78
14 Estimativas de correlações fenotípicas (r_F), genéticas (r_G) e ambientais (r_E), para cada nível de P no solo (alto e baixo), entre os caracteres produção de	

	grãos (PG, em kg ha ⁻¹), altura de planta (AP, em cm) e dias para o florescimento (DF, em dias).....	82
15	Resposta esperada com a seleção de progênies S _{0:2} para o caráter produção de grãos (PG, em kg ha ⁻¹) com base em diferentes critérios seletivos, para cada nível de P no solo (alto e baixo), e intensidade de seleção de 15%.....	86
16	Média do caráter produção de grãos (PG, em kg ha ⁻¹) nas condições de baixo e alto nível de fósforo (P) no solo, Média Harmônica da Performance Relativa (<i>MHPR</i>), Índice de Tolerância à Deficiência de P (<i>IT</i>) e a média conjunta para ambos os níveis de P no solo. As 57 progênies S _{0:2} classificadas como tolerantes e responsivas ao P com base na dispersão gráfica e as testemunhas.....	94

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
1	Esquema ilustrativo das etapas que envolvem cada ciclo da seleção recorrente realizado pela Embrapa Arroz e Feijão, com a população CNA9.....	43
2	Dispersão das médias ajustadas das progênies $S_{0:2}$ e testemunhas para o caráter produção de grãos (PROD, em kg ha ⁻¹), em cada nível de P no solo (alto e baixo), médias gerais dos ensaios, regressão linear ($y = x$) para análise da estabilidade, e a regressão linear para correlação da PROD das progênies $S_{0:2}$ entre os dois ambientes, conforme apresentados na legenda.....	91
3	Dispersão das médias ajustadas das 57 progênies $S_{0:2}$ eficientes e responsivas ao P no solo e testemunhas para o caráter produção de grãos (PG, em kg ha ⁻¹), em cada nível de P no solo (alto e baixo), médias gerais dos ensaios, regressão linear ($y = x$) para análise da estabilidade, e a regressão linear para correlação da PG das progênies $S_{0:2}$ entre os dois ambientes, conforme apresentados na legenda. As progênies em destaque referem-se as trinta melhores considerando os valores de <i>IT</i>	96
4	Dispersão das médias ajustadas das 57 progênies $S_{0:2}$ eficientes e responsivas ao P no solo e testemunhas para o caráter produção de grãos (PG, em kg ha ⁻¹), em cada nível de P no solo (alto e baixo), médias gerais dos ensaios, regressão linear ($y = x$) para análise da estabilidade, e a regressão linear para correlação da PG das progênies $S_{0:2}$ entre os dois ambientes, conforme apresentados na legenda. As progênies em destaque referem-se as trinta melhores considerando os valores de <i>MHPR</i>	97

RESUMO

VIDOTTI, M. S. **Seleção recorrente na população CNA9 de arroz de terras altas para tolerância e responsividade ao fósforo**. 2015. 118 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.¹

O arroz de terras altas possui um elevado potencial de expansão na região de cerrado brasileiro, onde os solos possuem fatores limitantes a produção, como a baixa disponibilidade de fósforo (P). Considerando os custos de produção e a escassez de recursos naturais, uma alternativa adequada é explorar os recursos genéticos afim de desenvolver cultivares tolerantes à deficiência e mais eficientes no uso do P. Tendo em vista a natureza poligênica desses caracteres, a seleção recorrente é uma alternativa que permite concentrar gradualmente os alelos favoráveis. O objetivo deste estudo foi estimar parâmetros genéticos e fenotípicos e avaliar progênies da população CNA9/3/1 de seleção recorrente de arroz de terras altas, quanto a tolerância à deficiência de P no solo. Em 2011/12, em Santo Antônio de Goiás-GO e em Sinop-MT, foram conduzidos dois experimentos contrastantes por local: baixo e alto nível de P, estabelecidos pelo teor de argila do solo, e sem a discriminação dos demais fatores. Foi adotado o delineamento látice quadrado simples 14 x 14, com 189 progênies $S_{0:2}$ e sete testemunhas, com parcelas de 4 linhas de 3 m de comprimento. Foram avaliados os caracteres produção de grãos (PG, em kg ha⁻¹), altura de planta (AP, em cm) e dias para o florescimento (DF, em dias). Foram obtidas as análises de variância individual por local e por nível de P para esses caracteres e as respectivas correlações fenotípicas, genéticas e ambientais. Somente para PG, foram realizadas as análises de variância conjunta dentro de cada nível de P e, posteriormente, envolvendo níveis e locais, foram estimados os parâmetros genéticos e fenotípicos. Foram obtidas as estimativas da resposta esperada com a seleção direta, indireta e geral considerando os dois níveis de P no solo, além da Média Harmônica da Performance Relativa (*MHPR*) e do Índice de Tolerância (IT) para os genótipos identificados como eficientes e responsivos a partir de uma distribuição gráfica de médias ajustadas. A deficiência de P no solo reduziu expressivamente a média geral em 27% para PG, além de estreitar a estimativa da variância genética entre progênies $S_{0:2}$ (σ_p^2) em 63%. Foram observadas diferenças altamente significativas ($p \leq 0,01$) entre as progênies, evidenciando a presença de variabilidade genética suficiente na população para progresso genético em PG sob ambos os níveis de P. Essas apresentaram desempenho significativamente ($p \leq 0,01$) inferior ao das testemunhas e, também, interação significativa ($p \leq 0,01$) com locais, em ambos os níveis de P. Verificou-se que o efeito da interação de genótipo x nível de P foi significativo ($p \leq 0,01$) e a correlação fenotípica ($\sqrt{R^2}$) entre níveis de P foi baixa (0,44). Nesse sentido, a resposta esperada com a seleção demonstrou que as progênies devem ser avaliadas em ambientes com deficiência de P para que o ganho genético nesse ambiente seja efetivo. As correlações genéticas entre os caracteres avaliados foram significativas ($p \leq 0,01$) e demonstraram ser favoráveis para a seleção de genótipos tolerantes à deficiência de P, porte baixo e ciclo precoce. Porém, existe maior dificuldade de se incrementar o potencial produtivo, visto que houve uma significativa ($p \leq 0,05$) correlação positiva entre esse caráter e AP ($r_G = 0,385$). A partir da dispersão gráfica das progênies $S_{0:2}$ foram identificadas 57 eficientes e responsivas à presença de P, sendo que para a seleção

¹ Orientadora: Prof^a. Dr^a. Patrícia Guimarães Santos Melo. EA-UFG.

Co-orientadores: Dr. José Manoel Colombari Filho e Dr^a. Tereza Cristina de Oliveira.
Embrapa Arroz e Feijão.

dentro desse grupo, *MHPR* demonstrou ser um critério mais adequado que *IT* ao se considerar simultaneamente esses dois atributos.

Palavras-chave: *Oryza sativa* L., genética quantitativa, estresse abiótico, componentes de variância, melhoramento populacional.

ABSTRACT

VIDOTTI, M. S. **Recurrent selection in CNA9 population of upland rice for tolerance and responsivity to phosphorus**. 2015. 118 f. Dissertation (Master's Degree in Genetics and Plant Breeding) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

The upland rice has a high potential for expansion in the Brazilian savannahs region, where soils have limiting factors to yields, such as low phosphorus (P) availability. Considering the costs and the natural reserves scarcity, a suitable alternative is to explore the genetic resources to develop cultivars with P deficiency tolerance and P-use efficiency. Given the polygenic inheritance of these traits, a strategy is to concentrate the favorable alleles gradually through recurrent selection. The objectives of this study were to estimate genetic and phenotypic parameters, and evaluate progenies from CNA9/3/1 recurrent selection population of upland rice for the tolerance to P deficiency in the soil. In 2011/12 crop year, in Santo Antônio de Goiás-GO and Sinop-MT, two contrasting trials were conducted within each location: low and high P-level determined by the clay content of the soil, and without discrimination of other crop practices. The simple square lattice design 14 x 14 was adopted, with 189 $S_{0:2}$ progenies and seven checks, with plots consisted of four 3-m-long rows. Grain yield (GY, in kg ha^{-1}), plant height (PH, cm) and days-to-flowering (DF, in days) were evaluated. The individual variance analysis by location and by P-level were obtained, well as their phenotypic, genetic and environmental correlations. Only for PG, genetic and phenotypic parameters were estimated from joint analysis of variance within each P-level, and involving locations and P-levels. Estimates of the expected response to selection were obtained for the two P-levels, considering the direct, indirect and general selection criteria, and also the Harmonic Mean of Relative Performance (*MHPR*) and Tolerance Index (*IT*) of the genotypes identified as efficient and responsive from a graphic dispersion of adjusted means. The overall average of the GY was reduced significantly in 27% for P deficiency in the soil and the genetic variance among $S_{0:2}$ progenies ($\hat{\sigma}_p^2$) was narrowed in 63%. Highly significant differences ($p \leq 0.01$) were observed among progenies, demonstrating the presence of sufficient genetic variability for GY, in this population, to obtain genetic progress in both P-levels. The progenies showed performance significantly ($p \leq 0.01$) below the of checks and also a significant interaction ($p \leq 0.01$) with locations, in both P-levels. The genotype x P-level interaction was significant ($p \leq 0.01$) and the phenotypic correlation ($\sqrt{R^2}$) between P-levels was low (0.44). In this sense, the expected response to selection demonstrated that progenies must be evaluated in P-deficient environments to obtain effective genetic gain in this environment. The genetic correlations between traits were significant ($p \leq 0.01$) and are favorable for the selection of genotypes with tolerance to P deficiency, short plant height and early cycle. However, there is a greater difficulty in increasing the yield potential, since there the genetic correlation between this trait and PH was significant ($p \leq 0.01$) and positive ($r_G = 0.385$). From the graphic dispersion of $S_{0:2}$ progeny means have been identified 57 efficient and responsive to the presence of P in the soil, and for the selection within this group, the *MHPR* was more appropriate than *IT*, because considering simultaneously these two attributes.

Key words: *Oryza sativa* L., quantitative genetics, abiotic stress, variance components, breeding population.

1 INTRODUÇÃO

O arroz de terras altas possui grande potencial de expansão principalmente no cerrado brasileiro, haja vista a grande disponibilidade de área para o cultivo de grãos dessa região. Contudo, essa caracteriza-se pela deficiência de fósforo (P) em função não só dos baixos níveis desse elemento no solo, como pela sua intensa adsorção pelos óxidos de ferro e alumínio, minerais típicos dos solos de regiões tropicais altamente intemperizados. Esse nutriente desempenha papel importante em processos vitais no metabolismo vegetal, de modo que a limitação na sua disponibilidade no solo pode reduzir em até 98% a produção de grãos na cultura do arroz. Dessa forma, para se alcançar produtividade satisfatória, os solos dessa região são corrigidos com altas doses de fertilizantes fosfatados, uma solução muitas vezes insatisfatória do ponto de vista econômico e ambiental. Em adição, as reservas de fosfato são limitadas e podem ser exauridas em menos de um século, constituindo uma séria ameaça à agricultura. Tendo em vista que a produção de arroz deve ser incrementada para atender a crescente população mundial, o desenvolvimento de cultivares com maiores níveis produtivos e que possuam adaptação às condições adversas, é considerado estratégico para a segurança alimentar (Alexandratos & Buinsma, 2012; Cordell et al., 2009; Fageria & Barboza Filho, 2004; Pinheiro et al., 2006).

Esforços têm sido empregados na compreensão dos mecanismos de adaptação as condições de restrição de P no solo e um número crescente de *Quantitative Trait Loci* (QTLs) relacionados com a utilização e eficiência de P em arroz tem sido reportado na literatura (Vinod & Heuer, 2014). Considerando-se a natureza poligênica desses caracteres, existe a dificuldade de se concentrar todos os alelos favoráveis em um único genótipo. Nesse sentido, a seleção recorrente é uma técnica que tem permitido o progresso genético com a seleção para alguns estresses abióticos (Chapman & Edmeades, 2009; Heinz et al., 2012; Santos et al., 2003). Por meio de sucessivos ciclos de recombinação e seleção, é possível elevar a frequência de alelos favoráveis e, por consequência, a média populacional, a fim de obter ganhos factíveis nos ciclos subsequentes. Assim, o maior benefício da seleção

recorrente nos programas de melhoramento genético é a disponibilização frequente de genitores para a síntese de novas populações elite, os quais impulsionam o desenvolvimento de novos cultivares (Geraldi, 1997).

A avaliação fenotípica em condições de campo é tida como o parâmetro mais importante de tolerância à deficiência de P, sendo que a disponibilidade desse elemento no solo é o fator chave na pressão de seleção que determina a eficiência de seleção. Por isso, é necessário que os sítios de fenotipagem sejam bem caracterizados e condizentes com os ambientes de cultivo que apresentem o estresse (Parentoni et al., 2011). Contudo, ainda não existe um consenso em relação a intensidade do estresse que deve ser provocado pela deficiência de P no solo afim de discriminar os genótipos quanto tolerância à deficiência desse macronutriente. Os poucos estudos reportados em arroz de terras altas foram ainda conduzidos em apenas um local e em áreas com histórico de adubação fosfatada (Fidelis et al., 2013; Rotili et al., 2010), o que pode, também, ter influência na seleção de genótipos superiores.

Os programas de melhoramento genético tradicionais de arroz vêm sendo conduzidos com o objetivo de desenvolver cultivares com elevado potencial produtivo para áreas com condições edafoclimáticas favoráveis (Dowling et al., 1998). No entanto, estudos tem demonstrado que esses genótipos normalmente não são adequados para o cultivo em condições marginais ou sob estresses, como a deficiência de P (Ceccarelli, 1996; Santos et al., 2003). Nesse contexto, a seleção para eficiência e resposta ao P é estratégica, pois permite que o genótipo apresente bom desempenho produtivo independentemente do nível desse elemento no solo. Porém, ainda é limitado o número de índices que permitem a seleção simultânea desses atributos (Fisher & Maurer, 1978; Resende, 2007). Além disso, particularmente em solos do cerrado, pouco se conhece sobre o desempenho de genótipos de arroz de terras altas em condições limitantes de P, menos ainda sobre a magnitude da interação com os níveis desse elemento no solo e o efeito desse estresse abiótico sobre características de interesse agrônomo.

A variabilidade genética para tolerância à deficiência de P em arroz de terras altas tem sido reportada na literatura por vários autores (Cancellier et al., 2012; Fageria et al., 2014; Guimarães et al., 2007). Em geral, esses estudos visam apenas identificar um conjunto restrito de genótipos que possuam eficiência e/ou resposta ao P, não existindo relatos de melhoramento populacional da cultura do arroz para esse propósito. Com isso, são desconhecidas estimativas de parâmetros genéticos, como herdabilidade, índice de variação

e correlações genéticas em populações de arroz de terras altas avaliadas para tolerância à deficiência de P nos solos do cerrado. Informações como essas são importantes para a predição de ganhos, avaliação da viabilidade de programas de melhoramento e a orientação de estratégias eficientes de seleção para esse estresse abiótico (Vencovsky, 1987).

Em vista do exposto, o presente estudo teve por objetivos, tomando-se como base a população CNA9/3/1 de arroz de terras altas, em seu terceiro ciclo de seleção recorrente, avaliada em níveis contrastantes de fósforo no solo: (i) Estimar os parâmetros genéticos e fenotípicos entre progênies $S_{0:2}$ da população CNA9/3/1; (ii) Estudar o efeito do estresse abiótico provocado pela deficiência de fósforo no solo sobre a variabilidade genética do caráter produção de grãos; (iii) Estimar as correlações fenotípica, genética e ambiental entre os caracteres produção de grãos, altura de planta e dias para o florescimento; (iv) Estimar a resposta esperada com seleção para o caráter produção de grãos sob condições de presença e ausência de estresse abiótico devido à deficiência de fósforo no solo; e (v) Identificar, com base nas médias ajustadas, as progênies $S_{0:2}$ com maior tolerância à deficiência de fósforo no solo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ASPÉCTOS SOCIOECONÔMICOS DA CULTURA DO ARROZ

O arroz (*Oryza sativa* L.) destaca-se como um dos principais cereais produzidos e consumidos no mundo, caracterizando-se como um dos produtos que compõem a base alimentar de grande parte da população mundial. Em termos de produção mundial de cereais, o arroz ocupa a terceira posição em área cultivada e a segunda posição em produção de grãos, atrás apenas do milho. No ano de 2013, foram produzidas aproximadamente 745,7 milhões de toneladas, cultivadas em 164,7 milhões de hectares. A maior parte de produção está localizada na Ásia, a qual correspondeu nesse período por 90,5% da produção, seguida pelas Américas (4,9%) e África (3,9%). Como principal país produtor, a China em 2014 produziu cerca de 205 milhões de toneladas de arroz, o que corresponde 28% da produção mundial. No entanto, esse país não tem participação ativa no comércio internacional, uma vez que sua produção é fortemente controlada pelo governo com o intuito de garantir o abastecimento interno. Os demais líderes mundiais na produção de arroz são: Índia (21,3%), Indonésia (9,6%) e Bangladesh (6,9%), os quais, também, destacam-se como os principais exportadores (Conab, 2014; FAO, 2014).

Entre os países ocidentais, o Brasil destaca-se como o maior produtor de arroz, ocupando a nona posição ao nível mundial. No ano agrícola 2013/2014, estima-se que a área cultivada com arroz no Brasil foi de 2,4 milhões de hectares, nos quais foram produzidos 12,3 milhões de toneladas. O arroz é cultivado em todo o território nacional, sendo dois os sistemas básicos de produção: irrigado e terras altas, que correspondem a 65% e 35%, respectivamente, da área destinada a essa cultura (Conab, 2014; IRRI, 2014).

A região Sul é a principal produtora de arroz, respondendo por cerca de 77% da produção nacional, utilizando tradicionalmente a irrigação por inundação. Destaca-se o Rio Grande do Sul, que no ano agrícola 2013/2014 produziu 8,2 milhões de toneladas, contribuindo com aproximadamente 66,7% da produção total brasileira. Nas demais regiões prevalece o cultivo sob o ecossistema de terras altas, sendo importantes os estados do

Maranhão, Mato Grosso e Goiás, os quais correspondem, respectivamente, por 5,4%, 4,8% e 1,5% da produção nacional (Conab, 2014).

Apesar do sistema de terras altas ser predominante nas áreas destinadas a cultura do arroz, sua contribuição para a produção nacional é bem inferior ao irrigado, estimada em apenas 23%. Mesmo com potencial para atingir altos tetos produtivos, atualmente a produtividade neste sistema pode chegar a menos da metade do sistema irrigado. No Mato Grosso, por exemplo, a produtividade média é de 3.285 kg ha⁻¹ em comparação ao Rio Grande do Sul, que produz cerca de 7.185 kg ha⁻¹, o que evidencia a diferença produtiva entre os dois sistemas (Conab, 2014).

Como no Brasil o cultivo do arroz de terras altas não ocorre em áreas irrigadas, a cultura deve ser conduzida de acordo com a estação chuvosa, sendo que a distribuição pluviométrica tem papel primordial para seu desenvolvimento adequado. Porém, é comum a ocorrência de “veranicos” nas principais regiões produtoras desse sistema, induzindo a deficiência hídrica nas plantas. Favorecida por esse fator, tende ocorrer maior incidência de brusone, que é a doença que mais contribui para a redução da produtividade do arroz de terras altas (Lanna et al., 2012; Prabhu & Silva, 2005).

Outro ponto a ser considerado é o menor padrão tecnológico empregado no arroz de terras altas, possivelmente relacionado a um fator cultural que teve início quando essa cultura foi a pioneira na ocupação da região do cerrado, para posterior cultivo com soja ou atividade pecuária. Nesse contexto, seu cultivo era caracterizado pelo baixo aporte tecnológico, com reduzida produtividade. No auge do processo de abertura de áreas, nas décadas de 75 a 85, o arroz de terras altas chegou a ser a principal cultura do cerrado, ocupando mais de 4,5 milhões de hectares. Apesar disso, sua exploração agrícola sempre estava mais associada a subsistência e “domesticação” da terra do que a uma atividade comercial que possibilitava boa rentabilidade. Por isso, com o declínio das áreas nativas, as áreas no cerrado destinadas a essa cultura diminuíram 61% entre 1986 e 2001, o que provocou uma redução de 40% na produção por esse sistema de cultivo (Crusciol et al., 2005; Pinheiro et al., 2006).

O arroz de terras altas vem evoluindo nos últimos anos, ainda que não possua o mesmo patamar produtivo que o sistema irrigado, apresenta maior potencial de expansão. Uma das vantagens é o fato do custo de produção do arroz de terras altas no Mato Grosso, comparativamente ao arroz irrigado no Rio Grande do Sul, pode equivaler somente a 43% do custo por hectare, demonstrando o menor investimento necessário para a produção sob

esse sistema (Stefano, 2011). Além disso, muitos dos custos do arroz irrigado não podem ser distribuídos com outras culturas, uma vez que a drenagem e a construção de canais, por exemplo, são aproveitados somente na cultura do arroz. Nesse sentido, o arroz de terras altas apresenta ainda a vantagem de ser explorado em rotação com outras culturas.

Outro fator preponderante para a expansão da orizicultura sob o sistema de terras altas é a disponibilidade de áreas para o cultivo de grãos na região do cerrado brasileiro, com área potencial de 200 milhões de hectares. Essa região apresenta geralmente condições favoráveis de topografia, solos bem drenados, temperatura e luminosidade favorável, precipitação suficiente, porém, mal distribuída (Pinheiro et al., 2006). Nesse caso, o arroz de terras altas poderia ser incluído nos sistemas de cultivo que se tem nessas áreas, como por exemplo, em rotação com a cultura da soja ou ainda ser utilizado na renovação de pastagens.

Contudo, os solos do cerrado são caracterizados pela ocorrência de múltiplos estresses abióticos. Dentre esses, destacam-se a elevada acidez e teor de alumínio, deficiência hídrica e deficiência de fósforo (P), sendo esse último um dos nutrientes que mais restringem a produção e, conseqüentemente, a expansão da orizicultura nas áreas do cerrado (Fageria & Barboza Filho, 2004).

Nos últimos anos, a produção brasileira de arroz tem acompanhado a demanda interna, não necessitando da importação de grandes volumes. No entanto, estima-se que no ano agrícola 2021/2022 devem ser produzidas 15,2 milhões de toneladas, sendo que para atender esse montante deve haver um crescimento anual da produção de 1,4% a partir de 2011/2012 (Mapa, 2014). No mundo, as estimativas apontam que a produção de arroz deverá atingir 827 milhões de toneladas até o ano de 2050. No entanto, haverá um declínio da área alocada para essa cultura, passando dos 164,7 milhões de hectares atuais para aproximadamente 155 milhões de hectares. Também, considerando os recursos hídricos que se tem disponíveis, cada vez mais será necessário a eficiência de utilização de água, sendo que sistemas de cultivo de arroz que não utilizem irrigação são os que mais devem contribuir em termos de aumento de produtividade. Em 2007, a produtividade média mundial sob sistemas não irrigados foi de 2.570 kg ha⁻¹ e espera-se que em 2050 seja de 3.600 kg ha⁻¹ (Alexandratos & Buinsma, 2012). O Brasil como principal produtor mundial de arroz de terras altas tem papel primordial nesse contexto, devendo os programas de melhoramento ter como estratégia o desenvolvimento de cultivares economicamente atraentes e adaptados às condições potenciais de cultivo (Pinheiro et al., 2006).

2.2 FÓSFORO: LIMITAÇÕES NA DISPONIBILIDADE NO SOLO E DECLÍNIO DAS RESERVAS NATURAIS

A deficiência de P no solo é um dos fatores que mais limitam a produção agrícola em países africanos (Sahrawat et al., 1998) e asiáticos (George et al., 2001), assim como na América do Sul (Fageria et al., 2013). Estimativas apontam metade das terras agricultáveis no mundo ocorra esse estresse abiótico, sendo que a disponibilidade desse elemento deva ser reduzida ainda mais nos próximos anos em função do aumento na degradação dos solos (Lynch, 2011).

De acordo com Loughman et al. (1983) o estresse pela deficiência de um elemento essencial, tal como o fósforo, pode ser ocasionado por diferentes fatores, como a baixa concentração e formas indisponíveis do elemento no solo. Considerando-se a região do cerrado, a deficiência de P está relacionada a ambos os fatores. Grande parte dos solos dessa região dispõem de 0,4 ppm de P, o que é considerado extremamente baixo (Lopes, 1996; Crusciol et al., 2005). Além disso, a concentração da forma inorgânica de P, a qual é absorvida pelas plantas, pode variar de 0,1 a 10 μM , dificultando seu processo de absorção pelas plantas por encontrar-se altamente diluída na solução do solo (Loughman et al., 1983).

Outro fator que afeta a disponibilidade de P nos solos do cerrado é a alta capacidade de adsorção desse macronutriente pelas partículas do solo. Por serem altamente intemperizados, os solos dessa região normalmente apresentam grande quantidade de óxidos de ferro (hematita e goethita) e de alumínio (gibbsite). Devido as cargas positivas desses minerais, ocorre a adsorção do ânion fosfato e a formação de precipitados de fosfatos de ferro e alumínio, com baixa solubilidade e não prontamente disponíveis para as plantas (Fageria, 2013).

Além disso, a maioria dos solos do cerrado é ácido, o que eleva a adsorção do P, pois esse processo é intimamente relacionado ao pH do solo. Nessas condições, ao mesmo tempo que eleva-se os níveis do ânion H_2PO_4^- , forma inorgânica de P preferencialmente absorvida pelas plantas, também, ocorre incremento de Fe e Al na solução do solo, ocasionando aumento na precipitação conjunta desses compostos (Trollove et al., 2003; Parentoni et al., 2011). Considerando que acidez no solo ocorre entre 30 e 40% das terras aráveis no mundo, e que associado a esse fator normalmente está acompanhado a deficiência de fósforo no solo, é evidente a importância desse estresse abiótico, também, ao nível mundial (Von Uexkull & Mutert, 1995).

O próprio mecanismo de difusão pelo qual o P se movimenta no solo é um dos motivos limitantes de sua absorção pelas plantas. Esse processo é afetado por diversos fatores, tais como baixa temperatura, compactação do solo e interação com coloides, reduzindo a mobilidade de P no solo (Araújo & Machado, 2006). Na maioria das vezes, esse elemento permanece no local em que foi adicionado, por isso, para maior chance de absorção, as raízes devem se encontrar adjacentes a esse elemento no solo. Principalmente nas áreas onde não é utilizada a prática de revolvimento do solo, o P adicionado por meio de fertilizantes fosfatados tende a se concentrar nas camadas superficiais do solo, conduzindo a uma proliferação de raízes somente nessa região. Com isso, as plantas acabam suportando menos a ocorrência de “veranicos”, tão comuns na região do cerrado. Além disso, a baixa umidade do solo reduz ainda mais a absorção de P, dado que para o processo de difusão no solo é fundamental a disponibilidade de água (Lopes, 1996).

Devido à baixa disponibilidade de P nos solos do cerrado, a adubação fosfatada se tornou indispensável para se alcançar produtividade satisfatória (Crusciol et al., 2005; Lopes, 1996; Pinheiro et al., 2006). É evidente que aumento da concentração desse elemento no solo proporciona resposta positiva no desempenho produtivo do arroz de terras altas. Fageria (2001) avaliou o peso seco de planta e a produção de grãos de 20 genótipos de arroz de terras altas cultivados em níveis de P variando de 0 a 400 mg kg⁻¹ de solo. Conforme o aumento no nível desse elemento, maior foi o incremento nos dois caracteres, o que ressalta a importância desse tipo de adubação para o desenvolvimento adequado das plantas de arroz.

Contudo, a eficiência dos fertilizantes fosfatados nos solos tropicais é baixa, inferior a 10%, figurando como principais causas a alta adsorção de P pelas partículas do solo e a ineficiência de muitos genótipos nos processos de aquisição e utilização interna desse macronutriente (Baligar & Bennett, 1986). Por essa razão, normalmente é aplicada uma quantidade de fertilizante fosfatado maior do que as plantas efetivamente possuem capacidade de utilizar. O acúmulo em excesso desse nutriente no solo pode ocasionar diversos problemas, dentre eles a eutrofização de recursos hídricos (Fageria et al., 2003). Além disso, a necessidade de adubação massiva torna-se um dos fatores preponderantes na margem de lucro dos agricultores. No caso do arroz, juntamente com defensivos, os fertilizantes podem contribuir com até 40% dos custos de produção (Borges et al., 2013).

No Brasil, o preço dos fertilizantes fosfatados é elevado, principalmente porque o país é dependente da importação de rochas constituídas com esse macronutriente, as quais são o insumo básico para sua fabricação. As reservas de P estão distribuídas de forma

desigual no mundo, de modo que estão concentradas principalmente no Marrocos, seguido pela China e EUA. Observa-se que a dependência dos países produtores de alimentos da importação desses poucos países é problemática, e ainda não existem políticas internacionais que garantam o acesso a essas reservas futuramente. Um fato é que a China tem reduzido drasticamente as exportações para garantir o abastecimento interno e os EUA possuem menos de 30 anos de suprimentos. Dessa forma, a oferta de rochas fosfatadas no mercado internacional vem sendo praticamente monopolizada por Marrocos, portanto, fortemente influenciadas pela política desse país (Cordell et al., 2009; Van Kauwenbergh, 2014).

Um ponto de grande preocupação ao que se refere aos recursos mundiais de rochas fosfáticas, é a possível longevidade de exploração das jazidas face à crescente demanda desse recurso. Dado que as fontes de fósforo são não renováveis, estima-se que as reservas globais possam ser exauridas nos próximos cinquenta a cem anos (Cordell et al., 2009). Estimativas apontam que deve ocorrer um aumento nos preços desse insumo tendo em vista a possível elevação de seu consumo nos próximos anos. Por exemplo, em 2007/08, as mesmas pressões que acarretaram na crise de alimentos fizeram com que a demanda por rocha fosfática fosse maior do que a produção, e isso fez com que os preços aumentassem 700% em um período de apenas 14 meses. Também, provavelmente será observada uma elevação no custo de extração e beneficiamento para remoção de impurezas. À medida que as reservas de rocha fosfática forem sendo exauridas, as com difícil acesso ou com qualidade inferior devido a misturas de outros elementos e/ou menor solubilidade deverão começar a serem exploradas. Considerando-se esses aspectos, o cenário é preocupante para a sustentabilidade de diversas culturas, incluindo do arroz, já que o aumento no valor dos fertilizantes repassados à cadeia produtiva refletirá diretamente nos custos de produção agrícola (Cordell et al., 2009; Van Kauwenbergh, 2014).

Para o correto manejo do P na agricultura, é fundamental que se desenvolvam sistemas de manejo que incrementem sua disponibilidade e se conheçam os mecanismos que envolvam sua aquisição e utilização interna pelas plantas (Vance et al., 2003). Normalmente, as plantas possuem habilidades diferentes para sobreviver em condições de deficiência de P, as quais podem ser, por exemplo, em razão do metabolismo desse nutriente, tais como os processos de absorção e de transporte de fosfato (Lughman et al., 1983). Nesse sentido, estudos multidisciplinares são importantes para auxiliar na compreensão dessas questões.

2.3 MECANISMOS DE ADAPTAÇÃO AOS BAIXOS NÍVEIS DE FÓSFORO NO SOLO E CONTROLE GENÉTICO

O fósforo é um dos elementos mais limitantes no crescimento e desenvolvimento das plantas. Ele possui papel primordial em vários processos celulares, incluindo, por exemplo, a geração de energia, síntese de ácidos nucleicos, fotossíntese, respiração, síntese e estabilidade de membranas, ativação/inativação enzimática (Vance et al., 2003; Panigrahy et al., 2009). No arroz, o P é o terceiro elemento de maior demanda durante o processo de desenvolvimento (Fageria & Souza, 1995). Segundo Fageria et al. (2004), os principais efeitos do fósforo nas plantas de arroz são o aumento do número de panículas, aumento da massa de grãos, auxilia no processo de maturação dos grãos, incremento do sistema radicular e melhoria na qualidade dos grãos.

Quando submetida à baixa disponibilidade de P, a planta de arroz tende a priorizar o desenvolvimento do sistema radicular em relação à parte aérea, podendo ocasionar redução na produção de grãos (Crusciol et al., 2005). Nessas condições o número de panículas e a produção de grãos podem ser reduzidos em 90% e 98%, respectivamente. Outros sintomas característicos são a redução da altura da planta, do perfilhamento e do crescimento das raízes, além do bronzeamento das folhas mais velhas pelo acúmulo de antocianinas (Fageria et al., 2004).

A resposta à deficiência de P pode variar segundo o tecido, o tipo de célula, o estágio de desenvolvimento da planta, a disponibilidade de água e demais nutrientes, assim como a duração e a intensidade do estresse (Li et al., 2009). Porém, caso ocorram limitações na disponibilidade de fósforo no início do ciclo vegetativo, a planta pode não se recuperar posteriormente, mesmo fornecendo-se quantidades adequadas de P. Dessa forma, o suprimento desse macronutriente é essencial desde os estádios iniciais de crescimento da planta para se alcançar produtividades satisfatórias (Tanguilig et al., 1987; Dobermann et al., 1998).

Em resposta aos baixos níveis de P, muitas plantas desenvolveram mecanismos altamente especializados em adquirir e utilizarem P, os quais incluem alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas. Essas adaptações incluem muitas características relacionadas ao aprimoramento da habilidade de absorção por meio da ativação de transportadores específicos na membrana, desenvolvimento adaptativo das raízes com alteração da arquitetura e morfologia radicular, excreção de substâncias químicas para a

solubilização de P, alteração do metabolismo de carbono, dentre outros (Vance et al., 2003; Parentoni et al., 2011).

Um dos principais mecanismos para a tolerância à deficiência de P é a alteração radicular. Horst et al. (2001), revisando o processo governante da aquisição de P pelas culturas, concluíram que esse mecanismo é um dos processos mais importantes, dado que esse elemento possui baixa mobilidade no solo. Dessa forma, as plantas maximizam o volume de solo explorado e, assim, melhoram a quantidade de P disponível pelo aumento efetivo da área da superfície radicular (Parentoni et al., 2011).

Em condições de deficiência de P existem várias modificações radiculares que podem ser induzidas, tais como o aumento na quantidade de pelos radiculares e de aerênquimas, esse último ao reduzir a taxa respiratória, consequentemente faz com que a demanda por P seja menor. Lynch & Brown (2001) observaram nessas mesmas condições uma elevação do crescimento das raízes no ângulo horizontal, na quantidade de raízes superficiais e laterais, na densidade e comprimento de pelos radiculares.

Muitas espécies, incluindo o arroz, são hábeis em formar associações simbióticas com fungos micorrízicos. Essas permitem as plantas um maior acesso ao P, uma vez que incrementam a exploração do solo por meio das hifas fúngicas. As plantas, também, podem alterar a microflora por meios exsudatos que são liberados pelas raízes, atraindo populações de microrganismos solubilizadores de P. Esses, por secretarem ácidos orgânicos e fosfatases, permitem solubilizar P de fontes menos solúveis, como fosfato de alumínio e rochas fosfáticas, elevando a absorção desse macronutriente (Pairunan et al., 1980; Bolan, 1991).

Outra mudança adaptativa é a capacidade das próprias plantas de secretarem substâncias químicas que agem na solubilização do P (Parentoni et al., 2011). Otani & Ae (1996), ao compararem diferentes culturas para absorção de P, verificaram que as espécies, em geral, variam sua capacidade de alterar o microambiente na rizosfera. A principal forma com que gramíneas absorvem P é baseada na alta taxa de crescimento radicular. Contrariamente, as leguminosas, como o amendoim e o feijão guandu, mantêm relativamente alta a absorção de P por meio da alta eficiência de absorção de P externo, possivelmente devido a sua maior capacidade de solubilização de P.

Um genótipo com maior eficiência na absorção de P devido à exsudação radicular, também, pode mostrar maior crescimento relativo da raiz, pois o adicional de P leva a um maior acúmulo de biomassa, o que inclui, também, a radicular. Ambos os fatores, o crescimento das raízes e eficiência de absorção de P, são, portanto, altamente interligados.

A complexidade dessa relação dificulta a identificação de um fator primário que cause inicialmente as diferenças genotípicas na absorção de P (Wissuwa et al., 2005).

Apesar dos diferentes mecanismos de tolerância à deficiência de P desenvolvidos pelas plantas, ainda se não se tem de forma clara a herança de características relacionadas a esse estresse abiótico. Essas informações, no entanto, são de grande importância para direcionar os programas de melhoramento.

Como muitas das características associadas a tolerância de P possuem natureza poligênica, o mapeamento de *Quantitative Trait Loci* (QTL) é importante, pois auxilia na compreensão genética dos mecanismos envolvidos no controle desse caráter (Alpuerto et al., 2008). Regiões genômicas associadas a tolerância à deficiência de P foram detectadas em milho (Mendes et al., 2014), feijão (Liao et al., 2004; Yan et al., 2004), soja (Li et al., 2005; Liang et al., 2010) e trigo (Su et al., 2006; Su et al., 2009). Em arroz já foram conduzidos diversos estudos objetivando o mapeamento de QTLs, nos quais foram utilizados diferentes tipos de população e caracteres associados ao P (Tabela 1).

Tabela 1. *Quantitative Trait Loci* (QTL) para caracteres relacionados com a absorção e uso de fósforo em arroz.

Caráter	População	Cruzamento	Nº de QTLs	Referência
AF, EUF, MSP, NP	NIL	Nipponbare/Kasalath	8	Wissuwa et al. (1998)
HRP, PSRP, PSRR	RIL	IR20/IR55178	4	Ni et al. (1998)
ARF, PSP	NIL	IR20/ IR55178-3B-9-3	3	Wu & Ni (2000)
AF, NP	NIL	Nipponbare/Kasalath	1	Wissuwa et al. (2002)
RE, CRF, PSP	F8	Gimbozu/Kasalath	6	Shimizu et al. (2004)
CRR, CRP, PSRP, PSRR	BIL	OM2395/AS996	1	Lang & Buu (2006)
ERD	CSSL	Nipponbare/Kasalath	1	Shimizu et al. (2008)
AP, CMR, PSR, PR, PSP, PST, RN, RP, VR	ILs	Yuefa/IRAT109	24	Li et al. (2009)
AF, BT, PG, PP	F3	NERICA10/Hitomebore	27	Koide et al. (2013)

AF: absorção de fósforo; ARF: absorção relativa de fósforo; AP: altura de planta; BIL: linhagem endogâmica retrocruzada; BT: biomassa total; CMR: comprimento máximo de raiz; CRF: conteúdo relativo de fósforo; CRP: comprimento relativo de parte aérea; CRR: comprimento relativo de raiz; ER: elongação da raiz; ERD: elongação da raiz na deficiência de fósforo; EUF: eficiência de uso do fósforo; HRP: habilidade relativa de perfilhamento; CSSL: linhagem com substituição de segmento cromossômico; MSP: matéria seca da planta; NIL: linhagem quase-isogênica; NP: número de perfilho, NR: número de raiz; PG: peso de grão; PP: peso da palhada; PR: peso de raiz; PSP: peso seco da parte aérea; PSR: Peso seco de raiz; PSRP: peso seco relativo da parte aérea; PSRR: peso seco relativo de raiz; PST: peso seco total; RIL: linhagem recombinante endogâmica; RP: razão peso de raiz/peso seco plântula; VR: volume de raiz. Adaptado de Vinod & Heuer (2014).

Dos vários QTLs mapeados a tolerância à deficiência de P em arroz, o mais promissor é o *Phosphorus Uptake 1* (*Pup1*), sendo o único até o momento que encontra-se disponível para a seleção assistida por marcadores moleculares. Essa região foi identificada no braço longo do cromossomo 12 do arroz utilizando-se linhagens quase-isogênicas derivadas do retrocruzamento da variedade *indica* Kasalath e o cultivar *japonica*

Nipponbare, sendo a primeira caracterizada como tolerante à deficiência de P, e a segunda, como suscetível. Em condições de campo com deficiência severa de P, a presença do QTL *Pup1* explicou cerca de 80% da variação fenotípica existente entre os genótipos na absorção de P (Wissuwa et al., 1998; Wissuwa et al., 2002). O principal gene desse QTL, denominando *Phosphorus-starvation tolerance 1 (PSTOL1)* é responsável por um maior incremento no crescimento radicular, principalmente nos estádios iniciais de desenvolvimento, permitindo que as plantas adquiram não somente mais P, como outros nutrientes (Gamuyao et al., 2012).

Em condições de deficiência de P no solo, tanto os efeitos aditivos (efeito *per se* dos genótipos devido à concentração de alelos favoráveis) como os não aditivos (dominância e epistasia) costumam ser importantes, e podem variar conforme a espécie e o caráter analisado. Em milho, muitos autores relatam que os efeitos de dominância são mais importantes que os aditivos para explicar as variações no uso e eficiência de P, ressaltando que a seleção deve ser realizada em combinações híbridas (Fritsche-Neto et al., 2010; Do Vale & Fritsche-Neto, 2013; Mendes et al., 2014). Outros ainda, de modo contrário, verificaram que a ação aditiva dos genes é predominante, quando foram considerados QTLs referentes ao peso seco de raiz e caule (Reiter et al., 1991). Considerando diversos critérios de tolerância em plântulas de soja, Zhang et al. (2009) observaram a predominância do efeito aditivo, sendo detectados, também, efeitos epistáticos, porém, sem relevância. No tomate, Coltman et al. (1987) reportam que efeitos não aditivos foram os mais importantes que os aditivos na expressão da tolerância à deficiência de P.

Para serem avaliados os tipos de efeito gênico que o arroz expressa em condições de baixa disponibilidade de P, Majumder et al. (1989) realizaram cruzamentos dialélicos com avaliação dos componentes de produção de grãos, peso de seco de raízes e parte aérea nas progênies. Foi observado que a heterose foi elevada, sendo esse um indicativo de que os efeitos não-aditivos foram os mais importantes para os caracteres avaliados na condição de estresse. De modo semelhante, foi analisado por Chaubey et al. (1994) o efeito da capacidade geral de combinação em cruzamentos dialélicos de cultivares de arroz, contudo, considerando a capacidade de perfilhamento em condições de deficiência de P. Verificou-se que os efeitos aditivos e não aditivos são importantes, mas os pelo fato dos genótipos tolerantes a esse estresse apresentaram maior capacidade geral de combinação, há um indicativo de que a maioria dos genes possuem efeito aditivo. Também, o efeito do QTL *Pup1*, já anteriormente mencionado, é principalmente devido a ação gênica aditiva, sendo os

demais tipos de efeito pouco expressivos na variação fenotípica controlada por essa região genômica (Wissuwa et al., 2002).

Vale ressaltar que a tolerância à deficiência de P, também, pode estar relacionada com outros diferentes estresses abióticos, principalmente a tolerância a toxicidade por alumínio (Al) e ao estresse hídrico. Normalmente observa-se que essas associações são positivas, pois muitas características morfo-fisiológicas de tolerância são comuns a vários estresses abióticos. Du et al. (2009) verificaram que em *Stylosanthes* os mecanismos fisiológicos de adaptação ao baixo nível de P, também, envolvem a habilidade dessa espécie em tolerar os altos níveis de Al. Em soja, Liao et al. (2006) observaram que as plantas que exudaram ácidos orgânicos para tornar disponíveis determinadas formas de P fizeram com que, ao mesmo tempo, Al tóxico fosse tratado, promovendo, também, a tolerância para esse elemento. Beebe et al. (2008) verificaram que as linhagens de feijão com tolerância à seca foram as que apresentaram desempenho produtivo superior nas condições em que o P era limitado. Chin et al., 2010 observaram que cerca de 80% de acessos de arroz que possuíam tolerância à deficiência hídrica apresentaram a presença do QTL *Pup1*, o qual confere a tolerância à deficiência de P.

Os trabalhos dispostos na literatura ainda são incipientes sobre a associação entre tolerância à deficiência de P com outros estresses abióticos. No entanto, a possibilidade de ocorrência desse tipo de relação positiva no arroz de terras altas é extremamente relevante. O desenvolvimento de plantas tolerantes às múltiplas condições adversas pode ser uma alternativa para amenizar os fatores limitantes dos solos do cerrado e, assim, promover a expansão da orizicultura nessa região.

2.4 MELHORAMENTO GENÉTICO VISANDO A TOLERÂNCIA À DEFICIÊNCIA DE FÓSFORO

A seleção de genótipos com maior eficiência na absorção e uso de P é considerada uma das estratégias mais viáveis para promover a sustentabilidade da orizicultura nas regiões que apresentam deficiência desse macronutriente (Wissuwa et al., 2002; Ismail et al., 2007; Heuer et al., 2009). Nesse sentido, estudos com o objetivo de avaliar e indentificar genótipos que possuam esse caráter é considerada uma etapa primordial para o melhoramento genético.

A classificação de um genótipo como tolerante à deficiência de P pode variar

conforme os critérios adotados. Existem várias definições descritas na literatura para esse termo, as quais variam conforme as concepções de cada autor. Mas, geralmente, estas são consideradas em termos de eficiência e resposta à aplicação, ou ainda eficiências de absorção e utilização. Uma delas é a proposta por Coltman e Kuo (1991) que considera genótipos tolerantes à deficiência de P como os que reduzem de forma insignificante seu crescimento em condições de restrição desse macronutriente. O termo eficiência em P deveria ser utilizado para descrever os diferentes mecanismos morfológicos ou fisiológicos que contribuem para a tolerância.

Segundo os mesmos autores, a mensuração da eficiência em P pode ser realizada em termos de absorção de P (total ou em unidade por raiz) ou de utilização desse elemento (conteúdo total de P ou peso seco por quantidade absorvida). Considerando um estudo mais detalhado, a eficiência pode ser avaliada internamente na planta, por exemplo, por meio de medidas de translocação de P ou utilização em um mecanismo fisiológico interno, como a fotossíntese.

Batten et al. (1984) definem tolerância em termos de eficiência e resposta ao P, classificando como genótipos eficientes os capazes de produzir mais com doses menores das que comumente são utilizadas na cultura. E, de modo contrário, genótipos responsivos são os que com doses maiores são capazes de alcançar uma produtividade superior em comparação com os demais.

Como o arroz de terras altas é cultivado em ampla gama de ambientes, incluindo vários níveis tecnológicos, os programas de melhoramento buscam desenvolver cultivares que atendam a todas essas condições. Nesse sentido, na seleção para tolerância à deficiência de P, deve ser considerada não só o desempenho dos genótipos em condições de restrição desse elemento, mas, também, nas situações em que o nível é adequado, permitindo identificar genótipos que sejam superiores em ambos os ambientes. Por isso, índices que consideram a eficiência e resposta ao P facilitam a seleção de genótipos por esses dois atributos de forma simultânea. No entanto, ainda são poucos os trabalhos descritos para o caso da tolerância à deficiência de P, em geral, adaptados para essa situação, como o índice de tolerância de Fischer & Maurer (1987) e a média harmônica de performance relativa (Resende, 2007).

A avaliação da tolerância à deficiência de P tem demonstrado que existe variabilidade genética para caracteres relacionados a deficiência de P em diferentes espécies, incluindo o milho (Fidelis et al., 2010), trigo (Ozturg et. al., 2005), soja (Reina et al., 2014)

e sorgo (Rodrigues et al., 2014). Esses resultados, também, vêm sendo observados para o arroz de terras altas em estudos com cultivares (Cancelier et al., 2010; Rotili et al., 2010; Tonello et al., 2012) linhagens avançadas (Fageria et al., 2013; Fageria et al., 2014), linhagens oriundas de bancos de germoplasma (Guimarães et al., 2007) e variedades locais ou silvestres (Wissuwa & Ae, 2001a). A presença de variabilidade genética associada a tolerância aos baixos níveis de P é fundamental para o melhoramento genético, sendo um indicativo do potencial disponível para serem desenvolvidos genótipos eficientes e responsivos para esse macronutriente.

Avaliações em experimentos com deficiência de P no solo são comumente descritas na literatura como um modo de expor as diferenças genéticas em relação a tolerância à deficiência de P (Wissuwa & Ae, 2001b). Nesse processo, um fator primordial é a caracterização dos sítios de fenotipagem, pois a disponibilidade do nutriente no solo é a pressão de seleção chave que determina a eficiência de seleção. Os locais de avaliação devem ser os mais representativos possíveis das áreas agrícolas para as quais os materiais genéticos se destinam. Parentoni et al. (2011) sugerem que a intensidade do estresse deve ser suficiente para reduzir de 40% a 60% do potencial produtivo, considerando o ambiente sem estresse como referência. Entretanto, o estresse não deve ser drástico ocasionando perdas de plantas ou valores de produtividade próximos à zero, pois nesse caso fica comprometida a identificação de genótipos superiores.

Segundo Fageria et al. (1988a), antes de se proceder estudos de estresses minerais algumas considerações devem ser levadas em conta para uma fenotipagem adequada, tais como: (1) uniformidade do nutriente em estudo no solo; (2) condições edafoclimáticas uniformes; (3) parâmetros bem definidos de avaliação, sejam eles morfológicos, fisiológicos ou bioquímicos; (4) utilização de técnicas de fenotipagem, se possível, mais simples e que permitam procedê-las em um grande número de materiais; (5) sítios de avaliação apropriados, por exemplo, com níveis baixos de determinado nutriente se o objetivo for determinar a tolerância para esse estresse; (6) conhecimento, a priori, dos níveis mínimo e máximo do nutriente em estudo; (7) inclusão de controles positivos e negativos nos ensaios; e (8) fornecimento da quantidade adequada de nutrientes que não serão avaliados.

Embora os experimentos a campo sejam considerados os mais efetivos para a seleção de genótipos superiores em relação a tolerância ao baixo nível de P, alguns fatores, também, podem interferir nesse processo. Nessas condições podem ocorrer outros estresses,

como toxidez por alumínio e salinidade, que restringem o crescimento radicular e podem interferir, portanto, na fenotipagem (Ismail et al., 2007; Chin et al., 2011). Assim, pode ser que a variação genotípica em resposta ao baixo nível de P seja, na verdade, atribuída a diferenças relacionadas com outros estresses abióticos.

Uma outra complicação é que a deficiência do P tende a ser heterogênea nas parcelas a campo, resultando em erros ambientais que mascaram os efeitos genéticos e, como resultado, a herdabilidade realizada pode ser baixa (Rose et al., 2013). Por isso, para promover ganhos com a seleção, é indicado que se faça avaliações extensivas nos ambientes alvo (Wissuwa et al., 2009). Deve-se ainda buscar reduzir todas as formas de variação ambientais que possam interferir no processo de fenotipagem, tendo em vista mesmo que pequenas as variações ambientais podem ter grande efeito na determinação da tolerância à deficiência de P (Parentoni, 2001).

Dadas as dificuldades da fenotipagem em campo, tem-se buscado desenvolver novas técnicas que permitam a avaliação de genótipos em larga escala, de forma simples e econômica. Na literatura, vem sendo reportada a avaliação da tolerância à deficiência de P em solução hidropônica, com concentrações de P variando entre 3 μM (Wissuwa et al., 2005) a 15 μM (Ni et al., 1998), meio de cultura (Sant'Ana et al., 2003) e vasos em casa de vegetação (Fageria & Baligar, 1997). Contudo, principalmente no que tange as avaliações em solução hidropônica e meio de cultura, os dados obtidos por esses métodos podem apresentar baixa correlação com resultados obtidos em condições de campo (Parentoni et al., 2011). Isso porque, alguns dos principais mecanismos de tolerância, como a modificação da rizosfera das raízes da planta, não pode ser avaliada por essas técnicas (Ismail et al., 2007).

A avaliação fenotípica é muitas vezes considerada um processo difícil e demorado, e por ser muito propensa a efeitos ambientais, pode influenciar na classificação dos genótipos quanto a tolerância à deficiência de P. Essas desvantagens da seleção convencional podem ser superadas por outras abordagens mais modernas, como a seleção assistida por marcadores ligados aos locos que controlam o caráter de interesse (Collard & Mackill, 2008). Essa técnica é particularmente importante para características poligênicas e de baixa herdabilidade, como a tolerância à deficiência de P. Genótipos que não possuam o genótipo marcador podem ser eliminados antes de passarem por uma extensa avaliação a campo, reduzindo custos e tempo. Por isso, grandes esforços vêm sendo concentrados no mapeamento de QTLs e identificação de genes, com o intuito de se identificarem marcadores moleculares associados às características de interesse.

Para a seleção assistida da tolerância à deficiência de P em arroz, encontra-se disponível um conjunto de marcadores associados ao QTL *Pup1*, o de maior efeito para esse caráter que já foi mapeado até o momento (Chin et al., 2011). Alguns trabalhos relatados na literatura tem demonstrado tentativas de validar esses marcadores em diferentes ambientes e *backgrounds* genéticos e, em sua maioria, as expectativas tem sido atingidas (Kotterachchi & Wijesekara, 2013; Sarkar et al., 2011; Tyagi et al., 2012).

Apesar do progresso no desenvolvimento de ferramentas biotecnológicas e a identificação de regiões genômicas associadas com a tolerância à deficiência de P, ainda faltam arranjos efetivos e integrados dessas informações com os programas de melhoramento genético. Ainda são poucos os casos de genótipos desenvolvidos para esse caráter nos quais foram utilizados esses tipos de recursos (Gamuyao et al., 2012; Wissuwa & Ae, 2001a). Mesmo que seja um modo muitas vezes dificultoso, a fenotipagem em ambientes com níveis contrastantes de P ainda deverá continuar sendo adotada como um procedimento para desenvolver os futuros genótipos superiores (Rose et al., 2013).

Genótipos tolerantes à deficiência de P e que apresentem-se completos ao considerar o conjunto de caracteres de interesse agrônômico, em geral, são muito difíceis de serem encontrados. Tal fato pode ser comprovado pela variedade Kasalath, que mesmo possuindo alta absorção de P por ser portador dos alelos favoráveis do QTL *Pup1*, ainda tem seu cultivo restrito, por ser pouco melhorada geneticamente (Wissuwa & Ae, 2001a).

Em um estudo que comparou variedades tradicionais e modernas de arroz, tanto *japonica* como *indica*, oriundas de diversas regiões do mundo, foi observado que as variedades tradicionais eram mais eficientes na absorção de P do que as variedades modernas de arroz (Wissuwa & Ae, 2001a). Ou seja, apesar da variabilidade genética disponível, essa ainda não vem sendo plenamente aproveitada durante o desenvolvimento de cultivares de arroz. Um dos motivos é que em muitos programas de melhoramento o germoplasma disponível não foi caracterizado quanto a tolerância à deficiência de P e, muitas vezes, os procedimentos utilizados para a avaliação desse caráter são pouco efetivos. Esse fato demonstra que esforços ainda maiores devem ser concentrados visando avaliar e utilizar variabilidade genética para tolerância à deficiência de P, levando sempre em consideração uma fenotipagem em condições adequadas para esse caráter (Parentoni et al., 2011).

Manejar todo o germoplasma que se tem disponível é difícil e requer muitos recursos, por isso, tem-se optado por trabalhar apenas uma parte desse. Uma das estratégias que tem sido comumente adotadas nos programas de melhoramento para estresse abióticos

constitui-se no desenvolvimento de populações base, geralmente melhoradas pelo método de seleção recorrente, consideradas geralmente como ações relacionadas com o pré-melhoramento genético (Nass & Paterniani, 2000; Santos et al., 2003).

2.5 SELEÇÃO RECORRENTE: MÉTODO ALTERNATIVO DE MELHORAMENTO PARA ESTRESSES ABIÓTICOS

Os métodos tradicionais de melhoramento genético de arroz baseiam-se, em geral, na hibridação entre dois ou poucos indivíduos e na condução das gerações segregantes por autofecundação. Nesse processo, a endogamia é maximizada e, ao se atingir um nível desejado, procede-se a seleção das melhores linhagens. No entanto, as chances de recombinação durante as sucessivas gerações são reduzidas, já que com os alelos de determinado loco se tornando idênticos, o *crossing-over* passa a ser pouco efetivo na geração de novos recombinantes. Com a redução da variabilidade, os ganhos genéticos com a seleção passam a ser menores (Rangel et al., 1998).

Considerando essas dificuldades, uma das alternativas é sintetizar populações com uma ampla base genética e conduzi-las por seleção recorrente. Essa é uma técnica que permite o aumento da frequência de alelos favoráveis por meio dos sucessivos ciclos de intercruzamentos e seleção, aumentando-se as chances de recombinação, e consequentemente, ganhos com seleção (Cargnin, 2007; Moraes et al., 2008).

A seleção recorrente pode ser intrapopulacional, quando o objetivo é melhorar a uma população *per se*, ou ainda interpupulacional, se o objetivo é melhorar duas populações simultaneamente buscando-se elevar a heterose entre elas. Este é predominantemente utilizado em espécies alógamas, sendo seu emprego em autógamias limitado devido à necessidade de cruzamentos recombinação. Porém, com a descoberta da macho-esterilidade genética em arroz, viabilizou-se o uso da seleção recorrente nessa espécie. Nesse sentido, ao introduzir esse caráter em uma população, pode-se proceder a recombinação de forma simples e econômica, já que as sementes colhidas nas plantas macho-estéreis são oriundas do cruzamento com as macho-férteis da população (Rangel & Neves, 1995; Sing & Ikehashi, 1981; Geraldi, 1997).

Cada ciclo de seleção recorrente envolve basicamente três fases: obtenção das progênes, seleção e recombinação. O primeiro passo constitui-se na escolha dos genitores que darão origem à população base. Normalmente, são selecionados indivíduos que possuem

o melhor desempenho para os atributos que se deseja melhorar. Vale ressaltar que o número de genitores é outro aspecto importante para estabelecer um programa de seleção recorrente. Se utilizado um número demasiado, a probabilidade de encontrar genótipos com boa expressão do caráter é baixa. Isso porque a média da população pode ser reduzida, exigindo mais ciclos de seleção para concentrar os alelos favoráveis a um nível razoável. Caso contrário, se forem utilizados poucos genitores, a chance de um único genótipo apresentar a maioria dos alelos referentes a um caráter é baixa, principalmente para características poligênicas. Em geral, considera-se de 10 a 20 como um número satisfatório (Cargnin, 2007; Ramalho et al., 2012a).

Pode-se proceder a seleção recorrente de duas formas quanto ao método de seleção: no âmbito de indivíduos ou de progênies. No primeiro caso não se utiliza como critério de seleção nenhuma informação genética, o enfoque principal é selecionar os melhores fenótipos para que possam compor o próximo ciclo de seleção. Porém, a forma mais eficiente de seleção é a baseada em progênies, a qual permite avaliar o valor genotípico pelo desempenho médio dos descendentes. Assim, tem-se uma melhor estimativa do valor genotípico o que faz com que essa técnica seja mais adequada, principalmente, para caracteres de baixa herdabilidade. No final do processo de seleção recorrente, as melhores progênies são recombinadas para dar origem a um novo ciclo de seleção (Rangel & Neves, 1995).

Em diversas culturas tem-se observado a utilização da seleção recorrente visando principalmente a extração de linhagens com alto potencial produtivo e bons atributos agronômicos (Ramalho et al., 2005; Rangel et al., 1998; Reis et al., 2009). Alguns trabalhos descritos na literatura têm demonstrado que esse é um método que tem sido eficiente em gerar progresso genético para diversas características associadas a tolerância aos estresses abióticos (Tabela 2). Contudo, verifica-se que ainda é pouco explorada no melhoramento genético para a tolerância à deficiência de P (Fritsche-Neto et al., 2012).

Considerando a natureza poligênica das características associadas com a tolerância aos estresses abióticos (Mendes et al., 2014; Wissuwa & Ae, 2001a; Zhang et al., 2009), a probabilidade de encontrar nas populações segregantes indivíduos que apresentem todos os alelos favoráveis para determinado caráter é extremamente rara. Nesse contexto, a seleção recorrente apresenta grande potencial de utilização, pois, com o aumento da frequência de alelos favoráveis e os sucessivos ciclos de recombinação, eleva-se a probabilidade de transgressivos serem gerados por meio das novas combinações (Cargnin,

2007).

Tabela 2. Estimativas do progresso genético com a seleção recorrente para a tolerância aos diferentes estresses abióticos.

Espécie	Estresse abiótico	Caráter	US	NC	PC	Unidade	Referência
Batata	Alta temperatura	PT	Clone	3	37,8	%	Benites & Pinto (2011)
Batata	Alta temperatura	PT	Clone	1	27,0	%	Gautney & Haynes (1983)
Milho	Acidez do solo	PG	FMI	16	8,10	%	Cranatos et al. (1993)
Milho	Baixa temperatura	G%	S1	5	2,1	%	Hoard & Crosbie (1985)
Milho	Baixa temperatura	G%	FIC	3	16,4	%	Landi et al. (1992)
Milho	Deficiência de N	PG	FIC	6	2,1	%	Sallah et al. (1998)
Milho	Deficiência de N	PG	FMI	5	9,66	g planta ⁻¹	Santos et al. (2003)
Milho	Deficiência de N	PG	FMI	1	21,0	%	Heinz et al. (2012)
Milho	Restrição hídrica	PG	FIC	8	108,0	kg ha ⁻¹	Bolños & Edmeades (1992)
Milho	Restrição hídrica	PG	S1	5	12,6	%	Chapman & Edmeades (1999)

FIC: família de irmãos completos; FMI: família de meios-irmãos; G%: percentagem de germinação; PG: produção de grãos; PC: progresso genético por ciclo de seleção PT: produção de tubérculos; N: nitrogênio; NC: número de ciclos de seleção recorrente; US: unidade de seleção.

Existe uma vasta quantidade de mecanismos de adaptação que as plantas podem desenvolver em relação a determinado estresse abiótico (Vance et al., 2003). A seleção recorrente, em comparação aos demais métodos de melhoramento, apresenta a vantagem de utilizar um maior número de genitores (Geraldi, 1997), podendo ser incluídos indivíduos com diversos mecanismos de tolerância. Por exemplo, no caso da tolerância à deficiência de P, poderiam ser utilizados na população parental fontes de eficiência na absorção e de eficiência de utilização interna. Nesse sentido, em determinado genótipo poderiam estar concentrados os alelos referentes a ambos os mecanismos, o que poderia incrementar a tolerância para esse caráter.

Outra vantagem da utilização da seleção recorrente é a possibilidade incorporar novos genitores em cada ciclo de recombinação. Como as populações base para estresses abióticos são sintetizadas com objetivos a longo prazo, tem-se a oportunidade de melhorá-las pela incorporação de novos alelos favoráveis, os quais muitas vezes são reduzidos ao longo dos ciclos de seleção. De modo paralelo, progênies podem ser extraídas a qualquer momento e serem conduzidas por outros métodos visando a extração de linhagens (Cargnin, 2007; Geraldi, 1997). Por esses motivos, a seleção recorrente é considerada um método dinâmico, sendo condizente com o melhoramento para tolerância aos estresses abióticos.

A seleção recorrente baseada na avaliação de progênies é a mais comumente adotada para o melhoramento de estresses abióticos, principalmente em razão das características associadas a tolerância aos estresses abióticos serem altamente influenciadas

pelo ambiente (Chapman & Edmeades, 1999; Santos et al., 2003). Nesse método, as progênies são avaliadas em experimentos com repetições, reduzindo o erro experimental, o qual tende ser mais pronunciado em estresses abióticos (Parentoni et al., 2011). Essas podem ainda ser conduzidas em mais de um local, permitindo que seja estimada a interação de genótipos por ambientes. Considerando a ampla gama de ambientes em que o arroz é cultivado, essa estimativa possui relevância, pois segundo Parentoni (2001), muitas vezes esse é o único critério utilizado para a estabilidade de produção. Nesse contexto, o genótipo ideal seria o com nível mínimo de interação genótipo por ambiente, alta produção e com melhor desempenho em todas/na maioria das situações.

Vários estudos reportados na literatura demonstram que seleção recorrente tem sido efetiva no sentido de promover a variabilidade genética (Bresseghele et al., 2009; Cordeiro & Rangel, 2011; Heinz et al., 2012). Os estresses abióticos por sua vez tendem a restringir a amplitude da expressão da variação fenotípica da média de caracteres avaliados para esse atributo, como por exemplo, a produção de grãos, promovendo a redução de estimativas de variância genética e herdabilidade (Santos et al., 2003). Por isso, métodos de melhoramento que não restrinjam a variabilidade genética são importantes no melhoramento para estresses abióticos, pois facilitam o processo de seleção de progênies e permitem ganhos genéticos com a seleção desse caráter.

Uma das vantagens da seleção recorrente é permitir a verificação se a seleção praticada para determinado estresse está sendo eficiente ou necessita ser aprimorada (Vencovsky, 1987). Baixas estimativas de progresso genético podem ser um indício de que o controle das variações ambientais nos sítios de fenotipagem pode estar sendo pouco efetivo, reduzindo a precisão de estimativas relacionadas com a tolerância. O conhecimento do progresso genético auxilia, também, no planejamento dos ciclos de seleção, como por exemplo, na determinação da unidade de recombinação e a proporção de indivíduos que deverão ser escolhidos para compor a nova geração. Nesse sentido pode-se tanto acelerar ou reduzir a alteração da média dos caracteres de interesse na população que está sendo conduzida por seleção recorrente. Deve-se ressaltar que uma pressão de seleção mais branda deve ser aplicada quando o objetivo da seleção for a médio-longo prazo, para que não produza uma redução drástica na variabilidade pela deriva genética, afetando o progresso genético (Geraldi, 1997; Ramalho et al., 2012a).

As principais fontes de tolerância para estresses abióticos ainda são as variedades tradicionais que, combinadas com os bons atributos de variedades modernas, constitui uma

excelente oportunidade de gerar transgressivos para essas situações (Wissuwa & Ae, 2001a). Por isso, o foco principal da seleção recorrente nesse caso deve ser de promover o melhoramento genético nas populações base, identificando fontes de alelos favoráveis para a tolerância, visando a extração de linhagens para serem lançadas como cultivares ou como genitoras em populações elite (Rangel & Neves, 1995).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL GENÉTICO

Para realização deste trabalho foram utilizados os dados da população CNA9 do programa de seleção recorrente de arroz de terras altas, conduzida desde 1992 pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Arroz e Feijão. Essa população foi sintetizada no ano agrícola 1992/93, a partir da incorporação, na população CNA-IRAT 5/2/1, de alelos provenientes de 22 genitores anteriormente caracterizados como fontes de tolerância à deficiência hídrica, tolerância à deficiência de fósforo no solo e resistência a brusone (*Magnaporthe grisea*), conforme apresentado na Tabela 3. A população CNA-IRAT 5 provém da parceria entre a Embrapa Arroz e Feijão e o IRAT (*Institut de Recherches Agronomiques Tropicales des Cultures Vivrières*), na França, atualmente denominado por CIRAD (*Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement*), tendo sido sintetizada em 1984 pelo intercruzamento de 26 linhagens da subespécie *japônica* e uma *indica*. Essa última, oriunda de mutação da IR 36 (Sing & Ikehashi, 1981), foi utilizada para permitir a recombinação a campo, uma vez que possui o gene recessivo que condiciona a macho esterilidade genética (Fujimaki, 1979).

A CNA9 é uma população de arroz de terras altas ainda pouco melhorada comparativamente as demais sintetizadas pela Embrapa Arroz e Feijão, visto que durante 11 anos permaneceu sem que houvesse qualquer ação de seleção. Inicialmente essa população foi submetida a dois ciclos sucessivos de seleção massal em geração S_0 , seguida por uma recombinação com uso de macho esterilidade genética, em casa de vegetação. Esses dois ciclos ocorreram em 1993/94 e 1994/95, visando uniformizar o ciclo de maturação e eliminar genótipos com altura de planta excessiva (Tabela 4). Após a recombinação da população em 1995, as sementes S_0 das plantas macho estéreis ($\frac{1}{4}$ das plantas com genótipo *msms*), foram armazenadas em condições controladas, compondo a população CNA9/2/1, em que a identificação "2" refere-se ao segundo ciclo de seleção e "1" à recombinação única após o último ciclo de seleção.

Tabela 3 Composição da população CNA9 de seleção recorrente sintetizada pela Embrapa Arroz e Feijão.

Genitores	Origem	Participação (%)
CNA 4164	IAC 47/IRAT 13	0,70
CNA 4166	IAC 25/63-83	0,31
CNA 4180	IAC 47/IRAT 13	0,70
IRAT 237	RS 25/IAC 25	2,00
IR 5516-18-1	-	2,80
CNA 5164	IAC 25/63-83	0,31
CNA 5165	IAC 25/63-83	0,31
CNA 5166	IAC 25/63-83	0,31
L 80-67	Linhagens do IAPAR	2,80
CNAx 511-16-B-5	IAC 47/IRAT 13	0,70
CNAx 093-BM 30-BM 29 P-2	IAC 25/63-83	0,31
CNAx 095-BM 30-BM 9-4	IAC 25/63-83	0,31
IR 3646-8-1-2	-	2,80
CNAx 095-BM 30-BMP-28	IAC 25/63-83	0,31
CNA 4136	IAC 25/63-83	0,31
IRAT 144	IRAT 13/IRAT 10	2,80
Cuiabana	IAC 47/SR 2041-50-1	2,80
Fernandes	Cultivar tradicional-Brasil	2,80
CNA 4122	IAC 25/63-83	0,31
Rio Paraguaí	IAC 47/63-83	0,73
IAC 25 [†]	IAC 1246/Dourado Precoce	5,60
IRAT 112 R [‡]	IRAT 13/Dourado Precoce	5,60
CNA-IRAT 5/2/1	População	64,38

[†] Mistura de linhagens resistentes a brusone (*Magnaporthe grisea*), com genes das linhagens BG90-2, Três Marias, Pusur, Dawn, Basmati 370, H-5, Colombia 1 e Ramtulasi; e

[‡] Mistura de linhagens resistentes a brusone (*Magnaporthe grisea*), com genes das linhagens T-23, CTG 1516, C 46-15, Carreon e Tetep.

Tabela 4 Cronograma da utilização da população CNA9 de seleção recorrente sintetizada pela Embrapa Arroz e Feijão.

Ano agrícola	População/Ciclo	Atividade [†]
1992/93	CNA9/0/0	Síntese da população
1993/94	CNA9/0/0 CNA9/1/1	S ₀ Rec
1994/95	CNA9/1/1 CNA9/2/1	S ₀ Rec
⋮	⋮	⋮
2006/07	CNA9/2/1	S ₀
2007/08	CNA9/2/1	S _{0:1}
2008/09	CNA9/2/1	S _{0:2}
2009/10	CNA9/3/1	Rec
2010/11	CNA9/3/1	S ₀ S _{0:1}
2011/12	CNA9/3/1	S _{0:2} *

[†] S₀ | Rec: Seleção de plantas S₀ no campo, em novembro, e recombinação em casa de vegetação, em maio, com sementes S_{0:1}, em Santo Antônio de Goiás/GO (Embrapa Arroz e Feijão - CNPAF); S₀: Seleção de plantas S₀ em campo, em CNPAF; S_{0:1}: Seleção de progênies S_{0:1} em campo, em CNPAF; S₀ | S_{0:1}: Seleção de plantas S₀ no campo, em CNPAF, em novembro; e avanço e seleção de progênies S_{0:1} em campo, em agosto, para aceitação fenotípica e tolerância à deficiência hídrica, em Porangatu/GO; S_{0:2}: Seleção de progênies S_{0:2} com avaliação em diferentes locais; e S_{0:2}*: Seleção de progênies S_{0:2} com avaliação em diferentes locais, para produtividade e tolerância à deficiência de fósforo no solo.

No ano agrícola 2006/07, foi retomado o uso dessa população dentro do

programa de seleção recorrente da Embrapa, buscando obter os primeiros ganhos em produtividade. A partir de então, a população passou por dois ciclos de seleção, sendo cada ciclo conduzido em três anos, com as seguintes etapas: (1º ano) seleção de plantas individuais dentro da população na geração S_0 ; (2º ano) avanço e seleção das melhores progênes $S_{0:1}$ (colhido em *bulk*) e seleção de cinco panículas (sementes $S_{1:2}$) dentro de cada progênie $S_{0:1}$ selecionada, para serem utilizadas como unidade de recombinação; (3º ano) avaliação e seleção de progênes $S_{0:2}$ em ensaios de rendimento em diferentes locais e a recombinação em campo das progênes selecionadas, com uso da macho esterilidade genética presente em $\frac{1}{6}$ das sementes $S_{1:2}$ (Figura 1). A seleção de plantas individuais teve como objetivo a aceitação fenotípica em campo, a qual envolveu principalmente a arquitetura de planta, a reação às doenças e as dimensões do grão. A seleção de progênes $S_{0:1}$ teve como enfoque os caracteres de maior herdabilidade, sendo esses, altura de plantas, dias para o florescimento, resistência ao acamamento, resistência a doenças (principalmente brusone - *Magnaphorte grisea*) e qualidade de grãos. Enquanto, a seleção de progênes $S_{0:2}$, por meio de ensaios de rendimento em diferentes locais, priorizou a seleção para o caráter produção de grãos.

Em 2008/09, foram avaliadas 194 progênes $S_{0:2}$ para produtividade, em diferentes locais, tendo sido selecionadas as 50 mais promissoras para recombinação e síntese da população CNA9/3/1. Nesse último ciclo, tendo em vista a composição da base genética dessa população, o programa de seleção recorrente da Embrapa propôs investir no melhoramento genético da mesma com principal enfoque em tolerância à deficiência de fósforo no solo e tolerância à deficiência hídrica, uma vez considerada a importância desses temas no contexto mundial, reflexo da projetada escassez desses recursos.

Em 2011, foram avançadas e avaliadas 600 progênes $S_{0:1}$ para aceitação fenotípica e tolerância à deficiência hídrica, em condições de campo, durante o período de baixa precipitação pluviométrica, entre os meses abril e setembro, por meio de dois ensaios sob diferentes condições de disponibilidade de água no solo. Esses ensaios foram conduzidos no Sítio de Fenotipagem para Tolerância à Seca, na Estação Experimental da SEAGRO, em Porangatu/GO, sob duas condições hídricas diferentes, ou seja, um sob a presença de déficit hídrico e outro, sob condições adequadas de suprimento de água. O controle do turno de irrigação foi ajustado conforme a evapotranspiração da cultura e auxílio de tensiômetros. A deficiência hídrica foi caracterizada a partir do 45º dia após a emergência das plântulas por meio da discriminação de 50% da lâmina de água aplicada em relação ao ambiente sem

estresse abiótico. Assim, foram selecionadas 189 progêneses $S_{0:1}$ com maior potencial produtivo e de tolerância à deficiência hídrica para comporem os ensaios de progêneses $S_{0:2}$ para produtividade e tolerância a deficiência de fósforo no solo, do ano agrícola 2011/12.

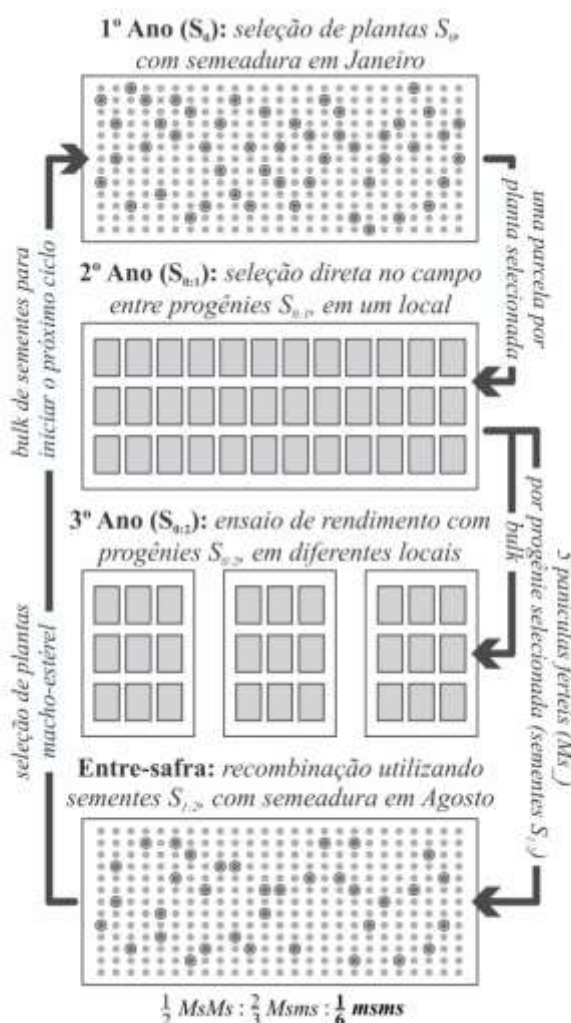


Figura 1 Esquema ilustrativo das etapas que envolvem cada ciclo da seleção recorrente realizado pela Embrapa Arroz e Feijão, com a população CNA9.

3.2 DADOS EXPERIMENTAIS

O presente estudo foi realizado com o conjunto de dados proveniente de ensaios de produtividade com progêneses $S_{0:2}$ da população CNA9/3/1, para tolerância a deficiência de fósforo no solo, conduzidos no ano agrícola de 2011/12, em dois locais: (1) Santo Antônio de Goiás, Goiás (Lat. 16°40'48'' S e Long. 9°15'18'' O), na Fazenda Capivara da Embrapa Arroz e Feijão; e (2) Sinop, Mato Grosso (Lat. 11°52'23'' S e Long. 55°29'53'' O), na área experimental da Empresa Matogrossense de Pesquisa, Assistência e Extensão Rural do

Estado do Mato Grosso - Empaer/MT.

Os ensaios foram compostos por 196 tratamentos, sendo 189 progênies $S_{0:2}$ da população CNA9/3/1, oriundas do *bulk* dentro de progênies $S_{0:1}$, mais sete cultivares como testemunhas (BRS Esmeralda, BRS Bonança, BRS Monarca, BRS Pepita, BRS Primavera, BRS Sertaneja e BRSGO Serra Dourada). O delineamento experimental adotado foi o látice quadrado simples 14 x 14, duplicado para os dois locais, isto é, 2 repetições por local. As parcelas foram constituídas por 4 linhas de 3 m de comprimento, com espaçamento entre linhas de 0,30 m, utilizando-se a densidade de sessenta sementes por metro. A área útil foi determinada pelas duas linhas centrais de cada parcela com descarte de 0,5 m das extremidades e das linhas laterais (efeito de bordadura).

Foram avaliados os seguintes caracteres: (i) produção de grãos (PG): peso de grãos colhidos na área útil da parcela e transformados em kg ha^{-1} ; (ii) altura de planta (AP): média de três medições, em centímetros, da distância entre a base da planta até a extremidade da panícula, no estágio de maturidade completa; e (iii) dias para o florescimento (DF): número de dias transcorridos da data efetiva de plantio à data da floração plena, em que 50% das plantas estão floridas. Foi considerada como data efetiva do plantio quando as sementes foram umedecidas pela primeira vez.

A época de plantio dos ensaios ocorreu no período de maior precipitação pluviométrica, entre os meses de novembro e dezembro. O controle de plantas daninhas foi feito por meio de capinas manuais ou uso de herbicidas. O controle de insetos-pragas foi realizado na maioria dos ensaios pelo uso de inseticidas aplicados no sulco de plantio e pulverizações posteriores, quando necessárias. E, o controle químico de doenças fúngicas, principalmente para brusone, foi realizado preventivamente com pulverizações de fungicidas. As adubações foram realizadas de forma discriminada conforme descrição dos ensaios de avaliação para tolerância à deficiência de fósforo no solo.

3.2.1 Caracterização dos sítios de fenotipagem

Os sítios de fenotipagem foram caracterizados quanto aos atributos físicos (análise granulométrica) e químicos para fins de fertilidade: pH em CaCl_2 ; Ca, Mg e K trocáveis; P disponível; H+Al, Al trocável; C orgânico e N total. As amostras de solo, da camada 0-20 cm de profundidade, foram secadas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm. Foram utilizados os métodos descritos em Embrapa (1997). A análise granulométrica foi

feita pelo método do densímetro. O P disponível foi extraído pelo extrator Mehlich-1, seguido da determinação por colorimetria em um espectrofotômetro a 660 nm, após reação com molibdato de amônio e cloreto de estrôncio; os elementos Ca, Mg e K foram extraídos com o extrator Mehlich-1. O K foi determinado por fotometria de chama de emissão; o Ca, Mg foram determinados por espectrometria de absorção atômica. O Al trocável foi determinado por titulometria, usando-se azul de bromotimol como indicador, após extração com KCl 1 mol.L⁻¹. A acidez potencial (H+Al) foi determinada por titulometria, após a extração com solução de acetato de cálcio 2 mol.L⁻¹ tamponado a pH 7,0. Os teores de C e N total foram determinados por combustão a seco em analisador automático e o C orgânico foi determinado pelo método Walkley-Black. Com esses resultados foram calculados os índices: Soma de Bases (Ca + Mg + K); CTC (Soma de Bases + H+Al); Saturação por Bases (Soma de Bases/CTC x 100); CTCe (Soma de Bases + Al) e Saturação por Al (Al trocável/CTCe x 100).

3.2.2 Avaliação para tolerância à deficiência de fósforo no solo

Em cada local foram conduzidos dois ensaios em condições contrastantes de disponibilidade de P no solo, em uma mesma área: teor baixo e teor adequado (alto) recomendado de acordo com a interpretação da análise do solo para as condições do cerrado (Souza & Lobato, 2004). Para obter essas condições, inicialmente foi prospectada uma área de solo com histórico conhecido sem adubação fosfatada e realizada análise química para P disponível e granulométrica nas amostras coletadas na camada 0-20 cm de profundidade, conforme métodos descritos para a caracterização dos sítios de fenotipagem. Portanto, com exceção do P e dos genótipos, todos os demais fatores foram mantidos constantes nas duas áreas, as quais receberam os mesmos tratamentos de calagem, adubação com outros nutrientes e controle de insetos-pragas e doenças, principalmente brusone.

Em Santo Antônio de Goiás, Goiás, foram aplicados 500 kg ha⁻¹ de gesso agrícola em área total, e feita a adubação corretiva com P em função do teor de argila, conforme método descrito por Souza & Lobato (2004). Assim, para 63% de teor de argila, o baixo teor de P foi corrigido com o equivalente a 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (cerca de 180 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo), e o alto teor, com o equivalente a 445 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (cerca de 990 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo) em área total, em seguida incorporado. Os demais nutrientes (N, K, S e Zn) foram fornecidos sem discriminação em quantidades calculadas em função

da análise do solo para o adequado desenvolvimento do arroz (Embrapa, 2012). A adubação de plantio foi realizada com uma mistura de 105 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (cerca de 63 kg ha⁻¹ de K₂O), 120 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio (cerca de 24 kg ha⁻¹ de N) e 15 kg ha⁻¹ de sulfato de zinco (cerca de 10 kg ha⁻¹ de Zn), totalizando 240 kg ha⁻¹ dessa mistura. O restante de N foi aplicado em cobertura, sendo 250 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio (cerca de 50 kg ha⁻¹ de N), no início do perfilhamento (estádio V4-V5) e 90 kg ha⁻¹ de uréia (cerca de 40 kg ha⁻¹ de N), na diferenciação da panícula (estádio R1) (Counce et al., 2000).

Em Sinop, Mato Grosso, com 32% de teor de argila, o baixo teor de P foi corrigido com o equivalente a 45 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (cerca de 100 kg ha⁻¹ de superfostato triplo), e o alto teor, com o equivalente a 205 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (cerca de 450 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo) em área total, em seguida incorporado. Os demais nutrientes (N, K, S e Zn) sem discriminação para o adequado desenvolvimento do arroz (Embrapa, 2012). A adubação de plantio foi realizada com uma mistura de 100 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (cerca de 60 kg ha⁻¹ de K₂O), 120 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio (cerca de 24 kg ha⁻¹ de N) e 4 kg ha⁻¹ de sulfato de zinco (cerca de 2,7 kg ha⁻¹ de Zn), totalizando 224 kg ha⁻¹ dessa mistura. O restante de N foi aplicado em cobertura, sendo 200 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio (cerca de 40 kg ha⁻¹ de N), no início do perfilhamento (estádio V4-V5) e 90 kg ha⁻¹ de uréia (cerca de 40 kg ha⁻¹ de N), na diferenciação da panícula (estádio R1) (Counce et al., 2000).

3.3 ANÁLISES ESTATÍSTICO-GENÉTICAS

3.3.1 Análises de variância individuais

Os dados dos caracteres produção de grãos (PG, em kg ha⁻¹), altura de planta (AP, em cm) e dias para o florescimento (DF, em dias) proveniente dos ensaios com progênies S_{0:2} e testemunhas, em delineamento látice quadrado simples 14 x 14, foram submetidos à análise de variância individual para cada local e nível de fósforo, com base no seguinte modelo aleatório (eq. 1) (Cochran & Cox, 1966):

$$y_{ijk} = \mu + g_i + r_j + b_{k(j)} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

em que:

- y_{ijk} é a observação do genótipo i , na repetição j e no bloco k ;
- μ é a média geral (constante inerente a todas as observações);

- g_i é o efeito aleatório do genótipo i ($i = 1, 2, \dots, I$, sendo $I = K^2$) e $I = P + T$, em que P é o número de progênes e T o número de testemunhas), assumindo $g_i \sim \text{NID} \cap (0, \sigma_p^2)$;
- r_j é o efeito aleatório de repetição j ($j = 1, 2, \dots, J$), assumindo $r_j \sim \text{NID} \cap (0, \sigma_r^2)$;
- $b_{k(j)}$ é o efeito aleatório de bloco k ($k = 1, 2, \dots, K$), dentro da repetição j , assumindo $b_{k(j)} \sim \text{NID} \cap (0, \sigma_b^2)$; e
- ε_{ijk} é o erro experimental associado à observação Y_{ijk} , assumindo independente e idênticamente distribuído, sob $N \cap (0, \sigma^2)$.

As análises de variância foram realizadas utilizando o software estatístico SAS[®] para Windows versão 9.2 (Statistical Analysis System - SAS Institute, 2013), via procedimentos ‘proc glm’. Assim, com base nesse modelo matemático e nas premissas assumidas, foi construído o seguinte esquema da análise de variância individual (Tabela 5):

Tabela 5 Esquema da análise de variância individual por local e nível de P no solo.

Fonte de Variação	GL	QM	F
Repetições (R)	$(J - 1)$	QM_1	QM_1/QM_{EI}
Blocos/R	$J(K - 1)$	QM_2	QM_2/QM_{EI}
Genótipos ¹ (G)	$I - 1$	QM_3	QM_3/QM_{EI}
Progênes (P)	$P - 1$	QM_4	QM_4/QM_{EI}
Testemunhas (T)	$T - 1$	QM_5	QM_5/QM_{EI}
Tipo (P vs T)	1	QM_6	QM_6/QM_{EI}
Erro intrablocos	$(K - 1)(JK - K - 1)$	QM_{EI}	
Total	$IJ - 1$		

¹ $I = P + T$.

3.3.2 Análises de variância conjunta por nível de fósforo e estimação dos componentes de variância

Os dados do caráter produção de grãos (PG, em kg ha⁻¹) proveniente dos ensaios com progênes S_{0:2} e testemunhas, foram submetidos à análise de variância conjunta para cada nível de fósforo, considerando fixo o efeito de locais, com base no modelo misto (eq. 2) (Cochran & Cox, 1966):

$$y_{ijkl} = \mu + g_i + a_l + r_{j(l)} + b_{k(jl)} + ga_{il} + \varepsilon_{ijkl} \quad (2)$$

em que:

- y_{ijkl} é a observação do genótipo i , na repetição j , no bloco k e no local l ;
- μ é a média geral (constante inerente a todas as observações);
- g_i é o efeito aleatório do genótipo i ($i = 1, 2, \dots, I$, sendo $I = K^2$) e $I = P + T$, em que P é o número de progênes e T o número de testemunhas), assumindo $g_i \sim \text{NID} \cap (0, \sigma_p^2)$;
- a_l é o efeito fixo de local l ($L = 2$);
- $r_{j(l)}$ é o efeito aleatório de repetição j ($j = 1, 2, \dots, J$), dentro do local l , assumindo $r_{j(l)} \sim \text{NID} \cap (0, \sigma_{r/a}^2)$;
- $b_{k(jl)}$ é o efeito aleatório de bloco k ($k = 1, 2, \dots, K$), dentro da repetição j e do local l , assumindo $b_{k(jl)} \sim \text{NID} \cap (0, \sigma_{b/ra}^2)$;
- ga_{il} é o efeito aleatório da interação genótipo x local, assumindo $ga_{il} \sim \text{NID} \cap (0, \sigma_{pa}^2)$; e
- ε_{ijkl} é o erro experimental associado à observação Y_{ijkl} , assumindo independente e idênticamente distribuído, sob $N \cap (0, \sigma^2)$.

Essa análise foi realizada com as médias ajustadas das análises individuais de cada nível de fósforo (ambiente). Como estas são realizadas com recuperação da informação do erro intrablocos, em cada uma delas foi calculado o erro efetivo, em que a média dos quadrados médios destes foi utilizada para compor o erro efetivo médio da análise conjunta. No caso, o erro efetivo médio foi obtido conforme Cochran & Cox (1957) (eq. 3).

$$QM_{EF} = QM_{EI} \left[1 + \frac{JK\mu}{K+1} \right] \quad (3)$$

em que:

- QM_{EF} é o quadrado médio do erro efetivo;
- QM_{EI} é o quadrado médio do erro intrablocos;
- J é o número de repetições;
- K é o tamanho do bloco incompleto; e
- μ é o fator de ajuste obtido pela expressão (eq. 4):

$$\mu = \frac{QM_{B/R} - QM_{EI}}{K(J-1)QM_{B/R}} \quad (4)$$

sendo $QM_{B/R}$ o quadrado médio de blocos dentro de repetições.

A eficiência do látice ($EL\%$), em percentagem, foi obtida por meio da equação (eq. 5).

$$EL\% = \frac{QM_{EB}}{QM_{EF}} 100 \quad (5)$$

em que:

- QM_{EB} é o quadrado médio com delineamento em blocos ao acaso.

As análises de variância foram realizadas utilizando o software estatístico SAS[®] para Windows versão 9.2 (Statistical Analysis System - SAS Institute, 2013), via procedimentos '*proc glm*'. Assim, com base nesse modelo matemático e nas premissas assumidas, foi construído o esquema da análise de variância conjunta com as respectivas esperanças dos quadrados médios, como apresentado na Tabela 6. As expressões referentes às esperanças matemáticas dos quadrados médios foram consideradas análogas aquelas do delineamento em blocos completos, quando o efeito de genótipos é considerado aleatório e o efeito de locais, fixo (Ramalho et al., 2012b; Vencovsky & Barriga, 1992). Nesse caso, Steel et al. (1997) admitem uma restrição nas interações no caso de modelos mistos que altera as esperanças matemáticas dos quadrados médios de tratamentos e da interação com locais. Essa restrição considera um fator que multiplica os coeficientes associado ao componente que envolve pelo menos um efeito fixo e pelo menos outro, aleatório. Esse fator é função dos níveis do efeito considerado fixo. Portanto, para o efeito fixo de locais igual a L , esse fator é igual a $(L/L - 1)$.

Com base nas esperanças dos quadrados médios, presentes na Tabela 5, foram estimados os componentes da variância, utilizando as expressões:

- variância do erro - $\hat{\sigma}^2$ (eq. 6):

$$\hat{\sigma}^2 = QM_{EF} \quad (6)$$

- variância genotípica de progênes S_{0:2} - $\hat{\sigma}_p^2$ (eq. 7):

$$\hat{\sigma}_p^2 = \frac{QM_P - QM_{EF}}{JL} \quad (7)$$

- variância da interação progênie x local - $\hat{\sigma}_{pa}^2$ (eq. 8)

$$\hat{\sigma}_{pa}^2 = \frac{QM_{PA} - QM_{EF}}{J\left(\frac{L}{L-1}\right)} \quad (8)$$

Tabela 6 Esquema da análise de variância conjunta por nível de P no solo com as respectivas esperanças dos quadrados médios.

Fonte de Variação	GL	QM	E(QM)
Locais (A)	$L - 1$	QM_1	-
Repetições (R)/A	$L(J - 1)$	QM_2	-
Blocos/R/A	$JL(K - 1)$	$QM_{B/R}$	-
Genótipos ¹ (G)	$I - 1$	QM_3	-
Progênes (P)	$P - 1$	QM_P	$\sigma^2 + JL\sigma_p^2$
Testemunhas (T)	$T - 1$	QM_4	-
Tipo (P vs T)	1	QM_5	-
Interação G x A	$(I - 1)(L - 1)$	QM_6	-
P x A	$(P - 1)(L - 1)$	QM_{PA}	$\sigma^2 + J(\frac{L}{L-1})\sigma_{pa}^2$
T x A	$(T - 1)(L - 1)$	QM_7	-
Tipo x A	$(L - 1)$	QM_8	-
Erro efetivo médio	$L(K - 1)(J - 1)$	QM_{EF}	σ^2
Total	$IJL - 1$	-	

¹ $I = P + T$.

- variância fenotípica entre médias de progênes $S_{0:2} - \hat{\sigma}_F^2$ (eq. 9):

$$\hat{\sigma}_F^2 = \frac{QM_P}{JL} \quad (9)$$

em que:

- QM_{EF} é o quadrado médio do erro efetivo médio;
- QM_P é o quadrado médio de progênes $S_{0:2}$; e
- QM_{PA} é o quadrado médio da interação progênie x local.

Para as estimativas da variância genotípica de progênes $S_{0:2}$ ($\hat{\sigma}_p^2$) foram obtidos os intervalos de confiança (IC, em eq. 10) para $(1-\alpha)=95\%$ de probabilidade, conforme sugerido por Burdick & Graybill (1992):

$$IC(\sigma_p^2)_{0,95} = \left[\frac{n_t \hat{\sigma}_p^2}{\chi_{n_t;0,975}^2} ; \frac{n_t \hat{\sigma}_p^2}{\chi_{n_t;0,025}^2} \right] \quad (10)$$

em que:

- n_t é o número de graus de liberdade associado à estimativa do componente de variância genotípica entre progênes $S_{0:2}$ ($\hat{\sigma}_p^2$);
- $\chi_{n_t;0,975}^2$ é o quantil para 97,5% de probabilidade na distribuição χ^2 com n_t graus de liberdade; e

- $\chi^2_{n_t;0,025}$ é o quantil para 2,5% de probabilidade na distribuição χ^2 com n_t graus de liberdade.

O valor de n_t foi obtido segundo o procedimento descrito por Satterthwaite (1946), em eq. 11, empregado para calcular o número de graus de liberdade associado a uma estimativa do componente de variância resultante da combinação linear de dois quadrados médios, com números de graus de liberdade conhecidos.

$$n_t = \frac{(QM_P - QM_{EF})^2}{\frac{(QM_P)^2}{f_1} + \frac{(QM_{EF})^2}{f_2}} \quad (11)$$

em que:

- f_1 é o número de graus de liberdade de progênes $S_{0:2}(QM_P)$; e
- f_2 é o número de graus de liberdade do erro efetivo médio (QM_{EF}).

Para as estimativas da variância da interação progênie x local ($\hat{\sigma}_{pa}^2$) foram, também, obtidos os intervalos de confiança (IC, em eq. 12) para $(1-\alpha)=95\%$ de probabilidade, conforme sugerido por Burdick & Graybill (1992):

$$IC(\sigma_{pa}^2)_{0,95} = \left[\frac{n_{ti} \hat{\sigma}_{pa}^2}{\chi^2_{n_{ti};0,975}} ; \frac{n_{ti} \hat{\sigma}_{pa}^2}{\chi^2_{n_{ti};0,025}} \right] \quad (12)$$

sendo que:

- n_{ti} é o número de graus de liberdade associado à estimativa do componente de variância da interação progênie x local ($\hat{\sigma}_{pa}^2$);
- $\chi^2_{n_{ti};0,975}$ é o quantil para 97,5% de probabilidade na distribuição χ^2 com n_{ti} graus de liberdade; e
- $\chi^2_{n_{ti};0,025}$ é o quantil para 2,5% de probabilidade na distribuição χ^2 com n_{ti} graus de liberdade.

O valor de n_{ti} foi obtido segundo o procedimento descrito por Satterthwaite (1946), em eq. 13:

$$n_{ti} = \frac{(QM_{PA} - QM_{EF})^2}{\frac{(QM_{PA})^2}{f_1} + \frac{(QM_{EF})^2}{f_2}} \quad (13)$$

em que:

- f_1 é o número de graus de liberdade da interação progênie x local (QM_{PA}); e
- f_2 é o número de graus de liberdade do erro efetivo médio (QM_{EF}).

Para as estimativas da variância residual ($\hat{\sigma}^2$) foram obtidos os intervalos de confiança (IC , em eq. 14) para $(1-\alpha)=95\%$ de probabilidade, conforme sugerido por Burdick & Graybill (1992):

$$IC(\sigma^2)_{0,95} = \left[\frac{n_e \hat{\sigma}^2}{\chi_{n_e;0,975}^2} ; \frac{n_e \hat{\sigma}^2}{\chi_{n_e;0,025}^2} \right] \quad (14)$$

em que:

- n_e é o número de graus de liberdade associado à estimativa do componente de variância do erro ($\hat{\sigma}^2$), obtido na análise de variância;
- $\chi_{n_e;0,975}^2$ é o quantil para 97,5% de probabilidade na distribuição χ^2 com n_e graus de liberdade; e
- $\chi_{n_e;0,025}^2$ é o quantil para 2,5% de probabilidade na distribuição χ^2 com n_e graus de liberdade.

Com base nessas estimativas foi calculado a estimativa do coeficiente de herdabilidade no sentido amplo ao nível de médias de progênies $S_{0:2}$ ($\hat{h}_p^2$), por meio da expressão (eq. 15):

$$\hat{h}_p^2 = \frac{\hat{\sigma}_p^2}{\hat{\sigma}_F^2} 100 \quad (15)$$

Os intervalos de confiança (IC , em eq. 16) para $(1-\alpha)=95\%$ de probabilidade para as estimativas do coeficiente de herdabilidade foram obtidos conforme Burdick & Graybill (1992):

$$IC(\hat{h}_p^2)_{0,95} = \left\{ 1 - \left[\left(\frac{QM_P}{QM_{EF}} \right) F_{0,975;f_1,f_2} \right]^{-1} \leq h_p^2 \leq 1 - \left[\left(\frac{QM_P}{QM_{EF}} \right) F_{0,025;f_1,f_2} \right]^{-1} \right\} \quad (16)$$

em que:

- $F_{0,975;f_1,f_2}$ é o quantil para 97,5% de probabilidade na distribuição F associado a f_1 graus de liberdade de progênie e f_2 graus de liberdade do erro efetivo médio; e
- $F_{0,975;f_1,f_2}$ é o quantil para 2,5% de probabilidade na distribuição F associado a f_1 graus de liberdade de progênie e f_2 graus de liberdade do erro efetivo médio.

Para a obtenção das estimativas do índice de variação (b , em eq. 17), foi utilizada a expressão descrita por Vencovsky (1987):

$$b = \frac{(\sqrt{\hat{\sigma}_p^2}/\bar{P})}{(\sqrt{\hat{\sigma}^2}/\bar{M})} = \frac{CV_g}{CV_e} \quad (17)$$

em que:

- $\bar{M}$ é a média geral;
- $\bar{P}$ é média de progênie $S_{0;2}$;
- CV_g é a estimativa do coeficiente de variação genotípica; e
- CV_e é a estimativa do coeficiente de variação ambiental.

3.3.3 Análise de variância conjunta e estimação dos componentes de variância

Os dados experimentais do caráter produção de grãos (PG, em kg ha⁻¹), foram submetidos à análise conjunta, considerando fixos os efeitos de locais e níveis de fósforo no solo, conforme o modelo misto (eq. 18) (Cochran e Cox, 1966):

$$y_{ijklm} = \mu + g_i + a_l + n_m + r_{j(lm)} + b_{k(jlm)} + ga_{il} + gn_{im} + gan_{ilm} + an_{lm} + \varepsilon_{ijklm} \quad (18)$$

em que:

- y_{ijklm} é a observação do genótipo i , na repetição j , no bloco k , no local l e no nível de fósforo m ;
- μ é a média geral (constante inerente a todas as observações);
- g_i é o efeito aleatório do genótipo i ($i = 1, 2, \dots, I$, sendo $I = K^2$) e $I = P + T$, em que P é o número de progênie e T o número de testemunhas), assumindo $g_i \sim \text{NID} \cap (0, \sigma_p^2)$;
- a_l é o efeito fixo de local l ($L = 2$);

- n_m é o efeito fixo de nível de fósforo m ($M = 2$; sendo um nível baixo e outro alto);
- $r_{j(lm)}$ é o efeito aleatório de repetição j ($j = 1, 2, \dots, J$), dentro do local l e do nível de fósforo m , assumindo $r_{j(lm)} \sim \text{NID} \cap (0, \sigma_{r/an}^2)$;
- $b_{k(jlm)}$ é o efeito aleatório de bloco k ($k = 1, 2, \dots, K$), dentro da repetição j , do local l e do nível de fósforo m , assumindo $b_{k(jlm)} \sim \text{NID} \cap (0, \sigma_{b/ran}^2)$;
- ga_{il} é o efeito aleatório da interação genótipo x local, assumindo $ga_{il} \sim \text{NID} \cap (0, \sigma_{pa}^2)$;
- gn_{im} é o efeito aleatório da interação genótipo x nível de fósforo, assumindo $gn_{im} \sim \text{NID} \cap (0, \sigma_{pn}^2)$;
- gan_{ilm} é o efeito aleatório da interação genótipo x local x nível de fósforo, assumindo $gan_{ilm} \sim \text{NID} \cap (0, \sigma_{pan}^2)$;
- an_{lm} é o efeito aleatório da interação local x nível de fósforo, assumindo $an_{lm} \sim \text{NID} \cap (0, \sigma_{an}^2)$; e
- ε_{ijklm} é o erro experimental associado à observação Y_{ijklm} , assumindo independente e idênticamente distribuído, sob $N \cap (0, \sigma^2)$.

Essa análise foi realizada com as médias ajustadas das análises individuais de cada nível de fósforo (ambiente). Como estas são realizadas com recuperação da informação do erro intrablocos, em cada uma delas foi calculado o erro efetivo, em que a média dos quadrados médios destes foi utilizada para compor o erro efetivo médio da análise conjunta. No caso, o erro efetivo médio foi obtido conforme Cochran e Cox (1957) (eq. 3 e 4). E, a eficiência do látice ($EL\%$), em percentagem, foi obtida por meio da equação (eq. 5).

Assim, com base nesse modelo matemático e nas premissas assumidas, foi construído o esquema da análise de variância conjunta com as respectivas esperanças dos quadrados médios, como apresentado na Tabela 7. As expressões referentes às esperanças matemáticas dos quadrados médios foram consideradas análogas aquelas do delineamento em blocos completos, quando o efeito de genótipos é considerado aleatório e o efeito de ambiente (locais e níveis de fósforo), fixo (Ramalho et al., 2012b; Vencovsky & Barriga, 1992). Nesse caso, Steel et al. (1997) admitem uma restrição nas interações no caso de modelos mistos que altera as esperanças matemáticas dos quadrados médios de tratamentos e da interação com locais, níveis de fósforo e tripla. Essa restrição considera um fator que multiplica os coeficientes associado ao componente que envolve pelo menos um efeito fixo

e pelo menos outro, aleatório. Esse fator é função dos níveis do efeito considerado fixo. Portanto, para o efeito fixo de locais igual a L , Esse fator é igual a $(L/L - 1)$ e para níveis de fósforo, com M níveis, esse fator é igual a $(M/M - 1)$.

Tabela 7 Esquema da análise de variância conjunta com as respectivas esperanças dos quadrados médios.

Fonte de Variação	GL	QM	E(QM)
Locais (A)	$L - 1$	QM_1	-
Níveis de Fósforo (N)	$M - 1$	QM_2	-
Repetições (R)/A/N	$LM(J - 1)$	QM_3	-
Blocos/R/A/N	$JLM(K - 1)$	$QM_{B/R}$	-
Genótipos ¹ (G)	$I - 1$	QM_4	-
Progenies (P)	$P - 1$	QM_P	$\sigma^2 + JLM\sigma_p^2$
Testemunhas (T)	$T - 1$	QM_5	-
Tipo (P vs T)	1	QM_6	-
Interação G x A	$(I - 1)(L - 1)$	QM_7	-
P x A	$(P - 1)(L - 1)$	QM_{PA}	$\sigma^2 + JM(\frac{L}{L-1})\sigma_{pa}^2$
T x A	$(T - 1)(L - 1)$	QM_8	-
Tipo x A	$(L - 1)$	QM_9	-
Interação G x N	$(I - 1)(M - 1)$	QM_{10}	-
P x N	$(P - 1)(M - 1)$	QM_{PN}	$\sigma^2 + JL(\frac{M}{M-1})\sigma_{pn}^2$
T x N	$(T - 1)(M - 1)$	QM_{11}	-
Tipo x N	$(M - 1)$	QM_{12}	-
Interação A x N	$(L - 1)(M - 1)$	QM_{13}	-
Interação G x A x N	$(I - 1)(L - 1)(M - 1)$	QM_{14}	-
P x A x N	$(P - 1)(L - 1)(M - 1)$	QM_{PAN}	$\sigma^2 + J(\frac{L}{L-1})(\frac{M}{M-1})\sigma_{pan}^2$
T x A x N	$(T - 1)(L - 1)(M - 1)$	QM_{15}	-
Tipo x A x N	$(L - 1)(M - 1)$	QM_{16}	-
Erro efetivo médio	$LM(K - 1)(JK - K - 1)$	QM_{EF}	σ^2
Total	$IJLM - 1$	-	

¹ $I = P + T$.

Assim, Com base nas esperanças dos quadrados médios, presentes na Tabela 7, foram estimados os componentes da variância, utilizando as seguintes expressões:

- variância do erro – $\hat{\sigma}^2$ (eq. 19):

$$\hat{\sigma}^2 = QM_{EF} \quad (19)$$

- variância genotípica de progênies $S_{0:2} - \hat{\sigma}_p^2$ (eq. 20):

$$\hat{\sigma}_p^2 = \frac{QM_P - QM_{EF}}{JLM} \quad (20)$$

- variância da interação progênie x local – $\hat{\sigma}_{pa}^2$ (eq. 21):

$$\hat{\sigma}_{pa}^2 = \frac{QM_{PA} - QM_{EF}}{JM(\frac{L}{L-1})} \quad (21)$$

- variância da interação progênie x nível de fósforo – $\hat{\sigma}_{pa}^2$ (eq. 22):

$$\hat{\sigma}_{pn}^2 = \frac{QM_{PN} - QM_{EF}}{JL\left(\frac{M}{M-1}\right)} \quad (22)$$

- variância da interação progênie x local x nível de fósforo – $\hat{\sigma}_{pan}^2$ (eq. 23):

$$\hat{\sigma}_{pan}^2 = \frac{QM_{PAN} - QM_{EF}}{J\left(\frac{L}{L-1}\right)\left(\frac{M}{M-1}\right)} \quad (23)$$

- variância fenotípica entre médias de progênie $S_{0:2}$ – $\hat{\sigma}_{\bar{F}}^2$ (eq. 24):

$$\hat{\sigma}_{\bar{F}}^2 = \frac{QM_P}{JLM} \quad (24)$$

em que:

- QM_{EF} é o quadrado médio do erro efetivo médio;
- QM_P é o quadrado médio de progênie $S_{0:2}$;
- QM_{PA} é o quadrado médio da interação progênie x local;
- QM_{PN} é o quadrado médio da interação progênie x nível de fósforo; e
- QM_{PAN} é o quadrado médio da interação progênie x local x nível de fósforo.

Para as estimativas da variância genotípica de progênie $S_{0:2}$ ($\hat{\sigma}_p^2$) e da variância da interação progênie x local ($\hat{\sigma}_{pa}^2$) foram, também, obtidos os intervalos de confiança (IC , em eq. 10 e 11 para $\hat{\sigma}_p^2$; e em eq. 12 e 13 para $\hat{\sigma}_{pa}^2$) para $(1-\alpha)=95\%$ de probabilidade (Burdick & Graybill, 1992).

Para as estimativas da variância da interação progênie x nível de fósforo ($\hat{\sigma}_{pn}^2$) foram, também, obtidos os intervalos de confiança (IC , em eq. 25) para $(1-\alpha)=95\%$ de probabilidade, conforme sugerido por Burdick & Graybill (1992):

$$IC(\sigma_{pn}^2)_{0,95} = \left[\frac{n_{ti} \hat{\sigma}_{pn}^2}{\chi_{n_{ti};0,975}^2} ; \frac{n_{ti} \hat{\sigma}_{pn}^2}{\chi_{n_{ti};0,025}^2} \right] \quad (25)$$

sendo que:

- n_{ti} é o número de graus de liberdade associado à estimativa do componente de variância da interação progênie x nível de fósforo ($\hat{\sigma}_{pn}^2$);
- $\chi_{n_{ti};0,975}^2$ é o quantil para 97,5% de probabilidade na distribuição χ^2 com n_{ti} graus de liberdade; e

$-\chi^2_{n_{ti};0,025}$ é o quantil para 2,5% de probabilidade na distribuição χ^2 com n_{ti} graus de liberdade.

O valor de n_{ti} foi obtido segundo o procedimento descrito por Satterthwaite (1946), em eq. 26:

$$n_{ti} = \frac{(QM_{PN} - QM_{EF})^2}{\frac{(QM_{PN})^2}{f_1} + \frac{(QM_{EF})^2}{f_2}} \quad (26)$$

em que:

- f_1 é o número de graus de liberdade da interação progênie x nível de fósforo (QM_{PN}); e
- f_2 é o número de graus de liberdade do erro efetivo médio (QM_{EF}).

Para as estimativas da variância residual ($\hat{\sigma}^2$) foram obtidos os intervalos de confiança para $(1-\alpha)=95\%$ de probabilidade, conforme sugerido por Burdick & Graybill (1992), como descrito na eq. 7 da sessão anterior

Com base nessas estimativas foi calculado a estimativa do coeficiente de herdabilidade no sentido amplo ao nível de médias de progênies $S_{0:2}$ ($\hat{h}_p^2$), por meio da expressão (eq. 27):

$$\hat{h}_p^2 = \frac{\hat{\sigma}_p^2}{\hat{\sigma}_F^2} 100 \quad (27)$$

Para as estimativas do coeficiente de herdabilidade foram, também, obtidos os intervalos de confiança (IC , em eq. 28) para $(1-\alpha)=95\%$ de probabilidade, conforme sugerido por Burdick & Graybill (1992):

$$IC(\hat{h}_p^2)_{0,95} = \left\{ 1 - \left[\left(\frac{QM_P}{QM_{EF}} \right) F_{0,975;f_1;f_2} \right]^{-1} \leq h_p^2 \leq 1 - \left[\left(\frac{QM_P}{QM_{EF}} \right) F_{0,025;f_1;f_2} \right]^{-1} \right\} \quad (28)$$

em que:

- $F_{0,975;f_1;f_2}$ é o quantil para 97,5% de probabilidade na distribuição F associado a f_1 graus de liberdade de progênies e f_2 graus de liberdade do erro efetivo médio; e
- $F_{0,025;f_1;f_2}$ é o quantil para 2,5% de probabilidade na distribuição F associado a f_1 graus de liberdade de progênies e f_2 graus de liberdade do erro efetivo médio.

Para a obtenção das estimativas do índice de variação (b) foi utilizada a mesma expressão apresentada na eq. 17 (Vencovsky, 1987).

3.3.4 Correlações fenotípica, genética e ambiental entre caracteres

Foram obtidas estimativas de correlação fenotípica ($\hat{r}_F$), genética ($\hat{r}_p$) e ambiental ($\hat{r}_e$) entre os caracteres produção de grãos (PG), altura de planta (AP) e dias para o florescimento (DF), para cada nível de fósforo, conforme demonstrado na tabela 8.

A medida da correlação entre duas variáveis, x e y , fornecida pela estimativa do coeficiente de correlação, foi obtida pela divisão entre a estimativa da covariância entre x e y ($Cov_{(x,y)}$) e o produto dos desvios padrões de x ($\hat{\sigma}_x$) e y ($\hat{\sigma}_y$), ou seja: $\hat{r}_{x,y} = \frac{Cov_{(x,y)}}{\hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y}$ (Steel e Torrie, 1997). Assim, as estimativas dessas correlações foram obtidas mediante análises de covariâncias, combinando-se os dados dos dois caracteres, como relatado por Cruz et al. (2012) (Tabela 8).

Tabela 8 Esquema da análise de variância dos caracteres x , y e da soma ($x + y$), para o delineamento látice quadrado simples duplicado, com os produtos médios e suas respectivas esperanças.

FV	GL	QM			E(QM)	PM	E(PM)
		x	y	$(x + y)$			
Genótipos (G)	$I - 1$	-	-	-	-	-	-
Progênie (P)	$P - 1$	QMP_x	QMP_y	$QMP_{(x+y)}$	$\sigma^2 + JL\sigma_p^2$	PMP_{xy}	$\sigma_{xy} + JL\sigma_{pxy}$
Testemunhas (T)	$T - 1$	-	-	-	-	-	-
Erro intrablocos	$L(K - 1)(JK - K - 1)$	QME_x	QME_y	$QME_{(x+y)}$	σ^2	PME_{xy}	σ_{xy}

FV: fonte de variação; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; E(QM): esperança do quadrado médio; PM: produto médio; E(PM): esperança do produto médio; J : número de repetições; e L : número de locais.

Os produtos médios (PM) associados aos efeitos foram obtidos por meio da expressão (eq. 29):

$$PM_{xy} = (QM_{x+y} - QM_x - QM_y)/2 \quad (29)$$

em que, para uma mesma fonte de variação, PM_{xy} é o produto médio associado aos médios dos caracteres x e y , respectivamente. A verificação da hipótese de a estimativa do coeficiente de correlação ($\hat{r}$) ser igual a zero ($H_0: \rho = 0$) foi avaliada pelo teste t (eq. 30) associado a $n - 2$ graus de liberdade, sendo n o número de pares de dados utilizados para o cálculo da correlação, ou seja, n é o número de progênie (Vencovsky & Barriga, 1992).

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} \quad (30)$$

Além disso, foi verificada as magnitudes das estimativas dos coeficientes de correlação de acordo com a classificação de Carvalho et al. (2004): $\hat{r} = 0$ (nula); $0 < |\hat{r}| < 0,30$ (fraca); $0,30 < |\hat{r}| < 0,60$ (média); $0,60 < |\hat{r}| < 0,90$ (forte); $0,90 < |\hat{r}| < 1$ (fortíssima) e $|\hat{r}| = 1$ (perfeita).

3.3.5 Resposta esperada à seleção

A resposta esperada com a seleção de progênies $S_{0:2}$ (Rs), para o caráter produção de grãos (PG), foi estimada a partir do procedimento descrito por Falconer & Mackay (1996) (eq. 31):

$$Rs = ds\hat{h}_p^2 \quad (31)$$

em que:

- ds corresponde ao diferencial de seleção das progênies selecionadas em relação à média geral; e
- $\hat{h}_p^2$ à estimativa da herdabilidade ao nível de médias de progênies.

A Rs , em percentagem, foi obtida por meio da expressão (eq. 32):

$$Rs\% = \frac{Rs}{\bar{P}} 100 \quad (32)$$

Assim, foram obtidas as respostas esperadas com a seleção para três situações, com uma intensidade de seleção de cerca de 0,15 (igual a 28 progênies $S_{0:2}$) para o cálculo de ds :

(a) Seleção específica (Rs_i): seleção direta no nível i e resposta esperada no mesmo nível i , sendo obtida pela expressão (eq. 33):

$$Rs_i = ds_i \frac{\hat{\sigma}_{p_i}^2}{\hat{\sigma}_{\bar{F}_i}^2} \quad (33)$$

em que:

- ds_i corresponde ao diferencial de seleção das progênies selecionadas no nível de fósforo i ;

- $\hat{\sigma}_{p_i}^2$ é a estimativa da variância genética entre progênie S_{0:2} para o nível de fósforo i , obtida pela eq. 7; e
- $\hat{\sigma}_{\bar{F}_i}^2$ é a estimativa da variância fenotípica ao nível de médias de progênie no nível de fósforo i , conforme eq. 9.

(b) Seleção indireta ($Rs_{j/i}$): seleção num dado nível de fósforo e verificação da resposta esperada no outro (seleção indireta no nível i e resposta esperada no nível j), sendo obtida pela expressão (eq. 34):

$$Rs_{j/i} = ds_{j/i} \frac{\hat{\sigma}_{p_j}^2}{\hat{\sigma}_{\bar{F}_j}^2} \quad (34)$$

em que:

- $ds_{j/i}$ corresponde ao diferencial de seleção das progênie no nível de fósforo j , cujas progênie foram selecionadas no nível de fósforo i ;
- $\hat{\sigma}_{p_j}^2$ é a estimativa da variância genética entre progênie S_{0:2} para o nível de fósforo j ; e
- $\hat{\sigma}_{\bar{F}_j}^2$ é a estimativa da variância fenotípica ao nível de médias de progênie no nível de fósforo j .

(c) Seleção geral ($Rs_{i/ij}$ e Rs_{ij}): seleção com base na média das progênie reunidas nos dois níveis de fósforo, com verificação das respostas esperadas em cada nível i , separadamente e no conjunto, sendo obtidas pelas expressões (eq. 35 e 36):

$$Rs_{i/ij} = ds_{i/ij} \frac{\hat{\sigma}_{p_i}^2}{\hat{\sigma}_{\bar{F}_i}^2} \quad (35)$$

$$Rs_{ij} = ds_{ij} \frac{\hat{\sigma}_{p_{ij}}^2}{\hat{\sigma}_{\bar{F}_{ij}}^2} \quad (36)$$

em que:

- $ds_{i/ij}$ corresponde ao diferencial de seleção das progênie no nível de fósforo i , cujas progênie foram selecionadas sobre o conjunto de níveis de fósforo (ij);
- ds_{ij} corresponde ao diferencial de seleção das progênie selecionadas para os dois níveis de fósforo;

- $\hat{\sigma}_{p_{ij}}^2$ é a estimativa da variância genética entre progênies $S_{0:2}$ da análise conjunta dos dois níveis de fósforo, obtida pela eq. 20; e
- $\hat{\sigma}_{\bar{F}_{ij}}^2$ é a estimativa da variância fenotípica da análise conjunta dos dois níveis de fósforo, conforme eq. 24.

3.3.6 Avaliação da tolerância à deficiência de fósforo

A avaliação da tolerância à deficiência e eficiência do uso de fósforo foi realizada com base no caráter produção de grãos (PG). Assim, primeiramente foi realizada uma análise gráfica por meio das médias ajustadas dos genótipos nos dois níveis de fósforo, em que no eixo das abcissas foram plotados as médias do ambiente de alto nível de fósforo e no eixo das ordenadas as médias do ambiente de baixo nível de fósforo. Desta forma, o plano cartesiano, foi dividido em quatro quadrantes pelas médias de cada ambiente. Assim, os genótipos puderam ser classificados em: ineficientes e não responsivos (produziram abaixo da média nos dois níveis); eficientes e não responsivos (produziram acima da média no baixo nível de fósforo e abaixo da média no alto nível de fósforo); ineficientes e responsivos (abaixo da média no baixo nível e acima da média no alto nível de fósforo); e eficientes e responsivos (acima da média nas duas condições de fósforo). De modo a auxiliar na interpretação do resultado da dispersão gráfica, foi realizada a regressão linear para análise da estabilidade e a correlação da PG das progênies $S_{0:2}$ na condição de alto e baixo nível de P (Fageria & Kluthcouski, 1980).

A análise gráfica de dispersão permite na seleção do grupo de genótipos eficientes e responsivos, porém, não a seleção dentro desse grupo. Nesse sentido, foi utilizado dois índices para subsidiar a identificação desses genótipos dentro do grupo:

(a) Índice de tolerância à deficiência de fósforo (IT_i), para um determinado genótipo i , foi calculado por meio da expressão (eq. 37) adaptada de Fischer & Maurer (1987):

$$IT_i = \frac{(\bar{Y}_{i0}/\bar{Y}_{i1})}{(\bar{Y}_{.0}/\bar{Y}_{.1})} \quad (37)$$

em que,

- $\bar{Y}_{i0}$ é a média ajustada do genótipo i para o caráter produção de grãos sob deficiência de fósforo;

- $\bar{Y}_{i1}$ é a média ajustada do genótipo i para o caráter produção de grãos em alto nível de fósforo;
- $\bar{Y}_{.0}$ é a média geral para o caráter produção de grãos sob deficiência de fósforo; e
- $\bar{Y}_{.1}$ é a média geral para o caráter produção de grãos em alto nível de fósforo;

Assim, se IT_i for maior que 1 significa que o genótipo i apresentou redução de produtividade devido ao estresse abiótico menor que a ocorrida com a média geral da população.

(b) Média harmônica da performance relativa ($MHPR_i$), para um determinado genótipo i , foi obtida por meio da eq. 38 (Resende, 2007):

$$MHPR_i = \frac{l}{\sum_{j=1}^k \frac{1}{PR_{ij}}} \quad (38)$$

em que,

- l corresponde ao número de nível de fósforo; e
- PR_{ij} é a estimativa da performance relativa (PR_{ij}) de cada genótipo i em cada nível de fósforo j , proveniente da expressão (eq. 39):

$$PR_{ij} = \frac{\bar{X}_{ij}}{\bar{X}_{.j}} \quad (39)$$

sendo,

- $\bar{X}_{ij}$ é a média do genótipo i no nível de fósforo j ; e
- $\bar{X}_{.j}$ corresponde a média geral dos genótipos no nível de fósforo j .

A utilização de $MHPR_i$ como um índice, engloba em uma única medida, não somente as informações de tolerância à deficiência de fósforo, mas, também, a resposta ao uso do fósforo. Ou seja, esse índice permite selecionar as progênies $S_{0:2}$ que apresentam melhor performance relativa considerando os dois níveis de fósforo, penalizada pelo maior desvio de comportamento entre os níveis de fósforo, pela média harmônica.

O coeficiente de correlação de Spearman foi utilizado para analisar a intensidade e o sentido das relações existentes entre $MHPR$, IT e média conjunta de PG considerando os dois níveis de P no solo (Steel e Torrie, 1997).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISES DE VARIÂNCIA INDIVIDUAIS

4.1.1 Produção de grãos

Na Tabela 9 são apresentados os graus de liberdade (GL) e os quadrados médios (QM) das análises de variância individuais para Santo Antônio de Goiás e Sinop, nas condições de alto e baixo nível de fósforo (P) no solo, para o caráter produção de grãos (PG, em kg ha⁻¹).

Tabela 9 Análises de variância individuais por local e por nível de fósforo (P) no solo (alto e baixo), coeficiente de variação experimental (*CV*%), eficiência do látice (*EL*%) e média geral ($\bar{M}$) para o caráter produção de grãos, em kg ha⁻¹.

FV	Santo Antônio de Goiás/GO				Sinop/MT			
	Alto nível de P		Baixo nível de P		Alto nível de P		Baixo nível de P	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Repetições (R)	1	21.379.571,9**	1	38.135.555,6**	1	42.431.049,5**	1	4.435.943,9**
Blocos/R	26	1.252.501,8**	26	1.400.029,8**	26	670.325,5**	26	885.849,1**
Genótipos (G)	195	1.132.768,3**	195	696.108,9**	195	621.252,6**	195	473.571,1**
Progenies (P)	188	1.012.261,9**	188	585.928,7**	188	616.614,5**	188	435.914,3**
Testemunhas (T)	6	2.376.995,6**	6	760.883,0 ^{ns}	6	357.311,9 ^{ns}	6	198.487,8 ^{ns}
Tipo (P vs T)	1	14.925.940,0**	1	17.904.056,5**	1	2.097.153,6**	1	7.618.483,5**
Erro intrablocos	169	497.837,2	169	383.636,1	169	282.055,7	169	307.665,0
<i>CV</i> %		18,94		22,67		15,38		22,14
<i>EL</i> %		113,46		127,44		111,83		117,84
$\bar{M}$		3.577		2.605		3.321		2.399

^{ns} e **: teste F não significativo, significativo a 1%, respectivamente.

Para o arroz de terras altas, os coeficientes de variação experimental (*CV*%) verificados nos quatro ambientes foram satisfatórios, não divergindo dos comumente relatados na literatura para o caráter avaliado com o tipo de parcela adotada. Os valores variaram de 15,38% (Sinop, alto nível de P) a 22,67% (Santo Antônio de Goiás, baixo nível de P), os quais são classificados como médio e alto, respectivamente (Costa et al., 2002). Como já era de se esperar, as maiores magnitudes observadas de *CV*% ocorreram nas

condições de baixo nível de P, em decorrência principalmente da menor média obtida pelos genótipos em comparação ao alto nível de P. Nos experimentos realizados em Sinop, verificou-se uma precisão experimental relativamente melhor, em ambos os níveis de P, quando comparado a Santo Antônio de Goiás. A menor média e o menor erro experimental foram os fatores que contribuíram para que isso ocorresse.

A eficiência do látice ($EL\%$) foi da ordem de 111,83% (Sinop, alto nível de P) a 127,44% (Santo Antônio de Goiás, baixo nível de P). A saber, considera-se $EL\%$ quando a variação de blocos dentro de repetições é superior à variação existente entre repetições do delineamento de blocos ao acaso (Silva et al., 2000). Os resultados obtidos demonstram a importância de não se ter ignorado a variação devida a blocos dentro de repetições para o melhor controle local, contribuindo para melhorar a precisão experimental e, conseqüentemente, para fazer com que as estimativas que dependam da variância do erro sejam mais precisas, por esse componente estar ligeiramente menos inflacionado.

Observou-se a ocorrência de diferenças altamente significativas ($p \leq 0,01$), pelo teste F, em todos os ambientes para o efeito de genótipos. A partir do desdobramento desse efeito foi possível verificar que os efeitos de tipo e de progênies foram igualmente significativos ($p \leq 0,01$) para todos os ambientes. Assim, o contraste entre médias de progênies $S_{0:2}$ e de testemunhas foi diferente de zero, bem como, a variabilidade genética presente nessa população demonstrou ser suficiente para a obtenção de ganhos com seleção nos dois locais independentemente do nível de P no solo. Em Santo Antônio de Goiás, na condição de alto nível de P, houve diferenças altamente significativas ($p \leq 0,01$) entre testemunhas, o que indica que ao menos um contraste entre médias diferiu de zero. Nos demais ambientes, não foram observadas diferenças significativas para esse efeito. O baixo nível de P no solo levou a redução da expressão do potencial produtivo dos genótipos, provocando menor amplitude da variação fenotípica das médias para o caráter PG, que aliada ao baixo número de tratamentos, não permitiu a detecção de diferenças significativas entre as médias das testemunhas nessas condições. O fato de não ter sido observada diferenças significativas entre as testemunhas na condição de alto nível de P em Sinop decorreu principalmente devido a menor amplitude de variação fenotípica de aproximadamente 6,65 vezes menor daquela verificada em Santo Antônio de Goiás.

4.1.2 Altura de plantas

Estão apresentados na Tabela 10 os graus de liberdade (GL) e os quadrados médios (QM) obtidos das análises de variância individuais para Santo Antônio de Goiás e Sinop, nas condições de baixo e alto nível de P no solo, para o caráter altura de plantas (AP, em cm). Os coeficientes de variação experimental (*CV%*) observados nos diferentes ambientes foram satisfatórios considerando o tipo de parcela adotada e o caráter avaliado. Houve uma variação de 5,47% a 7,39%, ambos valores observados em Sinop, nos níveis baixo e alto de P no solo, respectivamente. A classificação desses valores é considerada como média, segundo Costa et al. (2002), para a cultura de arroz de terras altas. As maiores magnitudes de *CV%*, ao contrário do observado para o caráter PG, ocorreram na condição de alto nível de P no solo, principalmente em função do maior quadrado médio do erro.

Tabela 10 Análises de variância individuais por local e por nível de fósforo (P) no solo (alto e baixo), coeficiente de variação experimental (*CV%*), eficiência do látice (*EL%*) e média geral ($\bar{M}$) para o caráter altura de planta, em cm.

FV	Santo Antônio de Goiás/GO				Sinop/MT			
	Alto nível de P		Baixo nível de P		Alto nível de P		Baixo nível de P	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Repetições (R)	1	961,7**	1	2.445,0**	1	2.671,0**	1	45,6 ^{ns}
Blocos/R	26	78,4 ^{ns}	26	167,8**	26	125,6**	26	104,2**
Genótipos (G)	195	207,0**	195	136,9**	195	112,6**	195	113,1**
Progenies (P)	188	208,9**	188	139,5**	188	112,8**	188	115,5**
Testemunhas (T)	6	54,6 ^{ns}	6	127,7**	6	128,4*	6	40,6 ^{ns}
Tipo (P vs T)	1	724,6**	1	64,9 ^{ns}	1	24,5 ^{ns}	1	11,5 ^{ns}
Erro intrablocos	169	55,6	169	35,4	169	52,7	168	29,9
<i>CV%</i>		6,71		5,99		7,39		5,47
<i>EL%</i>		101,53		135,63		109,84		121,80
$\bar{M}$		111,22		99,36		98,29		99,79

^{ns}, * e **: teste F não significativo, significativo a 5% e 1%, respectivamente.

Em todos os experimentos, o delineamento em látice foi eficiente para o caráter AP, com eficiência do látice (*EL%*) variando de 101,53 a 135,63%, em Santo Antônio de Goiás, nas condições de alto e baixo nível de P, respectivamente. As maiores magnitudes de *EL%* foram observadas no baixo nível de P de ambos os locais, indicando que para esse caráter ocorreu elevada variação de blocos dentro de repetições quando o efeito do estresse abiótico por deficiência de P no solo estava presente.

A média geral do caráter AP nos diferentes ambientes variou de 99,36 (Santo Antônio de Goiás, baixo nível de P) a 111,22 cm (Santo Antônio de Goiás, alto nível de P).

Verificou-se que em ambos os locais o estresse provocado pela deficiência de P no solo afetou de forma diferente a altura das plantas. Em Santo Antônio de Goiás, houve a redução da média em 11,86 cm, enquanto que em Sinop, houve o aumento de 1,50 cm. Fidelis et al. (2012), avaliando cultivares de arroz de terras altas, observaram que apesar destes apresentarem diferenças significativas quanto ao porte, esse caráter não variou de forma significativa nos diferentes níveis de P, sendo esse o mesmo resultado obtido por Fidelis et al. (2013) com cultivares de arroz irrigado. Nessa mesma cultura, Guimarães et al. (2007) observaram que o nível de P no solo afetou significativamente o caráter AP, sem ter sido verificado o efeito significativo da interação nível de P x linhagem. Cancellier et al. (2010) observaram que o baixo nível de P provocou um aumento médio de 6 cm em cultivares de arroz de terras altas, tendo o nível de P no solo um efeito significativo sobre AP. Vale ressaltar que os trabalhos citados anteriormente, também, basearam-se em dados obtidos de experimentos conduzidos em um local. De certo modo, os dados obtidos assemelharam-se aos descritos na literatura, sendo que a divergência dos mesmos entre locais possivelmente foi ocasionada pelas variações edafoclimáticas.

Foi observada a ocorrência de diferenças altamente significativas ($p \leq 0,01$) pelo teste F em todos os ambientes para o efeito de genótipos. Com o seu desdobramento permitiu-se constatar que o efeito de progênies foi igualmente significativo ($p \leq 0,01$), o que denota a presença de variabilidade genética na população CNA9 F para o caráter AP. Em relação ao efeito de testemunhas, apenas no baixo nível de P em Santo Antônio de Goiás e no alto nível de P em Sinop, houve diferenças ao menos significativas ($p \leq 0,05$), revelando que ao menos um contraste entre testemunhas foi diferente de zero. Nos demais ambientes, tal fato não ocorreu principalmente em função da menor variação fenotípica do caráter AP.

Não foi detectada a ocorrência de diferença significativa para o efeito de tipo pelo teste F, demonstrando que as médias das progênies $S_{0:2}$ da população CNA9 e das testemunhas não foram diferentes. A única exceção foi observada no alto nível de P em Santo Antônio de Goiás, em que ocorreu diferenças altamente significativas ($p \leq 0,01$). Esse foi o melhor ambiente para PG (Tabela 9), por provável consequência do alto nível de P no solo e condições edafoclimáticas mais favoráveis, as quais possivelmente permitiu que os genótipos expressassem melhor o seu potencial para o caráter AP, revelado pela maior média geral em comparação aos demais ambientes. Dessa forma nesse ambiente foi possível detectar contraste significativo entre as médias de testemunhas e progênies $S_{0:2}$.

4.1.3 Dias para o florescimento

Encontram-se na Tabela 11 os graus de liberdade (GL) e os quadrados médios (QM) das análises de variância individuais para Santo Antônio de Goiás e Sinop, com alto e baixo nível de P no solo, para o caráter dias para o florescimento (DF, em dias). O coeficiente de variação experimental (*CV%*) variou de 2,50 (Santo Antônio de Goiás, baixo nível de P) a 6,42% (Sinop, alto nível de P). Em Santo Antônio de Goiás, a precisão experimental em ambos os níveis de P (alto e baixo) foi satisfatória, sendo que os valores observados (2,61 e 2,50%) são classificados como médio, segundo Costa et al. (2002), para esse caráter em arroz de terras altas. Em Sinop, verificou-se maiores magnitudes de *CV%*, sendo os valores de 4,75% (baixo nível de P) e 6,42% (alto nível de P) classificados como alto e muito alto, respectivamente, segundo os mesmos autores. Tal fato ocorreu não só em função da menor média do caráter DF, mas principalmente em decorrência do elevado erro experimental em relação a Santo Antônio de Goiás. Uma provável explicação para esse maior erro intrablocos, decorre do fato do solo de Sinop apresentar menor capacidade de retenção de água devido a menor percentagem de argila. Essa condição de solo, somada a ausência de irrigação suplementar, favorece a ocorrência de estresse por deficiência hídrica durante os períodos de “veranicos”, que são frequentes no cerrado brasileiro, afetando assim a uniformidade da área experimental.

Tabela 11 Análises de variância individuais por local e por nível de fósforo (P) no solo (alto e baixo), coeficiente de variação experimental (*CV%*), eficiência do látice (*EL%*) e média geral (*M*) para o caráter dias para o florescimento.

FV	Santo Antônio de Goiás/GO				Sinop/MT			
	Alto nível de P		Baixo nível de P		Alto nível de P		Baixo nível de P	
	GL	QM	GL	QM	GL	QM	GL	QM
Repetições (R)	1	316,0816**	1	441,4694**	1	177,4916*	1	587,7551**
Blocos/R	26	8,3948*	26	11,3650**	26	30,7429 ^{ns}	26	19,6809 ^{ns}
Genótipos (G)	195	33,7439**	195	33,7683**	195	40,6437**	195	30,3350**
Progenies (P)	188	31,9929**	188	33,2555**	188	41,4148**	188	30,7990**
Testemunhas (T)	6	20,0057**	6	12,5088**	6	18,3668 ^{ns}	6	11,1473 ^{ns}
Tipo (P vs T)	1	475,1035**	1	273,7241*	1	0,0522 ^{ns}	1	20,8206 ^{ns}
Erro intrablocos	169	4,8559	169	4,7754	169	26,8633	169	14,4115
<i>CV%</i>		2,61		2,50		6,42		4,75
<i>EL%</i>		103,88		109,90		100,24		101,26
<i>M</i>		84,27		87,34		80,69		79,87

^{ns}, * e **: teste F não significativo, significativo a 5% e 1%, respectivamente.

A eficiência do látice (*EL%*) variou de 100,24 (Sinop, alto nível de P) a 109,90%

(Santo Antônio de Goiás, baixo nível de P). As menores magnitudes dos valores de *EL%* foram observadas em Sinop, onde o efeito de blocos dentro de repetições não foi significativo, revelando que o controle local da variação existente dentro de repetições não se faz necessário para esse caráter nesse local. Tal como o verificado por Santos et al. (2001), a *EL%* pode variar conforme os ambientes, uma vez que cada um desses dispõe de uma área experimental com maior ou menor heterogeneidade. Essa variação, também, pode ocorrer em função do caráter avaliado, como observado para AP e DF, em que as estimativas de *EL%* foram relativamente menores comparadas as do caráter PG, que possui herança genética mais complexa. Ou seja, para caracteres quantitativos como PG, em que estão mais sujeitos a variações fenotípicas em função das variações ambientais, o efeito de blocos dentro de repetições tende a ter maior magnitude. O controle local dessa variação, a qual seria alocada no erro caso o delineamento fosse em blocos ao acaso, faria com que a estimativa *EL%* tivesse valor maior.

A média geral do caráter DF variou de 79,87 (Sinop, baixo nível de P) a 87,34 dias (Santo Antônio de Goiás, baixo nível de P). No baixo nível de P em Santo Antônio de Goiás, houve um aumento de três dias na média do caráter DF, enquanto que, em Sinop ocorreu aproximadamente um dia de antecipação. Embora a variação observada para o caráter DF nas condições de baixo e alto nível de P em Sinop seja relativamente baixa, esse resultado é o mais próximo do verificado por outros autores. Fidelis et al. (2013) observaram que no baixo nível de P no solo o florescimento de arroz de terras altas foi antecipado em um dia, sendo o valor obtido nessa condição estatisticamente diferente do valor de DF do alto nível de P. Cancelier et al. (2010) observaram que a variação do caráter DF em função nos níveis de P foi diferente entre genótipos de arroz de terras altas. Enquanto alguns não apresentaram diferenças significativas entre os níveis de P no solo, outros reduziram em até 6,25 dias quanto submetidos ao estresse por esse elemento. Corroborando com esse resultado, os autores observaram a existência de interação genótipo x nível de P para o caráter DF, o que indica que os genótipos que apresentaram determinado DF em um nível de P, podem não ter mantido o mesmo comportamento em outro nível de P. Assim, a presença desse tipo de interação seria uma das explicações para a divergência de resultados observados em Sinop e Santo Antônio de Goiás.

O efeito de genótipos foi altamente significativo ($p \leq 0,01$) pelo teste F em todos os ambientes analisados. Com o desdobramento desse efeito, foi possível observar que o efeito de progênies, também, foi altamente significativo ($p \leq 0,01$) em todos os ambientes,

demonstrando que existe variabilidade genética disponível na população CNA9 para se obter ganhos com seleção para ciclo de maturação. Por outro lado, foi possível detectar diferenças significativas para o efeito de testemunhas somente em Santo Antônio de Goiás, em ambos os níveis de P (alto e baixo). Em Sinop, não foi observado diferenças significativas entre as médias das testemunhas em nenhum dos níveis de P, revelando que nenhum contraste entre médias foi diferente de zero nesse ambiente.

Em Santo Antônio de Goiás, foram observadas diferenças ao menos significativas ($p \leq 0,05$) entre as médias das progênes $S_{0:2}$ e das testemunhas (efeito de tipo) em ambos os níveis de P no solo. Entretanto, em Sinop, em nenhum dos níveis de P foi verificado diferenças significativas para esse efeito, provavelmente em função do maior erro experimental devido aos mesmos motivos apresentados para o caráter DF, no item anterior, sobre a maior probabilidade de ocorrência de estresse hídrico em solos menos argilosos.

4.2 ANÁLISES DE VARIÂNCIA CONJUNTAS

Na Tabela 12 encontram-se os graus de liberdade (GL) e os quadrados médios (QM) das análises de variância conjunta de locais para cada nível de P no solo (alto e baixo), e de locais e níveis de P, para o caráter produção de grãos (PG, em kg ha^{-1}). Os coeficientes de variação experimental ($CV\%$) foram satisfatórios, não divergindo dos comumente relatados na literatura para o caráter avaliado em arroz de terras altas, com o tipo de parcela adotada (Costa et al., 2002). Os valores variaram entre 17,39 (alto nível de P) e 22,44% (baixo nível de P), que são semelhantes aos que foram observados para as análises individuais por níveis e por locais. Em ambientes com estresses abióticos, tal como a deficiência de P no solo, é comum que o $CV\%$ seja mais elevado quando comparado aos ambientes com condições adequadas de cultivo. Primeiro, porque a média geral em condições de estresse abiótico tende a diminuir por limitar a expressão do potencial genético do caráter; e segundo, porque nessas condições, a heterogeneidade da área experimental tende a se agravar, resultando em um maior erro experimental (Parentoni, 2001). Por exemplo, pequenas variações na disponibilidade de água no solo podem ocorrer entre as parcelas e provocar aumento ou redução na produtividade, e no caso de um mesmo genótipo sofrer esse tipo de variação entre as repetições, essas variações serão então alocadas no erro.

No entanto, neste trabalho, o $CV\%$ do baixo nível de P apresentou maior magnitude, em função da menor média geral e não devido ao maior quadrado médio do erro

Tabela 12 Análises de variância conjunta de locais para cada nível de fósforo (P) no solo (alto e baixo), e de locais e níveis de P, coeficiente de variação experimental ($CV\%$), eficiência do látice ($EL\%$), média geral ($\bar{M}$), média das progêneses $S_{0.2}$ ($\bar{P}$), média das testemunhas ($\bar{T}$), média geral de Santo Antônio de Goiás/GO ($\bar{M}_{SAG}$) e média geral de Sinop/MT ($\bar{M}_{SNP}$), para o caráter produção de grãos, em kg ha⁻¹.

FV	Alto nível de P		Baixo nível de P		FV	Conjunta	
	GL	QM	GL	QM		GL	QM
					Níveis de Fósforo (N)	1351.536.301,6**	
Locais (A)	1	12.664.475,0**	1	8.381.025,0**	Locais (A)	1	20.827.391,8**
Repetições (R)	2	31.905.310,7**	2	21.285.749,7**	Repetições (R)/A/N	4	26.595.530,2**
Blocos/R	52	961.413,7**	52	1.142.939,5**	Blocos/R/A/N	104	1.052.176,6**
Genótipos (G)	195	1.037.715,7**	195	686.519,9**	Genótipos (G)	195	1.228.484,1**
Progêneses (P)	188	933.807,6**	188	547.056,0**	Progêneses (P)	188	997.148,5**
Testemunhas (T)	6	1.952.438,4**	6	629.539,4 ^{ns}	Testemunhas (T)	6	1.805.668,3**
Tipo (P vs T)	1	13.980.880,2**	1	24.338.828,2**	Tipo (P vs T)	1	37.606.287,9**
Interação G x A	195	705.168,8**	195	475.563,2**	Interação G x A	195	861.003,7**
P x A	188	696.927,9**	188	476.647,1**	P x A	188	851.035,6**
T x A	6	755.529,7 ^{ns}	6	327.427,7 ^{ns}	T x A	6	869.644,2*
Tipo x A	1	2.793.349,8**	1	984.956,8 ^{ns}	Tipo x A	1	3.547.901,0**
					Interação G x N	195	496.116,6*
					P x N	188	484.179,2*
					T x N	6	776.814,4 ^{ns}
					Tipo x N	1	713.023,5 ^{ns}
					Interação A x N	1	222.424,1 ^{ns}
					Interação G x A x N	195	318.830,6 ^{ns}
					P x A x N	188	321.582,0 ^{ns}
					T x A x N	6	213.310,9 ^{ns}
					Tipo x A x N	1	230.474,9 ^{ns}
Erro efetivo médio	533	389.961,3	533	345.824,2	Erro efetivo médio	676	398.803,3
$CV\%$		17,39		22,44	$CV\%$		19,53
$EL\%$		112,87		123,10	$EL\%$		108,56
$\bar{M}$		3.449		2.502	$\bar{M}$		2.975
$\bar{P}$		3.423B		2.467b	$\bar{P}$		2.945b
$\bar{T}$		4.176A		3.460a	$\bar{T}$		3.818a
$\bar{M}_{SAG}$		3.577A		2.605A	$\bar{M}_{SAG}$		3.091A
$\bar{M}_{SNP}$		3.322B		2.399B	$\bar{M}_{SNP}$		2.860B

^{ns}, * e **: teste F não significativo, significativo a 5% e 1%, respectivamente; e Médias seguidas de letras distintas são diferentes ao nível de 5% de probabilidade teste de Tukey.

efetivo médio, a que torna a precisão experimental dos dois nível de P no solo equiparáveis para o caráter PG. Esse resultado é condizente com os de outros autores que desenvolveram estudos em condições contrastantes de nível de P no solo. Fidelis et al. (2009) ressaltaram que o ambiente de estresse foi o que mais contribuiu para que o $CV\%$ fosse elevado ao avaliarem populações de milho. Rodrigues et al. (2014) ao avaliaram linhagens de sorgo quanto a eficiência e resposta à aplicação de P, a estimativa de $CV\%$ da ordem de 9,96% no alto nível de P, enquanto que no ambiente com estresse para esse elemento a estimativa

aproximadamente dobrou para 18,39%.

Nas análises de variância conjuntas para o caráter PG, o delineamento látice possibilitou maior controle local no ambiente de baixa disponibilidade de P no solo, com valor de *EL%* igual a 123,10% em relação a 112,87% no ambiente com alta disponibilidade. Essa eficiência do látice no baixo nível de P equivaleria a uso de cinco repetições em delineamento em blocos ao acaso para obter a mesma precisão experimental com quatro repetições em delineamento em látice. Assim, o látice permitiu o melhor controle das pequenas variações que ocorreram na área experimental que tiveram efeitos sobre a expressão fenotípica do caráter PG.

A média geral para o caráter PG nos ambientes sob baixo e alto teor de P no solo variaram de 2.502 kg ha⁻¹ a 3.449 kg ha⁻¹, respectivamente, com uma redução de 27,45% quando houve a restrição desse macronutriente no solo. O contraste entre essas médias diferiu estatisticamente de zero, uma vez que o efeito de níveis de fósforo na análise conjunta de locais e níveis de P foi altamente significativa ($p \leq 0,01$). Assim, verificou-se que a intensidade do estresse provocada pela deficiência de P no solo foi drástica o suficiente para provocar expressiva redução na produtividade dos genótipos e permitiu a discriminação de genótipos quanto a eficiência de absorção e/ou uso desse macronutriente, bem como, responsivos quando em alta disponibilidade no solo.

Na literatura, não existe um critério de intensidade de estresse que deve ser provocado pela deficiência de P em arroz de terras altas, a fim de se discriminar genótipos quanto a tolerância à deficiência desse macronutriente. Cabe destacar que durante o acompanhamento dos experimentos pode-se, visualmente, notar diferenças fenotípicas de perfilhamento, área foliar, vigor das plantas (matéria seca) e quantidade de panículas entre genótipos e entre os níveis de P no solo. De maneira geral, Parentoni et al. (2011) recomendam que a redução da produtividade no baixo nível de P seja entre 40% e 60% para que o desempenho dos genótipos nos dois ambientes não seja correlacionado. Contudo, apesar da redução da produtividade no presente trabalho não ter sido na magnitude recomendada por Parentoni et al. (2011), a mesma foi suficiente para gerar além de contraste entre médias gerais dos níveis de P no solo, gerar interação genótipo x nível de fósforo (GxN) significativa ($p \leq 0,05$), a qual será melhor discutida posteriormente.

As médias das progênies S_{0:2} apresentaram variação entre 2.467 kg ha⁻¹ (baixo nível de P) e 3.423 kg ha⁻¹ (alto nível de P), enquanto que as das testemunhas variaram entre 3.460 kg ha⁻¹ (baixo nível de P) e 4.176 kg ha⁻¹ (alto nível de P). Dessa forma, com a

deficiência de P no solo houve a redução de 27,93% na média do caráter PG para as progênes S_{0:2}, enquanto que para as testemunhas esse valor foi de 17,14%. A menor redução na produtividade destas pela deficiência desse macronutriente no solo, possivelmente deve-se a uma suposta maior eficiência de absorção e/ou uso do P disponível no solo por esses genótipos, porém ainda não validada. Suportando essa consideração, Fidelis et al. (2013) avaliando cultivares de arroz de terras altas, dos quais inclui três dos cultivares que foram utilizados como testemunhas neste presente estudo, não observaram diferença significativa para o caráter PG entre dois níveis contrastantes de P.

Quando submetidas a deficiência de P no solo, um dos mecanismos de tolerância é priorizar o crescimento do sistema radicular em detrimento a parte aérea. Grande parte dos fotoassimilados que são produzidos na parte aérea são translocados ao sistema radicular como forma de garantirem maior expansão do sistema radicular no solo e, dessa forma, aumentar a possibilidade de aquisição de P (Wissuwa e Ae, 2001a, Crusciol et al., 2005). Nessa mesma condição, Fageria et al. (2004) relatam que, dependendo da intensidade do estresse, o número de panículas e a produção de grãos podem ser reduzidos em até 90% e 98%, respectivamente.

Com o desdobramento, foi possível observar que a diferença entre as médias das progênes S_{0:2} (2.945 kg ha⁻¹) e das testemunhas (3.818 kg ha⁻¹) foi altamente significativa ($p \leq 0,01$) pelo teste F, independentemente do local e do nível de P no solo. Assim, o resultado da produtividade média dessas progênes ter sido 22,86% menor que a das testemunhas corrobora com o fato da população CNA9 ainda ser pouco melhorada para o caráter PG e, por isso, apresenta ainda baixa concentração de alelos favoráveis para esse caráter. Além disso, essas progênes S_{0:2} possuem o gene de macho esterilidade genética, em segregação, com a frequência de $\frac{3}{8}$ de plantas macho estéreis (*msms*) dentro de progênes S_{0:2}, as quais contribuem para a redução do potencial produtivo das mesmas.

Do outro lado, os sete cultivares utilizados como testemunhas (BRS Esmeralda, BRS Bonança, BRS Monarca, BRS Pepita, BRS Primavera, BRS Sertaneja e BRSGO Serra Dourada) referem-se aos mais recentes lançamentos pelo programa de melhoramento genético de arroz da Embrapa, os quais possuem os mais elevados potenciais produtivo até hoje já alcançados por esse programa (Breseghello et al., 2009; Colombari Filho et al., 2013). Durante o processo de desenvolvimento de novos cultivares por esse programa, as melhores linhagens são selecionadas com base em experimentos conduzidos em diferentes locais e anos (ambientes). Nesses ambientes é esperada variações edafoclimáticas diversas, com

diferentes teores de argila, disponibilidade de água e, de P no solo, por exemplo, para onde posteriormente serão recomendados como novos cultivares. Dessa forma, as linhagens ao serem selecionadas com base na média de diversos locais e anos, consequentemente, espera-se que estejam sendo selecionadas aquelas de maior potencial produtivo para os mais diversos ambientes alvo (Colombari Filho et al., 2013).

Foram observadas diferenças altamente significativas ($p \leq 0,01$) pelo teste F para o efeito de genótipos nas análises conjuntas de locais para cada nível de P no solo, assim como na análise conjunta de locais e níveis de P. Com o desdobramento desse efeito, observou-se diferenças altamente significativas ($p \leq 0,01$) para o efeito de progênies $S_{0:2}$ nas análises conjuntas para cada nível de P no solo, os quais estão livres da interação com locais e, também, na análise conjunta de locais e níveis de P, o qual está livre das interações com locais e com níveis de P. Esses resultados sugerem que existe variabilidade genética entre as progênies $S_{0:2}$ da população CNA9 para obtenção de ganhos com seleção para maior potencial produtivo em ambientes com alta disponibilidade de P no solo, assim como para maior eficiência de absorção e/ou uso do P disponível em solo com deficiência desse macronutriente. Na condição de alto nível de P no solo, o efeito de testemunhas foi altamente significativo ($p \leq 0,01$), porém não foi significativo no baixo nível de P, possivelmente devido a redução da expressão do potencial produtivo desses genótipos, que gerou menor amplitude da variação fenotípica das médias, que aliada a um menor grau de liberdade, não permitiu a detecção de pelo menos um contraste diferente de zero, uma vez que o quadrado médio desse efeito foi inclusive superior ao observado para o efeito de progênies.

Os dois locais utilizados apresentaram médias gerais significativamente diferentes ($p \leq 0,01$), que pôde ser observado tanto pelo teste F para o efeito de locais, quanto pelo teste de Tukey para a média de locais. Dessa forma, as diferenças edafoclimáticas existentes entre Santo Antônio de Goiás e Sinop tiveram efeito sobre o caráter PG independentemente do nível de P no solo, ocasionando respostas diferentes dos genótipos em cada local, com médias 8% superiores no primeiro ambiente.

De acordo com Heinemann e Sentelhas (2011), o ambiente em que é situado Sinop é considerado altamente favorável para a produção de arroz de terras altas, enquanto Santo Antônio de Goiás, é apenas favorável. Em teoria, no primeiro local é onde deveria ter sido observada as maiores médias para o caráter PG, mas conforme visto anteriormente, esse fato não ocorreu. Uma das possíveis causas seria a disponibilidade de água, onde em Santo Antônio de Goiás houve irrigação suplementar por aspersão sempre que necessário,

enquanto em Sinop não houve. Além disso, existe a diferença no teor médio de argila entre os dois locais, que em Santo Antônio de Goiás é de 63%, e em Sinop de 32%, que interfere na capacidade de armazenamento de água, na retenção de cátions e na adsorção de P pelo solo, tendo influência, portanto, no caráter PG. Nesse sentido, cabe ressaltar que sendo o caráter PG fortemente afetado pelas condições ambientais, a diversidade de ambientes que o arroz de terras altas pode ser cultivado, poderia dificultar ainda mais o processo de seleção para tolerância à deficiência de P no solo.

Observou-se diferenças altamente significativas ($p \leq 0,01$) pelo teste F para o efeito da interação genótipo x local (GxA) na análise conjunta de locais para cada nível de P no solo e na conjunta de locais e níveis de P. Com o desdobramento desse efeito de interação, igualmente, verificou-se que houve interação altamente significativa ($p \leq 0,01$) entre progênies e locais (PxA), havendo assim a existência de diferenças no comportamento das progênies $S_{0:2}$ entre os locais, podendo ser essa interação do tipo simples ou complexa. A interação simples seria devido à ocorrência de diferenças na variabilidade entre as progênies nos dois locais, e a complexa, devido a ocorrência de ausência de correlação entre médias de uma mesma progênie entre os dois locais (Vencovsky e Barriga 1992). As testemunhas não apresentaram interação com locais (TxA) significativa nas análises conjunta de locais para cada nível de P no solo, em função dos menores graus de liberdade desse efeito e do erro efetivo médio, das análises para cada nível de P no solo, que não devido a este, passou a ser significativo ($p \leq 0,05$) na análise conjunta de locais e níveis de P.

A interação genótipo x ambiente (GxE) é o fator mais importante a ser considerado em um programa de melhoramento genético, pois interfere não só na recomendação de cultivares, como, também, dificulta a seleção dos genótipos superiores para diferentes ambientes. Os melhoristas procuram desenvolver cultivares que possam expressar baixa interação e manter sua produtividade estável nos diferentes ambientes. Mas conforme citado anteriormente, existe uma diversidade de ambientes na região do cerrado brasileiro, onde a produção de arroz de terras altas é realizada, que impede que seja definido um único ideotipo de planta para todos os ambientes existentes. Apesar da interação GxE trazer desvantagens quando o objetivo é desenvolver genótipos de adaptação ampla, ela traz vantagens quando há a oportunidade de desenvolver genótipos para adaptações específicas a um ambiente característico, pois assim a interação GxE pode ser favoravelmente capitalizada, possibilitando a obtenção de cultivares de elevado potencial produtivo a ser explorado regionalmente (Annicchiarico, 2002).

A interação tipo x local não foi significativa apenas para a análise conjunta de locais no baixo nível de P no solo. Isso demonstrou que em condições de estresse as progênies S_{0:2} e as testemunhas apresentaram comportamentos semelhantes nos dois locais, enquanto na condição de alto nível de P no solo o efeito de local afetou o caráter PG das progênies S_{0:2} de forma diferente das testemunhas.

Na análise conjunta de locais e níveis de P, o efeito da interação genótipo x nível de P (GxN) foi significativo ($p \leq 0,05$) pelo teste F para o caráter PG. Com o desdobramento desse efeito, observou-se que as interações testemunha x nível de P (TxN) e tipo x nível de P não foram significativas, o que demonstrou para aquela, que os cultivares avaliados se comportaram de modo semelhante em cada um dos níveis de P no solo; e para esta, que as progênies S_{0:2} e as testemunhas apresentaram comportamentos semelhantes nos dois níveis de P no solo. Porém, verificou-se que a interação progênie x nível de P (PxN) foi significativa, ou seja, as progênies S_{0:2} que tiveram desempenho superior no alto nível de P no solo podem não ter apresentado comportamento semelhante no ambiente em que houve a restrição desse elemento no solo.

Analizando-se a magnitude dos quadrados médios dos efeitos das interações TxN e PxN, é possível verificar que o primeiro foi 1,6 vezes superior ao segundo, assim sendo, a não significância do teste F da interação TxN talvez não seja devido ao menor grau de liberdade de testemunhas. O maior efeito da interação PxN é condizente com a constituição genética das progênies S_{0:2} da população CNA9, verificada pelas significâncias do efeito de progênie nas análises conjuntas de locais para cada nível de P no solo. Ou seja, a população CNA9 possui variância genética para eficiência na absorção e/ou uso no P disponível no solo, assim como, variância genética para resposta a solos com alta disponibilidade P, ou a combinação de ambas, conforme a Fageria & Kluthcouski (1980). Portanto, podem existir progênies que sejam eficientes na absorção e/ou uso do P, mas não sejam responsivas quando em alto nível desse elemento químico no solo, contribuindo, assim, para um comportamento diferente da progênie em cada nível de P.

As testemunhas são linhagens endogâmicas, enquanto as progênies S_{0:2}, que correspondem a geração F_{2:4}, possuem variância genética dentro igual a $\frac{3}{4} \sigma_A^2 + \frac{3}{8} \sigma_D^2$ (Cockerham, 1966). Portanto, além da variabilidade genética existente entre progênies, igual a $\sigma_A^2 + \frac{1}{16} \sigma_D^2$, existe variabilidade dentro das mesmas que igualmente tende a apresentar interação com locais e níveis de P no solo dependendo da eficiência na absorção e/ou uso no

P disponível no solo das plantas dentro de cada progênie, assim como da resposta a disponibilidade P.

Na literatura, existe certa divergência de resultados sobre a significância do efeito da interação GxN. Cancellier et al. (2010) estudando cultivares de arroz de terras altas quanto ao uso e eficiência de P não observaram diferença significativa para o efeito de cultivar x nível de P. O mesmo resultado foi verificado por Tonello et al. (2012) e Fidelis et al. (2013) que, também, avaliaram cultivares de arroz de terras altas em níveis contrastantes de P no solo. Já os trabalhos de Guimarães et al. (2007) e Rotili et al. (2010) com linhagens e cultivares de arroz de terras altas, respectivamente, demonstraram a existência de interação altamente significativa ($p \leq 0,01$) entre genótipo x nível de P.

Conforme Blum (1988), citado por Parentoni (2001), em geral, os genótipos que são mais adaptados as condições de estresse abiótico normalmente não apresentam desempenho superior quando submetidos a ambientes com ausência do estresse. A magnitude e significância da interação entre genótipo e nível de P, dentre outros fatores, dependeriam do número e do conjunto de genótipos avaliados. Um baixo número de genótipos avaliados em poucas repetições experimentais faz com que seja mais difícil detectar significância para esse efeito, devido ao reduzido número de graus de liberdade. Os genótipos, de acordo com sua constituição genética, podem expressar comportamento diferenciado quando submetidos a níveis distintos P. Quanto maior for a semelhança genética para alelos referentes a tolerância a solos com deficiência de P, menor será a magnitude do efeito da interação de genótipos com níveis desse elemento, uma vez que eles possivelmente apresentarão o mesmo comportamento.

O efeito da interação GxN é uma informação importante para um programa de melhoramento que tem como objetivo desenvolver genótipos com tolerância a solos com baixo nível de P. No caso desse efeito ser significativo, genótipos eficientes e responsivos para P podem ser identificados somente se forem testados em níveis contrastantes de P. Diante desse fato, se torna dificultoso para o programa estabelecer experimentos para se determinar esse caráter, principalmente em função da prospecção de áreas sem histórico de adubação. Alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos com solução nutritiva de P e vasos com substratos, o que facilita o processo de fenotipagem e possibilita a seleção precoce para tolerância a deficiência de fósforo (Fageria et al., 1988; Fageria e Baligar, 1997; Ni et al., 1998, Oliveira et al., 1999; Sávio et al., 2010). Entretanto, alguns autores, como Parentoni et al. (2011) afirmam que pode existir baixa correlação entre os trabalhos realizados a campo

e os realizados por meio desses métodos, e que apesar de oneroso, o mais confiável é a condução de experimentos a campo com níveis contrastantes de P.

Ainda sobre a interação GxN, vale ressaltar que sua magnitude pode variar conforme a intensidade do estresse provocada pela deficiência de P no solo. Nas situações em que o nível de estresse não é adequado, ou seja, capaz de reduzir consideravelmente a média do caráter PG, é verificada uma correlação relativamente alta entre o desempenho dos genótipos nos níveis contrastantes de P (Parentoni et al., 2011). Portanto, a presença significativa dessa interação, associada o efeito significativo que foi observado para de níveis de P, demonstra o bom planejamento e condução dos experimentos referentes ao presente estudo.

A determinação da interação GxN pode ser ainda importante, pois, conforme propõem Atlin et al. (1989), essa estimativa pode ser utilizada como critério de escolha dos ambientes de seleção que melhor representem o ambiente alvo, o qual possui determinado tipo de estresse. Os autores afirmam que essa estratégia é válida principalmente quando determinada espécie é cultivada em diversos ambientes de produção, tal como o arroz, pois permite a identificação de classes de produção ambientais dentro de grandes regiões. Dessa forma, objetivos específicos de melhoramento para cada uma delas podem ser definidos pelo programa de melhoramento.

O efeito da interação local x nível de P (AxN) não foi significativo. Portanto, a resposta dos genótipos às variações nos níveis de P não foram alteradas conforme o local. Nesse sentido, um genótipo identificado como eficiente a absorção e/uso do P em um local, apresenta o mesmo comportamento no outro local.

Também não foram observadas diferenças significativas para a interação genótipo x ambiente x nível de P (GxAxN), o que demonstra que os genótipos não tiveram um comportamento diferenciado dada a combinação desses três fatores de variação. Sendo esse tipo de interação de difícil interpretação. O fato de não ter sido significativa, indica que maior parte das variâncias devido as interações presentes na variância fenotípica são do tipo simples, as quais são mais facilmente compreendidas e tratadas.

4.3 ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS QUANTITATIVOS

Na Tabela 13 estão apresentadas as estimativas das variâncias genéticas entre as progênes $S_{0:2}$ ($\hat{\sigma}_p^2$), das variâncias da interação progênie x local ($P \times A$, $\hat{\sigma}_{pa}^2$), das variâncias

da interação progênie x nível de P ($P \times N$, $\hat{\sigma}_{pn}^2$), das variâncias da interação progênie x local x nível de P ($P \times A \times N$, $\hat{\sigma}_{pan}^2$), das variâncias ambientais ($\hat{\sigma}^2$), dos coeficientes de herdabilidade entre médias de progênies $S_{0:2}$ ($\hat{h}_p^2$), seus respectivos intervalos de confiança, e dos índices de variação (b), obtidos a partir da análise de variância conjunta de locais para os níveis alto e baixo de P no solo; e, de locais e níveis de P.

Tabela 13 Estimativas dos parâmetros genéticos para o caráter produção de grãos (kg ha^{-1}), com seus respectivos limites superiores (LS) e inferiores (LI) dos intervalos de confiança. Variância genotípica entre progênies $S_{0:2}$ ($\hat{\sigma}_p^2$), variância da interação progênie x local ($\hat{\sigma}_{pa}^2$), variância da interação progênie x nível de fósforo ($\hat{\sigma}_{pn}^2$), variância da interação progênie x local x nível de fósforo ($\hat{\sigma}_{pan}^2$), variância ambiental ($\hat{\sigma}^2$), coeficiente de herdabilidade entre médias de progênies $S_{0:2}$ ($\hat{h}_p^2$) e índice de variação (b) obtidos pelas análises de variância conjuntas de locais por nível de P no solo (alto e baixo); e, de locais e níveis de fósforo (conjunta).

Parâmetros	Alto nível de P	Baixo nível de P	Conjunta
LS	203.463,6	109.169,6	110.730,1
$\hat{\sigma}_p^2$	135.961,6	50.307,9	74.793,1
LI	97.648,5	30.641,9	55.080,6
LS	135.917,7	110.343,8	87.405,7
$\hat{\sigma}_{pa}^2$	76.741,7	32.705,7	56.529,0
LI	49.424,3	17.491,6	39.599,7
LS	-	-	108.337,2
$\hat{\sigma}_{pn}^2$	-	-	10.672,0
LI	-	-	4.709,6
LS	-	-	-4.577,1
$\hat{\sigma}_{pan}^2$	-	-	-9.652,7
LI	-	-	-43.371,4
LS	456.141,0	404.513,6	444.983,0
$\hat{\sigma}^2$	389.961,2	345.824,2	398.803,3
LI	337.252,0	299.080,8	359.482,4
LS	67,42	50,68	67,95
$\hat{h}_p^2$	58,24	36,78	60,00
LI	45,98	18,22	49,33
b	0,62	0,41	0,48

Por meio dos intervalos de confiança (IC) verificou-se que em todas as análises as estimativas de $\hat{\sigma}_p^2$ tiveram precisões satisfatórias em função de amplitude não ter sido elevada, bem como diferiram estatisticamente de zero ($\alpha=0,05$). Observou-se maior magnitude de $\hat{\sigma}_p^2$ para o alto nível de P e na conjunta quando comparado ao baixo nível de P, indicando a existência de variância genética entre as progênies $S_{0:2}$ da população CNA9, com a presença de indivíduos responsivos ao aumento de P no solo. Entretanto, essa inferência deve ser feita com cautela, uma vez que houve a sobreposição do limite inferior

do alto nível de P com o limite superior do baixo nível de P. A menor estimativa de $\hat{\sigma}_p^2$ no baixo nível de P indica que nesse ambiente as progênies tendem a apresentar menor contraste entre médias, o que dificulta o processo de seleção, sendo esse resultado condizente com os observados por Rosielle & Hamblim (1981) em situações de estresses abióticos.

Observou-se que as estimativas de $\hat{\sigma}_{pa}^2$ diferiram estatisticamente de zero ($\alpha=0,05$), em todas as análises, com amplitude de IC satisfatório. No entanto, as magnitudes de $\hat{\sigma}_{pa}^2$ não foram semelhantes entre os níveis de P no solo, de modo que no alto nível de P essa estimativa apresentou-se mais que duas vezes superior a do baixo nível. Possivelmente, o estresse por deficiência de P no solo ocasiona menor interação dos genótipos com locais devido a menor capacidade das progênies responderem as diferentes variações edafoclimáticas. Por exemplo, mesmo que em determinado local se tenha melhor disponibilidade água e temperaturas mais amenas favorecendo, assim, a fotossíntese, não ocorre um melhor desempenho dos genótipos, já que o baixo nível de P será um fator limitante nesse processo. No entanto, os resultados devem ser observados com cautela, uma vez que houve a sobreposição dos intervalos de confiança, de modo que não há diferença estatística entre os valores de $\hat{\sigma}_{pa}^2$.

A estimativa $\hat{\sigma}_{pn}^2$ apresentou amplitude semelhante as das estimativas da variância de progênies com locais ($\hat{\sigma}_{pa}^2$), como, também, diferiu estatisticamente de zero ($\alpha=0,05$). No entanto, a interação com níveis afetou menos o comportamento das progênies comparado com a interação com locais, uma vez que a magnitude de $\hat{\sigma}_{pn}^2$ foi 5,3 vezes menor que a que $\hat{\sigma}_{pa}^2$, apesar de não diferirem estatisticamente entre si. A magnitude da interação de genótipos por ambientes (nesse caso incluindo $\hat{\sigma}_{pa}^2$ e $\hat{\sigma}_{pn}^2$) pode ser um indicativo que a população possui alelos para a adaptação a ambientes menos favoráveis (Atlin & Frei, 1990).

Notou-se que a estimativa de $\hat{\sigma}_{pan}^2$ apresentou valor negativo e, portanto, considera-se não diferente de zero. Nesse caso, a ausência desse componente de variância, por ter tido valor igual a zero, era esperada em função o quadrado médio do efeito da interação PxAxN ter tido magnitude baixa e inferior ao quadrado médio do erro efetivo médio.

Observou-se que as estimativas de $\hat{\sigma}^2$ foram semelhantes no alto e baixo nível de P, como, também, na análise em que foram considerados ambos os níveis. Por meio do intervalo de confiança observou-se que os valores de $\hat{\sigma}^2$ tiveram precisão satisfatória devido a pequena amplitude dos mesmos, bem como, diferiram estatisticamente de zero ($\alpha=0,05$).

Dessa forma, tanto as estimativas de $\hat{\sigma}^2$ foram satisfatórias para se viabilizar o estudo dos demais parâmetros em todas as condições de alto e baixo nível de P.

As estimativas de $\hat{h}_p^2$ apresentaram precisões satisfatórias com base em seus respectivos intervalos de confiança, com amplitude semelhantes nos diferentes níveis de P. As estimativas desse parâmetro diferiram estatisticamente de zero ($\alpha=0,05$), mas a sobreposição de intervalos de confiança indica que a $\hat{h}_p^2$ pode não diferir nos casos avaliados e, por isso, suas estimativas devem ser analisadas com cautela. Verificou-se que nos maiores níveis de P (alto nível e conjunta) as estimativas de $\hat{h}_p^2$ apresentaram magnitude similar. Na condição de baixo nível de P observou-se uma acentuada redução na estimativa de $\hat{h}_p^2$, principalmente em função da menor $\hat{\sigma}_p^2$ que foi obtida para esse ambiente. Santos et al. (2003) de forma semelhante, observaram em condições em que o nitrogênio foi restrito no solo, a herdabilidade ao nível de famílias foi reduzida a um terço da que foi estimada no ambiente com alto nível desse elemento. Dessa forma, se tem claramente demonstrado que a seleção de genótipos tolerantes para deficiência de P por meio do caráter PG na população CNA9 não pode ser realizada com a mesma acurácia e eficiência nos ambientes com baixo e alto nível de P.

Em geral, espécies que passaram por um longo período de melhoramento, tal como o arroz, tendem a apresentar maior variância genética para condições favoráveis de cultivo, o que eleva a magnitude da herdabilidade nesse ambiente. Em alguns casos, pode ocorrer da herdabilidade em condições de estresse ter maior magnitude do que as sem estresse, quando os caracteres adaptativos são expressos somente quando os genótipos são submetidos a determinado ambiente. Assim, pela magnitude da variância genética em diferentes ambientes ser específica da cultura, deve-se ter cautela ao aplicar métodos de melhoramento genético para tolerância à deficiência de P, desenvolvidas para outras culturas, no arroz de terras altas (Ceccarelli, 1989).

O índice de variação genética (b), o qual corresponde a proporção da variabilidade genética ($CV_g\%$) em relação ao erro ($CV_e\%$), possibilita melhor interpretação das variâncias, já que não considera o efeito das médias do caráter avaliado e, portanto, não favorece ou desfavorece um ou outro nível de P. Por meio desse índice pode-se verificar se determinada situação é ou não favorável a seleção, sendo que valor de b igual ou superior a unidade, indica uma situação muito favorável para a seleção (Vencovsky, 1987). Em geral, as estimativas dos índices b foram baixas, variando de 0,41 (baixo nível de P) a 0,62 (alto

nível de P), o que evidencia a alta influência ambiental sobre a variação do caráter PG, sendo que esse efeito tendeu a ser mais pronunciado no ambiente com deficiência de P no solo.

Outros autores, com outras culturas e elementos químicos, também, observaram menor estimativa de b no ambiente com estresse abiótico. Santos et al. (1998), avaliando uma população de seleção recorrente de milho em níveis contrastantes de nitrogênio (N), verificaram valores de b iguais a 0,92 e 0,84, no alto e baixo nível desse elemento no solo, respectivamente. Nessa mesma população, a qual foi avaliada após três ciclos de seleção em condições semelhantes, foram estimados valores de b de 0,87 no alto nível de N e 0,48 no baixo nível de N (Santos et al., 2003).

De um modo geral, todas as estimativas correspondentes ao baixo nível de P no solo foram mais baixas, já que em decorrência desse estresse abiótico houve redução na amplitude da variação fenotípica entre médias de progênies $S_{0:2}$ da população CNA9 para o caráter PG. Entretanto, isso não impede que se tenha sucesso com a continuidade dos ciclos de seleção na população CNA9, considerando a própria natureza do programa de seleção recorrente. Em adição, existe variabilidade genética disponível para ser explorada sob condições de deficiência de P no solo, embora os ganhos com a seleção nesse ambiente possam ser menores do que no alto nível de P, em função das menores estimativas de $\hat{h}_p^2$ e de b . Os resultados obtidos confirmam a variabilidade genética entre genótipos de arroz para condições de deficiência de P no solo, sendo coerente com o verificado por Fageria et al. (1988b), Fageria et al. (1988a) e Wissuwa et al. (2001b).

4.4 CORRELAÇÕES FENOTÍPICA, GENÉTICA E AMBIENTAL ENTRE CARACTERES

Na Tabela 14 estão disponíveis as estimativas das correlações fenotípicas (r_F), genéticas (r_G) e ambientais (r_E) entre os caracteres produção de grãos (PG, em kg ha⁻¹), altura de planta (AP, em cm) e dias para o florescimento (DF, em dias). As correlações permitem verificar se a seleção em determinado caráter irá provocar a variação em outro, de tal modo que se tem uma estimativa da relação entre dois caracteres na população sob seleção (Cruz et al., 2012).

Observou-se que a estimativa r_F entre os caracteres PG e AP não foi significativa no alto nível de P, demonstrando que nesse ambiente não se pôde observar diretamente essa

Tabela 14 Estimativas de correlações fenotípicas (r_F), genéticas (r_G) e ambientais (r_E), para cada nível de P no solo (alto e baixo), entre os caracteres produção de grãos (PG, em kg ha⁻¹), altura de planta (AP, em cm) e dias para o florescimento (DF, em dias).

Caracteres	Parâmetros	Alto nível de P	Baixo nível de P
PG, AP	r_F	0,090 ^{ns}	0,158**
	r_G	0,363**	0,385**
	r_E	0,297**	0,530**
PG, DF	r_F	-0,022 ^{ns}	-0,074 ^{ns}
	r_G	0,253**	-0,141*
	r_E	-0,063 ^{ns}	-0,217**
AP, DF	r_F	-0,050 ^{ns}	-0,034 ^{ns}
	r_G	0,201**	0,258**
	r_E	-0,183**	-0,192**

^{ns}, * e **: teste t não significativo, significativo a 5% e 1%, respectivamente.

associação (Falconer, 1987). De modo contrário, no baixo nível de P, houve correlação fenotípica entre PG e AP altamente significativa ($p \leq 0,01$), com baixa magnitude e sentido positivo. O grande número de genótipos que foram avaliados, e dessa forma, um elevado número de graus de liberdade, permitiram que até mesmo em estimativas de baixa magnitude ($r_F = 0,158$) fossem detectadas significância. Guimarães et al. (2007) avaliando linhagens de arroz de terras altas na condição de baixa disponibilidade de P no solo, também, verificaram uma correlação fenotípica positiva entre PG e AP, porém, com maior magnitude ($r_F = 0,312$).

A correlação fenotípica é composta por causas genéticas e ambientais, sendo que as genéticas são as de interesse para poder direcionar o programa de melhoramento, uma vez que somente esse tipo de associação é herdável (Falconer, 1987). Entre os caracteres PG e AP as correlações genéticas (r_G) observadas no alto e no baixo nível de P foram altamente significativas ($p \leq 0,01$), pelo teste t, com sentido positivo e com magnitude semelhantes. Dessa forma, pode-se afirmar que a restrição de P no solo não teve influência na r_G entre esses dois caracteres.

Porém, essa correlação não é muito favorável para o melhoramento genético do arroz de terras altas, já que o objetivo é desenvolver cultivares de elevada produtividade e porte baixo. Plantas mais altas normalmente são mais propensas ao acamamento, gerando perdas na produção de grãos (Guimarães et al., 2002), além de inviabilizar a adoção de certas técnicas de manejo para a cultura, tais como adubação em maiores níveis de fertilizantes nitrogenados, que permite elevar a média do caráter PG por área. Vale ressaltar que no baixo nível de P, possivelmente, seria mais fácil praticar a seleção para ambos os caracteres simultaneamente, já que existe a correlação fenotípica significativa no mesmo sentido, embora com menor magnitude do que a genética. De acordo Falconer (1987), magnitudes e

sentidos semelhantes entre as correlações genéticas e fenotípicas evidenciam a correspondência entre o que é observado fenotipicamente e o que se tem geneticamente.

Segundo o mesmo autor, a correlação genética positiva entre dois caracteres é geralmente ocasionada pelo pleiotropismo e desequilíbrio de ligação gênica. O pleiotropismo diz respeito quando um gene influencia dois ou mais caracteres, de modo que no presente estudo um mesmo gene teria influência na expressão fenotípica dos caracteres PG e AP. O desequilíbrio de ligação corresponde a associação não aleatória de alelos localizados em determinado loco. Dessa forma, pode ser considerado um caráter transitório, uma vez que com a recombinação gênica esse efeito pode ser suprimido.

As correlações ambientais (r_E), em ambos os níveis de P, apresentaram-se altamente significativas ($p \leq 0,01$) e positivas. Assim, dentro de cada nível de P no solo, os locais contribuíram para que as progênies que fossem mais altas, também, fossem as mais produtivas. A maior magnitude da correlação ambiental entre PG e AP no baixo nível de P evidencia que nesse ambiente a correlação ambiental é a mais determinante na correlação fenotípica. Possivelmente, esse estresse abiótico faz com que as plantas de arroz sejam mais propensas as variações ambientais, de modo que as diferentes condições edafoclimáticas aumentam ou reduzem a média dos dois caracteres simultaneamente. Essa afirmação corrobora com as discussões anteriores, em que as menores estimativas de $\hat{h}_p^2$ e b foram verificadas para o caráter PG no baixo nível de P, as quais evidenciam a maior influência ambiental em detrimento a variação genética para esse caráter.

Observou-se que r_F entre os caracteres PG e DF nos níveis alto e baixo de P não foram significativas. Em relação as correlações genéticas, verificou-se em ambos os níveis de P foram ao menos significativas ($p \leq 0,05$), mas com baixas magnitudes e direções opostas em cada um dos níveis. No alto nível de P a r_G positiva entre esses caracteres já era esperada, o que indica que os genótipos mais produtivos foram os que tiveram um maior ciclo. E no baixo nível de P, observou-se r_G negativa entre PG e DF, ou seja, os genótipos mais produtivos foram os que apresentaram menor período de estágio vegetativo.

Na cultura do arroz, os estádios reprodutivo e de maturação possuem duração relativamente constante, sendo o estágio vegetativo o mais variável em função das condições edafoclimáticas e do ciclo da planta (Guimarães et al., 2002). Durante as fases iniciais de desenvolvimento, a planta acumula P sob a forma orgânica nas folhas e caules e, posteriormente, redistribui esse elemento internamente, por exemplo, para a formação dos primórdios florais (Grant et al., 2001; Vance et al., 2003).

Em situações de baixa disponibilidade de P, plantas ineficientes em absorver esse elemento do solo prolongam o estágio vegetativo, provavelmente na tentativa de acumularem certo nível de P que seja suficiente para a síntese de compostos relativos aos estádios subsequentes de desenvolvimento. No entanto, isso deve ser possível até certo ponto, no qual mesmo com baixo conteúdo de P interno inicia-se o estágio reprodutivo, o que afeta posteriormente a produção de grãos. Aliado a esse fator, a planta pode ainda apresentar menor capacidade de translocação interna de P, aumentando a duração do estágio vegetativo. Portanto, a presença de correlação negativa entre PG e DF no baixo nível de P é um indicativo de que parte das progênies S_{0:2} da população CNA9 podem não ser eficientes no processo de absorção e/ou uso do P, apresentando maior ciclo vegetativo e menor produção de grãos.

Provavelmente, as progênies S_{0:2} eficientes na absorção de P, em condições de deficiência desse elemento no solo, devam possuir um mecanismo adaptativo de estrutura radicular. A população CNA9 possui em seu *background* genético alta percentagem de participação dos cultivares IAC 25 e IAC 47, portadores do QTL *Pup1*, o qual promove um incremento no crescimento radicular em situações de deficiência de P (Chin et al., 2010; Chin et al., 2011). É razoável o fato de que parte das progênies dessa população não apresente nenhum mecanismo de tolerância, já que a população utilizada como base (CNA-IRAT 5) e os genitores com resistência a brusone e tolerantes à deficiência hídrica, que, também, foram recombinados para dar origem a essa população, não são validados como eficientes e/ou responsivos ao P.

Foi observada correlação ambiental entre os caracteres PG e DF altamente significativa ($p \leq 0,01$) somente no baixo nível de P, sendo essa de baixa magnitude e com sentido negativo. Esse resultado evidencia, mais uma vez, como a influência das variações ambientais sobre os caracteres é favorecida pela deficiência de P, sendo que nesse caso, as condições edafoclimáticas que fizeram com que a duração da fase vegetativa das progênies fosse maior, fizeram com que a média do caráter PG fosse reduzida. Como exemplo, pode ser citada a ocorrência de deficiência hídrica (“veranicos”), em que ocasiona tanto o retardamento da floração, como, também, reduz consideravelmente o caráter PG, já que aumenta a ocorrência de espiguetas estéreis (Guimarães et al., 2002).

Conforme observado, o sentido das correlações genéticas e ambientais entre os caracteres PG e DF no baixo nível de P foram os mesmos, ou seja, negativos. Nesse caso, de acordo com Falconer (1987), há um indício de que as causas das variações genéticas e do

ambiente foram ocasionadas pelo mesmo mecanismo fisiológico.

A correlação fenotípica entre os caracteres AP e DF não foi significativa para nenhum dos níveis de P no solo. Em relação as correlações genéticas, essas demonstraram-se altamente significativas ($p \leq 0,01$), com magnitudes baixas e com sentido positivo, sendo, portanto, relativamente semelhantes em ambos os níveis de P. Pode-se inferir que a restrição de P no solo não influenciou a associação entre AP e DF na população CNA9, de modo que, plantas que apresentaram maior DF foram as que apresentaram maior AP independentemente do nível de P.

As estimativas de correlação ambiental entre AP e DF foram altamente significativas ($p \leq 0,01$) e semelhantes nos dois níveis de P. A baixa magnitude dessa associação demonstra que a correlação fenotípica entre AP e DF é mais determinada por causas genéticas do que ambientais. Isso já era esperado, pois estudos demonstram que esses caracteres normalmente apresentam alta herdabilidade (Morais et al., 1997; Cordeiro e Rangel, 2011). Já o sentido dessa correlação, a qual foi negativo, indica que as variações nas condições edafoclimáticas aumentaram o número de DF, porém, reduziram o caráter AP.

O ideotipo que o programa de melhoramento de arroz de terras altas objetiva são genótipos que tenham média elevada para o caráter PG, mas que apresentem porte baixo e que sejam precoces. Considerando-se o sentido das correlações genéticas (r_G) entre os caracteres entre PG, AP e DF no baixo nível de P, seria possível selecionar plantas tolerantes a deficiência de P que tenham menor AP e DF, mas com alguma dificuldade de obter um rápido progresso genético devido ao fato de haver correlação positiva entre PG e AP. Todavia, como esta foi de baixa magnitude na população CNA9, não impede a obtenção de respostas divergentes no que concerne esses dois caracteres.

Na situação em que houve a deficiência de P no solo, verificou-se maior influência ambiental na associação entre os caracteres comparada ao alto nível de P. Esse resultado sugere que, no ambiente com estresse, deve-se ter a preocupação ainda maior em se reduzir as variações ambientais (Parentoni, 2001; Parentoni et al., 2011). Como medidas para a redução das variações não planejadas, tem-se, por exemplo, o aumento no número de repetições e a boa condução dos experimentos, sendo que nessa última está incluso, maior detalhamento dos sítios de fenotipagem. Nesse sentido, ajustes podem ser realizados visando a uniformização das condições de avaliação com consequente redução da variação ambiental.

4.5 RESPOSTA ESPERADA COM SELEÇÃO

Na Tabela 15 encontram-se as respostas esperadas com a seleção de progêneses $S_{0:2}$ (Rs) por meio de diferentes critérios seletivos em função dos ambientes com diferentes níveis de P no solo (alto e baixo), para uma intensidade de seleção de 15%.

Tabela 15 Resposta esperada com a seleção de progêneses $S_{0:2}$ para o caráter produção de grãos (PG, em kg ha⁻¹) com base em diferentes critérios seletivos, para cada nível de P no solo (alto e baixo), e intensidade de seleção de 15%.

Intensidade de seleção de 15%.				PG		
Tipo	Seleção	Resposta	Média	<i>Rs</i>	Diferença Absoluta	
				Absoluto		%
Alto nível de P						
I	Alto	Alto	$\bar{X}_s = 4.154$	425,74	12,44	0,00
II	Baixo	Alto	$\bar{X}_s = 3.852$	250,38	7,32	-175,36
III	Média	Alto	$\bar{X}_s = 4.099$	393,80	11,51	-31,94
		Alto	$\bar{X}_0 = 3.423$			
Baixo nível de P						
II	Alto	Baixo	$\bar{X}_s = 2.620$	56,59	2,29	-175,28
I	Baixo	Baixo	$\bar{X}_s = 3.097$	231,87	9,40	0,00
III	Média	Baixo	$\bar{X}_s = 3.045$	212,78	8,63	-19,09
		Baixo	$\bar{X}_0 = 2.466$			
III	Média	Média	$\bar{X}_s = 2.954$	5,63	0,19	0,00
		Média	$\bar{X}_0 = 2.945$			

I: seleção e resposta no mesmo nível de P; II: seleção em um nível de P e resposta em outro; III: seleção pela média dos níveis de P e resposta em cada nível individualmente e na média; Rs : resposta com a seleção ($Rs = ds\hat{h}_p^2$, onde ds é o diferencial de seleção e $\hat{h}_p^2$ é estimativa da herdabilidade ao nível de médias de progêneses); $\bar{X}_0$: média original; $\bar{X}_s$: média dos indivíduos selecionados; e Diferença absoluta: desvio, em valor absoluto, em relação ao ganho esperado com a seleção e a resposta praticada no mesmo nível de P.

De acordo com Atlin et al. (1989), determinar se a seleção para determinado estresse deve ser realizado de forma direta (específica) ou indireta é muito importante, sendo que a eficácia de cada uma dessas estratégias depende da herdabilidade e da correlação genética do caráter entre os ambientes com e sem estresse. Comparando-se as Rs para seleção específica, ou seja, seleção e resposta no mesmo nível de P solo, verificou-se que o valor obtido no ambiente de baixo nível de P (231,87 kg ha⁻¹) foi quase a metade do valor alcançado no alto nível de P (425,75 kg ha⁻¹). Esse resultado era esperado, pois a estimativa de herdabilidade ($\hat{h}_p^2$) no baixo nível de P foi menor em função da menor variância genética entre progêneses $S_{0:2}$ ($\hat{\sigma}_p^2$), reduzindo por sua vez a resposta esperada com seleção (Rs) devido a menor acurácia.

Considerando-se a seleção indireta, ou seja, seleção em um nível de P e resposta em outro, observou-se que a Rs para ambos os casos, tanto para a resposta no alto quanto para a resposta no baixo nível de P, tiveram uma redução muito semelhante na sua magnitude

com de cerca de 175 kg ha⁻¹ em relação a seleção específica. Assim, esse critério de seleção demonstrou ser ineficiente, pois resultará em menor progresso genético para o caráter PG para ambos os ambientes, o que demonstra a baixa correlação genética desse caráter entre os ambientes com e sem a presença de estresse por deficiência de P no solo. Tendo em vista que o efeito da interação GxN foi significativo ($p \leq 0,01$), esse resultado era esperado, pois os genótipos selecionados para determinado nível de P podem não manter sua performance em outro.

A seleção geral, a qual se refere seleção com base na média das progênes reunidas nos dois níveis de P no solo, com respostas esperadas em cada nível de P, separadamente, apresentaram resultados de R_s melhores que aqueles verificados com a seleção indireta, e próximos aos observados com a seleção específica, com uma redução de somente 0,93% e 0,77% na R_s , em percentagem, para a resposta no alto e baixo nível de P, respectivamente. Esses resultados são condizentes com o verificado por Rosille & Hamblin (1981) em que a seleção efetuada com base na produtividade média foi efetiva para incrementar a produção de grãos em ambientes com e sem estresse ambiental. Assim, esses resultados demonstram que a seleção com base na média das progênes nos dois níveis de P no solo apresentou resultados muito semelhante a seleção específica para um determinado nível de P. Isso deve-se ao fato da estimativa da variância genética entre progênes $S_{0:2}$ ($\hat{\sigma}_p^2$) para esse critério estar livre da interação progênie x nível de P (PxN) e, por consequente, gerou a maior estimativa da herdabilidade ($\hat{h}_p^2$) observada entre as análises conjuntas (Tabela 13). No entanto, na seleção geral apesar da $\hat{h}_p^2$ ter sido maior que as das seleções específicas, o diferencial de seleção (ds) foram menores e, portanto, resultaram em R_s pouco menores.

Assim, nas condições experimentais em que a população CNA9 foi avaliada, fica evidente que, quando não há possibilidade dos genótipos serem avaliados no mesmo local para níveis contrastantes de P no solo, a seleção poderia ser feita com base na média de ambientes com diferentes níveis de P, visando progresso genético para o ambiente com a presença de estresse abiótico. Apesar de ter tido uma resposta esperada com seleção menor, a magnitude desta com esse critério de seleção, a saber de 8,63%, foi semelhante quando se fez a seleção específica no baixo P (9,40%). A seleção indireta para o baixo nível de P, na qual se procede a seleção do caráter PG em ambientes com ausência de estresse, foi a que apresentou menor eficiência, com redução de 175,28 kg ha⁻¹.

De modo semelhante, um estudo com cultivares de aveia em ambientes com alto e baixo potencial produtivo, verificou-se que a seleção com base na média proporcionou

melhor resposta para ambiente desfavorável de cultivo em relação a seleção indireta (Atlin & Frei, 1990). No entanto, segundo Ceccarelli (1994), não é desejável utilizar locais com níveis intermediários de estresse para se proceder a seleção. Devido a semelhança entre a média do grupo de genótipos selecionados nesse ambiente com a média geral, ds será de baixa magnitude e, conseqüentemente, Rs será pouco efetivo. Por isso, a escolha do ambiente para a condução dos ensaios de avaliação deve ser realizada com cautela, uma vez que isso afeta tanto o desempenho dos genótipos para um ambiente específico, como a resposta dos genótipos em outro ambiente.

A seleção geral com resposta esperada independentemente do nível de P no solo (média dos ambientes), pode ser considerada o pior critério de seleção, dado que a magnitude da estimativa de Rs , em percentagem, foi somente 0,19%. O baixo diferencial de seleção foi o fator preponderante para que fosse obtido esse resultado. A média das progênies $S_{0:2}$ selecionadas ($\bar{X}_s$) foram muito semelhantes a média original da população ($\bar{X}_0$), considerando os dois níveis de P simultaneamente, o que pode ser um indício de que a maior parte das progênies da população não seriam consideradas, simultaneamente, como eficientes e responsivas ao uso do P disponível no solo. Isso porque as médias das progênies selecionadas de forma direta nos níveis alto (4.154 kg ha⁻¹) e baixo (3.097 kg ha⁻¹) foram relativamente superiores à média das progênies que foram selecionadas considerando esse critério de seleção geral (2.964 kg ha⁻¹).

Tomando-se em consideração as estimativas obtidas para as respostas esperadas com seleção, a seleção sob estresse foi eficiente para concentrar os alelos favoráveis para o caráter PG e assim promover o progresso genético da população CNA9 para essas condições. Porém, a seleção nesse ambiente não proporciona resultados satisfatórios para ambientes que se tem maiores níveis de P no solo, sendo que o oposto, também, foi verificado. Nesses casos, é melhor que se faça a seleção pela média dos níveis de P para a resposta individual em cada nível de P.

Informações sobre a resposta esperada com diferentes critérios de seleção nos diferentes níveis de P são particularmente relevantes para o planejamento e condução do processo de seleção recorrente da população CNA9. Fica evidente, por exemplo, que para a obtenção de ganho genético em condições de deficiência de P no solo é fundamental que se tenha a avaliação nesse tipo de ambiente, pois caso contrário, perde-se em eficiência. Corroborando com esse resultado, Caccarelli (1996) relata que genótipos selecionados em ambientes com alto potencial produtivo (com insumos e condições climáticas favoráveis)

podem não ser selecionados em ambientes que apresentem condições contrárias a essas.

O programa de melhoramento de arroz da Embrapa desenvolve cultivares com elevado potencial produtivo, visando, principalmente, áreas com condições favoráveis de cultivo. Para haver uma maior abrangência de ambientes menos favorecidos, tais como os que possuem baixa nível de P, seria necessário um redirecionamento da pesquisa, com uma maior preocupação em se avaliar, também, os genótipos nesses ambientes, como forma de aumentar o progresso com a seleção para a tolerância à deficiência de P no solo.

Ao longo do tempo, foi sendo adotada a seleção em ambientes com elevado potencial produtivo. Acredita-se que as condições ambientais podem ser melhor controladas, elevando a herdabilidade e permitindo maior progresso genético. No entanto, conforme Ceccarelli (1989), não é a magnitude relativa desse parâmetro que determina se a seleção deve ser realizada sob uma condição com e sem estresse, mas sim se a diferença entre genótipos observada em um ambiente é mantida quando esses mesmos genótipos são comparados em um outro ambiente. Ou seja, se é manifestada interação genótipo por ambiente, a qual geralmente manifesta-se da forma complexa, uma vez que os alelos que controlam o caráter PG em ambientes com estresse são diferentes daqueles dos ambientes considerados ótimos (Ceccarelli et al., 1992).

Segundo Banzinger et al. (2006) ao incluir a seleção sob estresses na rotina dos programas de melhoramento genético, apesar de ser trabalhosa, se tem a possibilidade de aumentar significativamente a média produtiva para as condições que apresentam determinado estresse. Entretanto, segundo os mesmos autores, o fato dos melhoristas se preocuparem mais em manter a herdabilidade alta na condição de estresse, do que buscarem verificar se o ambiente de avaliação representa de forma efetiva o ambiente alvo com estresse, é uma das principais causas do insucesso com a seleção de genótipos com tolerância a determinado estresse abiótico.

4.6 AVALIAÇÃO DA TOLERÂNCIA À DEFICIÊNCIA DE FÓSFORO

Na Figura 2 encontram-se a distribuição gráfica das médias ajustadas das progênies $S_{0:2}$ e testemunhas para o caráter produção de grãos (PG, em kg ha^{-1}), em cada nível de P no solo (alto e baixo), médias gerais dos ensaios, regressão linear ($y = x$) para análise da estabilidade, e a regressão linear para correlação das médias ajustadas de PG das progênies $S_{0:2}$ entre os dois ambientes. Por meio desse recurso, os genótipos podem ser

classificados como: ineficientes e não responsivos (desempenho abaixo da média dos dois níveis de P); eficientes e não responsivos (acima da média do baixo nível de P e inferior da média do alto nível de P); ineficientes e responsivos (abaixo da média no baixo nível de P e acima da média no alto nível de P); e eficientes e responsivos (desempenho acima da média dos dois níveis de P).

Com o estresse aplicado houve uma redução de 28% na PG e a correlação fenotípica ($\sqrt{R^2}$) entre os níveis alto e baixo de P foi significativa ($p \leq 0,01$) e de baixa magnitude, a saber de 0,44 (Figura 2). Isso indica que os comportamentos dos genótipos entre as duas condições, para o caráter PG, não foram correlacionados, de modo que as progênies eficientes e responsivas em P poderiam ser identificadas somente se testadas em ambientes com níveis contrastantes desse elemento, o que corrobora com a interação GxN significativa (Tabela 12) e a ineficiência da seleção indireta entre os níveis de P no solo (Tabela 15).

A estabilidade dos tratamentos nos ambientes com baixo e alto nível de P pode ser observada pela proximidade a regressão linear indicada como “Linear (Estabilidade)”, a qual representa a produtividade dos genótipos equivalente ambos os níveis. Em geral, os genótipos apresentaram desempenho diferenciado nos dois ambientes, sendo que a maioria expressou maior PG com alto nível de P no solo, como esperado, uma vez que a resposta da cultura do arroz à aplicação de P foi expressiva (Figura 2). No entanto, poucos genótipos demonstraram maior PG na condição de estresse comparativamente com a condição de alto nível de P. Uma das possíveis explicações seria que a deficiência de P no solo pode aumentar a tolerância ao alumínio em arroz pela alteração fisiológica da membrana plasmática das raízes (Maejima et al., 2014). Dessa forma, o baixo nível de P pode ter feito com que elas expressassem seu potencial para tolerar o alumínio, sendo esse estresse abiótico um dos que mais restringem o caráter PG em arroz de terras altas nos solos do cerrado brasileiro juntamente com a deficiência de P (Pinheiro et al., 2006). Outra possível explicação e mais provável, seria a sensibilidade de alguns genótipos de arroz a condições de alta saturação por bases (altas níveis de P no solo), ocasionando toxidez, com consequente, menor produtividade.

Os cultivares BRSGO Serra dourada e BRS Bonança foram um dos poucos genótipos com maior estabilidade produtiva considerando os dois níveis de P no solo. No que tange a primeira, já era esperado esse comportamento, uma vez que foi desenvolvida em condições desfavoráveis de cultivo (Melo et al., 2010). Além disso, de acordo com sua

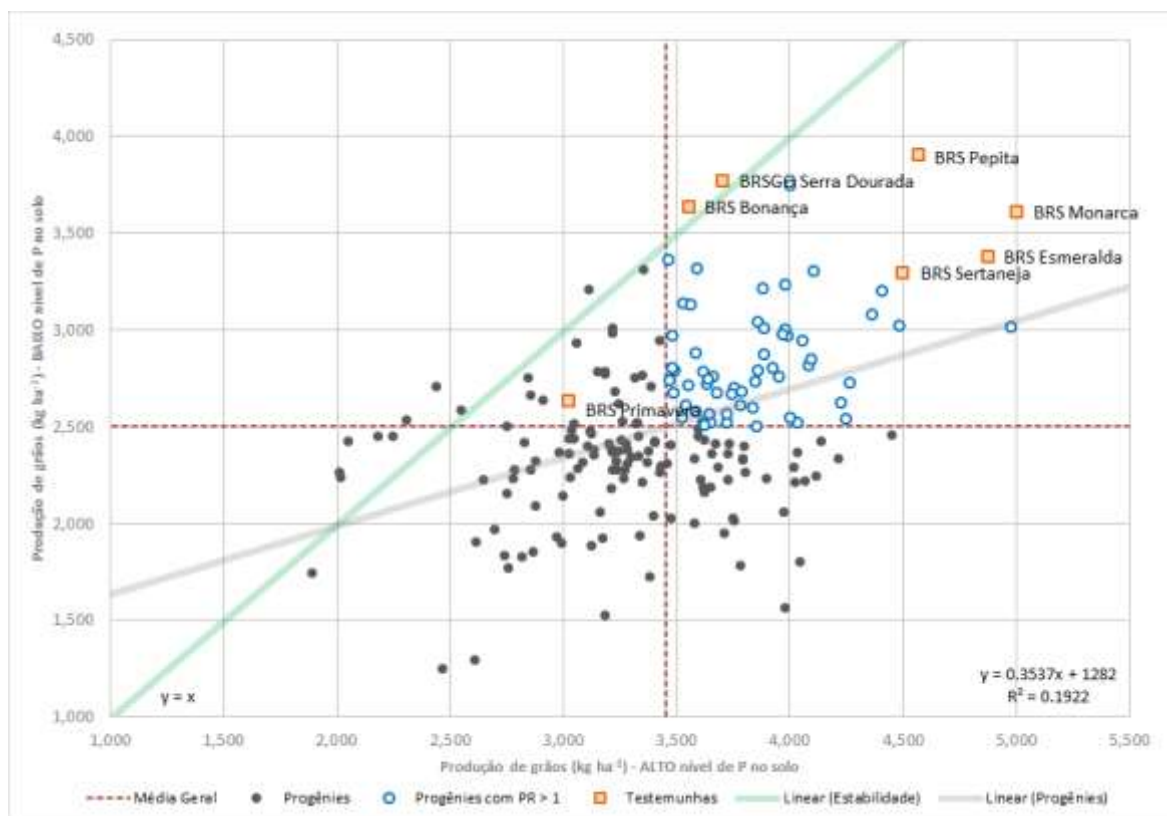


Figura 2 Dispersão das médias ajustadas das progênies $S_{0:2}$ e testemunhas para o caráter produção de grãos (PG, em kg ha^{-1}), em cada nível de P no solo (alto e baixo), médias gerais dos ensaios, regressão linear ($y = x$) para análise da estabilidade, e a regressão linear para correlação da PG das progênies $S_{0:2}$ entre os dois ambientes, conforme apresentados na legenda.

posição no gráfico, o BRSO Serra dourada foi o segundo em termos de produtividade na condição de baixo nível de P, ressaltando seu bom desempenho em ambientes com estresses abióticos, apesar de não ter se apresentado como altamente responsivo a presença de P no solo. A posição dos demais cultivares no gráfico evidencia a estratégia do programa de melhoramento genético da Embrapa de proceder a seleção em ambientes com condições edafoclimáticas favoráveis. Em geral, por serem selecionados exclusivamente em condições de alto nível de P, quando cultivados em ambientes com restrição desse macronutriente não mantêm o seu rendimento, fazendo com que apresentem menor estabilidade.

As progênies apresentaram distribuição relativamente homogênea nos quatro quadrantes do gráfico, demonstrando que a população CNA9 possui variância genética para a eficiência e resposta ao P no solo, o que permite ganhos com a seleção desses dois atributos. Esse comportamento diferencial entre as progênies, também, demonstra a possibilidade de combinar indivíduos, com o objetivo de sintetizar populações específicas para cada ambiente. Contudo, algumas progênies são altamente inefficientes e não responsivas, o que contribui para a baixa média geral, indicando a presença de alelos desfavoráveis que ainda

não foram eliminados com os poucos ciclos de seleção recorrente realizados nessa população.

Foram classificadas como eficientes e responsivas 57 progênies $S_{0:2}$ (30%), além dos cultivares BRSGO Serra Dourada, BRS Bonança, BRS Pepita, BRS Monarca, BRS Esmeralda e BRS Sertaneja. Esse grupo demonstra o potencial genético disponível para desenvolver genótipos que mantenham certo nível produtivo em condições de deficiência de P, mas que ao mesmo tempo, incrementem a produção de grãos em resposta a aplicação desse macronutriente.

Observa-se ainda que os cultivares utilizados como testemunhas apresentaram, em geral, desempenho superior ao das progênies $S_{0:2}$ ambos os ambientes. Contudo, deve-se ter cautela em afirmar que essas são mais eficientes e responsivas, ainda mais indicá-las como tolerantes à deficiência de P. Conforme já mencionado anteriormente, tratam-se de cultivares com elevado potencial produtivo comparativamente a população que foi pouco melhorada geneticamente.

De acordo com Ceccarelli et al. (1992), em estudos de desempenho em ambientes contrastantes, comparar cultivares com alto potencial produtivo com genótipos pouco melhorados, como variedades locais, não é apropriado. Cada tipo de genótipo de referência é um fator chave na interpretação de seu desempenho em ambientes com alto ou baixo potencial produtivo. Por isso, genótipos elite devem ser considerados como tolerantes a determinado estresse somente quando comparados com outros pertencentes a esse mesmo grupo. Segundo os autores, no primeiro tipo de comparação mencionado, podem ser observadas apenas diferenças relacionadas ao efeito da produtividade, não promovendo nenhum tipo de informação em relação a como esse ganho pode ser diretamente selecionado nas condições de estresse.

Vale ressaltar que a testemunha BRS Primavera foi classificada como eficiente e não responsiva, diferentemente dos demais cultivares. Isso pode ser em razão desse cultivar ser mais antigo e ao longo dos anos têm-se observado um progresso genético para o caráter PG, associado ao aumento de adaptabilidade e estabilidade, no programa de melhoramento genético de arroz de terras altas da Embrapa (Colombari Filho et al., 2013). No entanto, segundo os trabalhos de Cancellier et al. (2010) e Tonello et al. (2012) esse cultivar foi considerado, respectivamente, como eficiente e responsivo e eficiente e não responsivo. Possivelmente, essa divergência de resultados pode estar associada ao grupo de cultivares com que BRS Primavera foi comparado sendo que, no presente estudo, esse cultivar não

apresentou produção superior à média dos demais tratamentos no alto nível de P.

A dispersão gráfica deve ser utilizada com cautela para classificar os genótipos em eficientes e responsivos, pois resultados contrastantes têm sido observados na literatura. No trabalho realizado por Rotili et al. (2010), os cultivares de arroz de terras altas BRS Bonança, BRS Caiapó, BRS Sertaneja, BRSMG Curinga, BRSMG Conai e BRS Primavera foram testados com doses de 20 e 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, identificando o cultivar BRS Bonança como eficiente e responsivo. Basicamente com o mesmo conjunto de genótipos, avaliado em condições semelhantes de estudo (local e doses de P), Cancelier et al., 2012 não identificaram nenhum genótipo como eficiente e responsivo. Em um outro estudo, com os cultivares arroz de terras altas BRS Primavera, BRSMG Conai, BRS Sertaneja, BRS Bonança, BRS Aroma, BRS Pepita, BRSGO Serra Dourada, Bolinha, Japonês e BRS Monarca, em níveis contrastantes de P, BRS Primavera e Bolinha foram tidas como eficientes e responsivas (Tonello et al., 2012). Como a média do baixo e do alto P é utilizada para separar os genótipos em quatro grupos, a classificação obtida por meio da dispersão gráfica pode ser diferente, dado que a média pode variar conforme o desempenho do grupo de genótipos e as diferenças das condições ambientais de estudo.

Apesar da distribuição gráfica ter permitido efetuar a seleção de 57 progênies eficientes e responsivas ao P no solo, contudo não fornece informações para a seleção dos melhores genótipos dentro desse grupo. Nesse sentido, foram estimadas a Média Harmônica da Performance Relativa (*MHPR*) e o Índice de Tolerância à Deficiência de P (*IT*) dos genótipos (Tabela 16).

Considerando a classificação dos genótipos em um dos métodos (*MHPR* e *IT*), foi observado uma correlação de Spearman não significativa e de baixa magnitude ($\rho = 0,19$), o que indica que genótipos selecionados com base em um critério dificilmente serão os mesmos selecionados pelo outro. Quando o propósito for selecionar simultaneamente para eficiência e a resposta de P no solo, *MHPR* demonstrou ser um critério mais apropriado do que *IT*. As médias nos níveis alto e baixo de P no solo do genótipo mais bem colocado por *IT* foram, respectivamente, 3.555 kg ha⁻¹ e 3.636 kg ha⁻¹. Para esse mesmo posto, verificase que *MHPR* foi capaz de eleger um genótipo que apresentou desempenho superior no alto (5.002 kg ha⁻¹), e relativamente semelhante no baixo nível de P (3.610 kg ha⁻¹). Além disso, o cultivar BRS Primavera, único genótipo que não era eficiente e responsivo no grupo, foi classificada como a oitava melhor por *IT*. *MHPR*, por sua vez, foi capaz de atribuir a essa testemunha a última colocação, de modo condizente com o grupo que ela foi classificada

pela distribuição gráfica (Figura 2).

Tabela 16 Média do caráter produção de grãos (PG, em kg ha⁻¹) nas condições de baixo e alto nível de fósforo (P) no solo, Média Harmônica da Performance Relativa (*MHPR*), Índice de Tolerância à Deficiência de P (*IT*) e a média conjunta para ambos os níveis de P no solo. As 57 progêneses S_{0,2} classificadas como tolerantes e responsivas ao P com base na dispersão gráfica e as testemunhas.

Class.	Genótipo	Média		<i>MHPR</i>	Class.	Genótipo	Média		<i>IT</i>	Média Conjunta
		Baixo P	Alto P				Baixo P	Alto P		
1	BRS Monarca	3.610	5.002	1,45	1	BRS Bonança	3.636	3.555	1,41	3.897
2	BRS Pepita	3.906	4.571	1,43	2	BRSGO Serra Dourada	3.767	3.703	1,40	4.127
3	BRS Esmeralda	3.379	4.876	1,38	3	CNA9/3/1-82-4	3.366	3.465	1,34	3.415
4	CNA9/3/1-88-2	3.017	4.973	1,31	4	CNA9/3/1-94-4	3.749	4.000	1,29	3.875
5	BRS Sertaneja	3.292	4.501	1,31	5	CNA9/3/1-117-5	3.320	3.592	1,27	3.456
6	CNA9/3/1-94-4	3.749	4.000	1,31	6	CNA9/3/1-158-4	3.138	3.528	1,23	3.333
7	CNA9/3/1-32-5	3.202	4.406	1,28	7	CNA9/3/1-90-2	3.134	3.562	1,21	3.348
8	BRSGO Serra Dourada	3.767	3.703	1,25	8	BRS Primavera	2.629	3.022	1,20	3.735
9	CNA9/3/1-163-5	3.025	4.483	1,25	9	BRS Pepita	3.906	4.571	1,18	2.826
10	CNA9/3/1-62-4	3.304	4.105	1,25	10	CNA9/3/1-11-2	2.970	3.480	1,18	3.225
11	CNA9/3/1-149-3	3.078	4.362	1,25	11	CNA9/3/1-40-5	3.213	3.878	1,14	3.545
12	CNA9/3/1-54-5	3.238	3.976	1,22	12	CNA9/3/1-54-5	3.238	3.976	1,12	3.607
13	BRS Bonança	3.636	3.555	1,21	13	CNA9/3/1-91-5	2.803	3.477	1,11	3.140
14	CNA9/3/1-40-5	3.213	3.878	1,20	14	CNA9/3/1-62-4	3.304	4.105	1,11	3.704
15	CNA9/3/1-163-4	3.004	3.978	1,18	15	CNA9/3/1-88-5	2.883	3.584	1,11	3.233
16	CNA9/3/1-54-4	2.943	4.053	1,18	16	CNA9/3/1-135-3	2.792	3.488	1,10	3.140
17	CNA9/3/1-128-2	2.972	3.988	1,17	17	CNA9/3/1-127-5	2.743	3.470	1,09	3.106
18	CNA9/3/1-62-5	2.980	3.965	1,17	18	CNA9/3/1-162-4	3.043	3.858	1,09	3.450
19	CNA9/3/1-117-5	3.320	3.592	1,17	19	CNA9/3/1-58-3	3.012	3.884	1,07	3.448
20	CNA9/3/1-162-4	3.043	3.858	1,17	20	CNA9/3/1-114-5	2.785	3.617	1,06	3.201
21	CNA9/3/1-58-3	3.012	3.884	1,16	21	CNA9/3/1-40-1	2.679	3.487	1,06	3.083
22	CNA9/3/1-63-5	2.853	4.096	1,16	22	CNA9/3/1-163-3	2.715	3.548	1,06	3.132
23	CNA9/3/1-50-2	2.725	4.263	1,16	23	CNA9/3/1-163-4	3.004	3.978	1,04	3.491
24	CNA9/3/1-32-1	2.818	4.080	1,15	24	CNA9/3/1-93-3	2.744	3.640	1,04	3.192
25	CNA9/3/1-82-4	3.366	3.465	1,15	25	CNA9/3/1-76-2	2.757	3.658	1,04	3.208
26	CNA9/3/1-136-1	2.878	3.888	1,14	26	CNA9/3/1-62-5	2.980	3.965	1,04	3.472
27	CNA9/3/1-90-2	3.134	3.562	1,13	27	CNA9/3/1-146-3	2.719	3.633	1,03	3.176
28	CNA9/3/1-149-5	2.625	4.224	1,13	28	CNA9/3/1-128-2	2.972	3.988	1,03	3.480
29	CNA9/3/1-117-1	2.806	3.926	1,13	29	CNA9/3/1-136-1	2.878	3.888	1,02	3.383
30	CNA9/3/1-158-4	3.138	3.528	1,13	30	CNA9/3/1-32-2	2.611	3.539	1,02	3.075
31	CNA9/3/1-40-3	2.757	3.949	1,12	31	BRS Sertaneja	3.292	4.501	1,01	4.239
32	CNA9/3/1-93-4	2.792	3.858	1,12	32	CNA9/3/1-142-2	2.674	3.679	1,00	3.177
33	CNA9/3/1-127-2	2.544	4.247	1,11	33	CNA9/3/1-32-5	3.202	4.406	1,00	3.804
34	CNA9/3/1-102-1	2.737	3.848	1,10	34	CNA9/3/1-54-4	2.943	4.053	1,00	3.498
35	CNA9/3/1-88-5	2.883	3.584	1,09	35	CNA9/3/1-42-3	2.550	3.524	1,00	3.037
36	CNA9/3/1-11-2	2.97	3.480	1,09	36	CNA9/3/1-93-4	2.792	3.858	1,00	3.325
37	CNA9/3/1-1-4	2.683	3.785	1,08	37	BRS Monarca	3.610	5.002	1,00	3.596
38	CNA9/3/1-126-3	2.702	3.755	1,08	38	CNA9/3/1-117-3	2.580	3.583	0,99	3.081
39	CNA9/3/1-91-2	2.548	3.997	1,08	39	CNA9/3/1-126-3	2.702	3.755	0,99	3.229
40	CNA9/3/1-83-5	2.523	4.031	1,08	40	CNA9/3/1-117-1	2.806	3.926	0,99	3.366
41	CNA9/3/1-76-2	2.757	3.658	1,08	41	CNA9/3/1-91-3	2.673	3.741	0,98	3.207
42	CNA9/3/1-114-5	2.785	3.617	1,08	42	CNA9/3/1-102-1	2.737	3.848	0,98	3.293
43	CNA9/3/1-91-3	2.673	3.741	1,08	43	CNA9/3/1-1-4	2.683	3.785	0,98	3.234
44	CNA9/3/1-93-3	2.744	3.640	1,08	44	CNA9/3/1-149-3	3.078	4.362	0,97	3.720
45	CNA9/3/1-63-1	2.597	3.835	1,07	45	CNA9/3/1-117-2	2.569	3.642	0,97	3.105
46	CNA9/3/1-161-4	2.612	3.782	1,07	46	CNA9/3/1-40-3	2.757	3.949	0,96	3.353
47	CNA9/3/1-146-3	2.719	3.633	1,07	47	CNA9/3/1-132-5	2.523	3.615	0,96	3.069
48	CNA9/3/1-142-2	2.674	3.679	1,07	48	CNA9/3/1-63-5	2.853	4.096	0,96	3.474
49	CNA9/3/1-91-5	2.803	3.477	1,06	49	BRS Esmeralda	3.379	4.876	0,96	4.306
50	CNA9/3/1-135-3	2.792	3.488	1,06	50	CNA9/3/1-8-4	2.510	3.624	0,95	3.067
51	CNA9/3/1-163-3	2.715	3.548	1,06	51	CNA9/3/1-11-5	2.525	3.652	0,95	3.088
52	CNA9/3/1-157-2	2.503	3.850	1,06	52	CNA9/3/1-32-1	2.818	4.080	0,95	3.449
53	CNA9/3/1-81-5	2.566	3.720	1,05	53	CNA9/3/1-161-4	2.612	3.782	0,95	3.197
54	CNA9/3/1-127-5	2.743	3.470	1,05	54	CNA9/3/1-81-5	2.566	3.720	0,95	3.143
55	CNA9/3/1-132-2	2.524	3.721	1,04	55	CNA9/3/1-132-2	2.524	3.721	0,94	3.122

Class.	Genótipo	Média		MHPR	Class.	Genótipo	Média		IT	Média Conjunta
		Baixo P	Alto P				Baixo P	Alto P		
56	CNA9/3/1-117-2	2.569	3.642	1,04	56	CNA9/3/1-63-1	2.597	3.835	0,93	3.216
57	CNA9/3/1-40-1	2.679	3.487	1,04	57	CNA9/3/1-163-5	3.025	4.483	0,93	3.754
58	CNA9/3/1-117-3	2.580	3.583	1,03	58	CNA9/3/1-157-2	2.503	3.850	0,90	3.177
59	CNA9/3/1-32-2	2.611	3.539	1,03	59	CNA9/3/1-50-2	2.725	4.263	0,88	3.494
60	CNA9/3/1-11-5	2.525	3.652	1,03	60	CNA9/3/1-91-2	2.548	3.997	0,88	3.272
61	CNA9/3/1-132-5	2.523	3.615	1,03	61	CNA9/3/1-83-5	2.523	4.031	0,86	3.277
62	CNA9/3/1-8-4	2.510	3.624	1,03	62	CNA9/3/1-149-5	2.625	4.224	0,86	3.425
63	CNA9/3/1-42-3	2.550	3.524	1,02	63	CNA9/3/1-88-2	3.017	4.973	0,84	3.995
64	BRS Primavera	2.629	3.022	0,96	64	CNA9/3/1-127-2	2.544	4.247	0,83	3.395

A respeito desses resultados, cabem algumas considerações. Para *IT*, os resultados obtidos remetem somente ao comportamento observado de cada genótipo em relação ao comportamento esperado para o mesmo com base na média geral de todos os genótipos em cada nível de P no solo. Assim, esse índice somente remete a estabilidade de cada genótipo com base em um padrão de comportamento, sem levar em consideração a adaptabilidade entre os ambientes (resposta ao P disponível no solo). Ou seja, os melhores genótipos são aqueles com menor variação de PG nas condições de alto e baixo nível de P em relação variação das médias gerais para o mesmo caráter. Por outro lado, *MHPR* leva em consideração os conceitos de estabilidade e a adaptabilidade simultaneamente, pois refere-se ao comportamento relativo de cada genótipo já penalizado pela instabilidade de PG e capitalizado pela adaptabilidade, sendo assim mais completo (Resende, 2007).

Cabe ressaltar, que existem diversas definições existentes das terminologias adaptabilidade e estabilidade, porém as mais bem aceitas e consideradas nessa discussão são aquelas definidas por Mariotti et al. (1976), pois melhor retratar as mesmas no âmbito agrônomo. Esses autores sugeriram que o termo adaptabilidade refere-se à capacidade de diferentes genótipos responderem de forma favorável à melhoria proporcionada nos ambientes. E, estabilidade refere-se à capacidade dos genótipos possuírem comportamentos altamente previsíveis em função das variações ambientais, ou seja, quando o comportamento de um genótipo é pouco variável quando avaliado em diversas condições ambientais.

Assim, segundo o critério *IT* visto por meio da Figura 3, pode ser observado que as trinta melhores progênies entre as 57 eficientes e responsivas ao P no solo, ficaram localizadas entre as duas linhas correspondes as regressões lineares, evidenciando aquelas que apresentaram o comportamento mais próximo do comportamento geral dos genótipos e com o menor desvio de PG entre os níveis de P no solo. Logo, esse índice não leva em consideração o potencial produtivo do genótipo, o que corrobora com o fato de que a correlação de Spearman entre *IT* e a média conjunta de PG para os dois níveis de P ter sido

de baixa magnitude ($\rho = 0,11$) e não significativa. Dessa forma, um genótipo com desempenho inferior para PG em ambos os níveis de P poderia ser selecionado pelo método *IT*, ao invés de outro de desempenho superior, por ter um maior valor de *IT*.

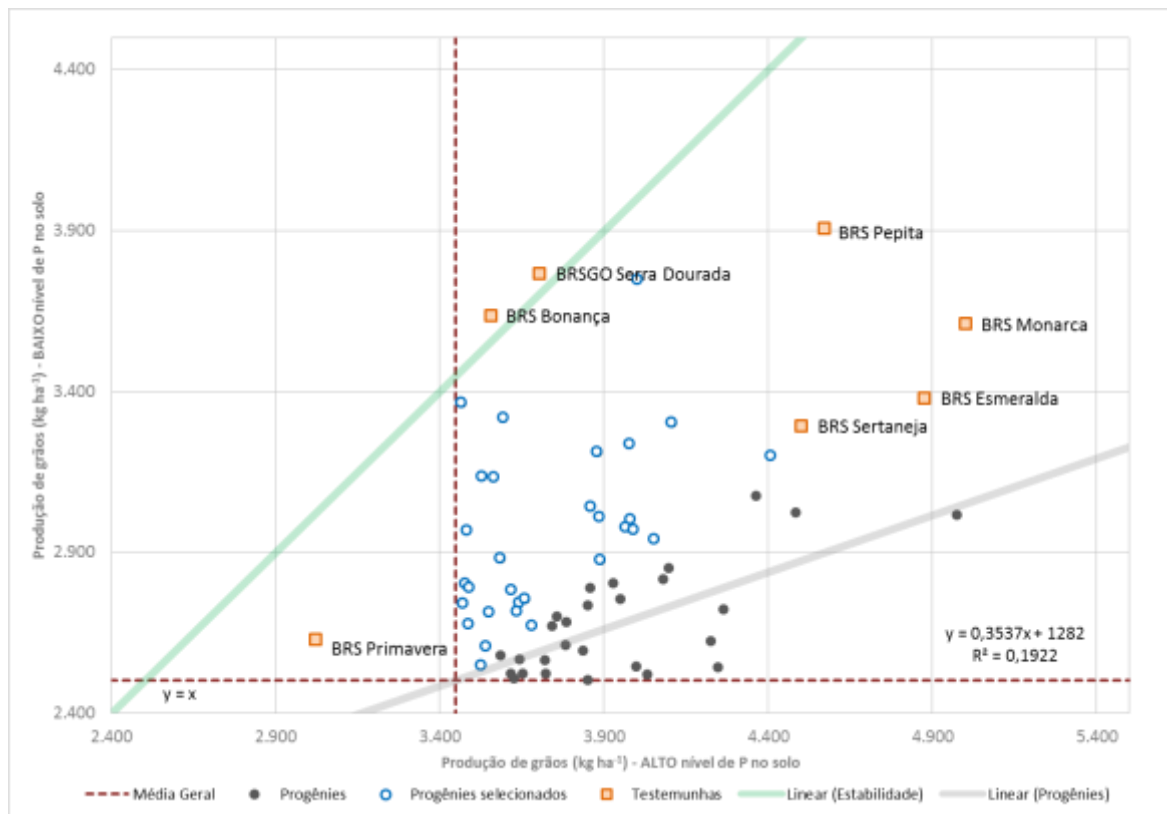


Figura 3 Dispersão das médias ajustadas das 57 progênies $S_{0.2}$ eficientes e responsivas ao P no solo e testemunhas para o caráter produção de grãos (PG, em kg ha^{-1}), em cada nível de P no solo (alto e baixo), médias gerais dos ensaios, regressão linear ($y = x$) para análise da estabilidade, e a regressão linear para correlação da PG das progênies $S_{0.2}$ entre os dois ambientes, conforme apresentados na legenda. As progênies em destaque referem-se as trinta melhores considerando os valores de *IT*.

MHPR por sua vez (Figura 4), como considera a performance relativa em cada nível de P já penaliza pelos desvios de comportamento entre os níveis de P no solo, de modo que os indivíduos com melhor classificação apresentam desempenho acima da média em cada ambiente e, ao mesmo tempo, menor “quebra de produtividade”. A correlação entre *MHPR* e a média conjunta de PG para os ambientes com e sem deficiência de P no solo foi altamente significativa ($p \leq 0,01$) e de alta magnitude ($\rho = 0,99$). Além disso, a utilização desse critério é justificada pela eficiência da seleção geral, com respostas esperadas em cada nível de P separadamente, a qual foi superior a seleção indireta. Por meio da dispersão gráfica, observa-se claramente que esse método permitiu selecionar dentro do grupo das 57 melhores progênies, as trinta mais eficientes e responsivas ao P (Figura 4).

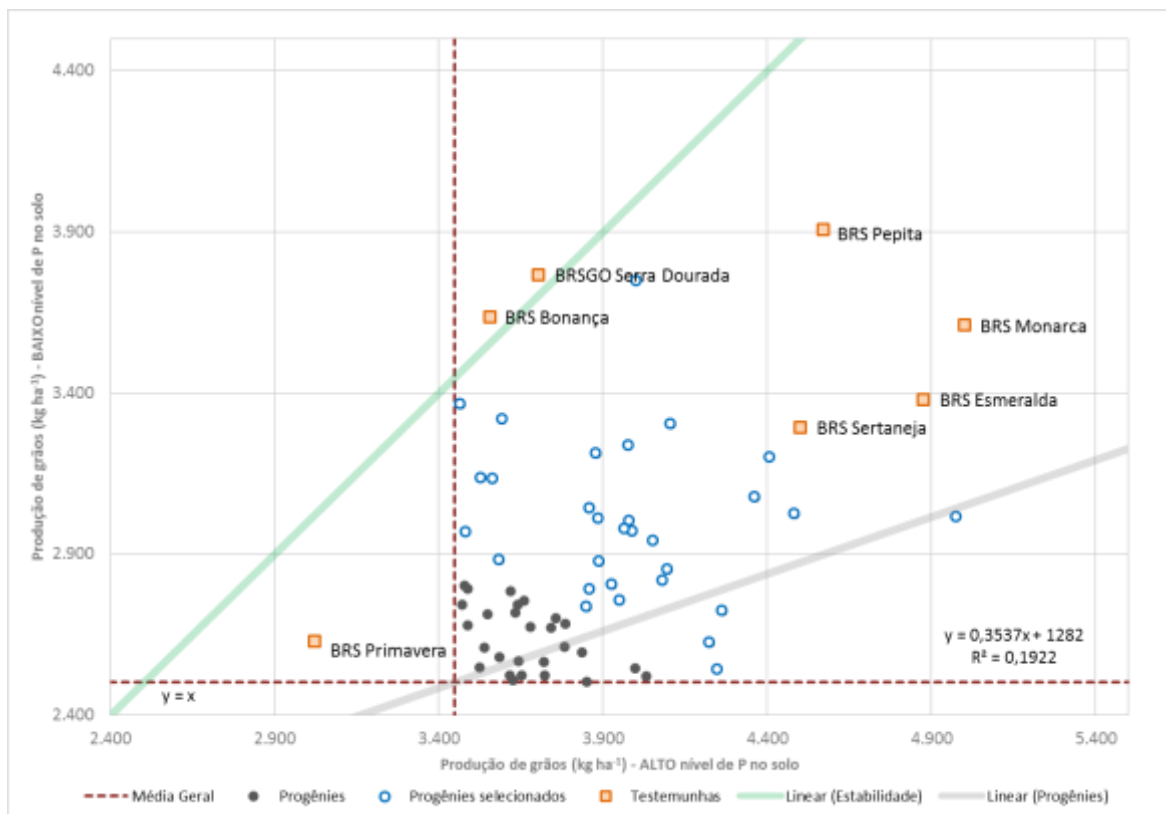


Figura 4 Dispersão das médias ajustadas das 57 progêneses $S_{0:2}$ eficientes e responsivas ao P no solo e testemunhas para o caráter produção de grãos (PG, em kg ha^{-1}), em cada nível de P no solo (alto e baixo), médias gerais dos ensaios, regressão linear ($y = x$) para análise da estabilidade, e a regressão linear para correlação da PG das progêneses $S_{0:2}$ entre os dois ambientes, conforme apresentados na legenda. As progêneses em destaque referem-se as trinta melhores considerando os valores de *MHPR*.

De um modo geral, *IT* permitiu selecionar genótipos que pouco interagem com o ambiente, mantendo o desempenho independentemente do nível de P no solo, enquanto que por *MHPR* foram selecionados os mais eficientes e responsivos para esse elemento. O objetivo dos programas de melhoramento para tolerância à deficiência de P é mais condizente com os resultados proporcionados por *MHPR*. É desejável que os genótipos apresentem maior plasticidade fenotípica para esse caráter, no sentido de elevar significativamente a PG com o aumento da disponibilidade de P, contribuindo assim para a maior eficiência no uso dos recursos naturais. Se forem realizados sucessivos ciclos de seleção por *IT*, é provável que o resultado possa ser diferente desse objetivo, pois a variabilidade genética da população CNA9 para o ambiente com alto nível P tende a ser reduzida. Isso, por que, a média no alto nível de P dos indivíduos selecionados por *IT* foi 6,30% inferior que *MHPR*, possivelmente porque indivíduos com alta estabilidade normalmente apresentam apenas produtividades medianas em condições favoráveis.

IT é um dos critérios mais utilizados para a seleção simultânea de caracteres associados a estresses abióticos (Guimarães et al., 2007; Terra et al., 2013), estando *MHPR* ainda muito relacionado a estudos de adaptabilidade e estabilidade (Colombari Filho et al., 2013; Regenato Neto et al., 2013). Observando-se os resultados desse estudo, *MHPR* é um método alternativo a *IT*, permitindo maior progresso genético para a seleção de genótipos eficientes e responsivos ao P no solo. Dado que são poucos os critérios de seleção simultânea para tolerância e resposta ao P na literatura, estudos que comparem e indiquem novos índices mais efetivos são necessários.

Por fim, cabe considerar que apesar de se ter conhecimento do baixo teor e disponibilidade de P nos solos do cerrado, contudo, não se tem disponíveis informações específicas e atuais sobre o nível do estresse causado pela deficiência desse elemento no solo nas regiões de cultivo de arroz de terras altas. Por isso sugere-se que estudos possam ser desenvolvidos nesse sentido, uma vez que a estratégia e sucesso de seleção para esse estresse abiótico dependem desse tipo de referência.

5 CONCLUSÕES

- i. O estresse abiótico provocado pela deficiência de P no solo afetou de forma expressiva as estimativas dos parâmetros genéticos e fenotípicos, com redução da variância genética entre progênies, herdabilidade e coeficiente genético;
- ii. A população CNA9 apresentou variabilidade genética suficiente para a obtenção de ganhos genéticos, com os ciclos subsequentes de seleção recorrente, tanto para ambientes com deficiência de P, quanto para aqueles com níveis adequados desse elemento;
- iii. Na população CNA9, o sentido e a magnitude das correlações genéticas entre os caracteres dificultam a obtenção de progresso genético para potencial produtivo e tolerância a deficiência de P associados a menor altura de planta e ciclo mais precoce;
- iv. A resposta esperada com seleção para o caráter produção de grãos em ambiente com e sem deficiência de P no solo, foi maior por meio da seleção direta ou seleção geral, sendo a seleção indireta não recomendada;
- v. Foram identificadas 57 progênies eficientes e responsivas ao disponibilidade de P no solo, o método *MHPR* demonstrou-se o mais adequado para a seleção das melhores dentro desse grupo.

6 REFERÊNCIAS

ALEXANDRATOS, NIKOS, AND JELLE BRUINSMA. **World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision**. Rome, FAO: ESA Working paper, 2012.

ALPUERTO, V. L. E. B.; NORTON, G. W.; ALWANG, J.; ISMAIL, A. M. Economic Impact Analysis of Marker-Assisted Breeding for Tolerance to Salinity and Phosphorous Deficiency in Rice. **Applied Economic Perspectives and Policy**, London, v. 31, n. 4, p. 779-792, 2008.

ANNICCHIARICO, P. **Genotype x environment interactions: Challenges and opportunities for plant breeding and cultivar recommendations**. Roma: Food and Agricultural Organization. 2002. 115 p.

ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. In: FERNANDES, M.S. (Ed). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.253-280.

ATLIN, G. N.; FREY, K. J. Predicting the relative effectiveness of direct versus indirect selection for oat yield in three types of stress environments. **Euphytica**, Dordrecht, v. 44, n. 1-2, p. 137-142, 1989.

ATLIN, G. N.; FREY, K. J. Selecting oat lines for yield in low-productivity environments. **Crop Science**, The Hague, v. 30, n. 3, p. 556-561, 1990.

BALIGAR, V. C.; BENNETT, O. L. Outlook on fertilizer use efficiency in the tropics. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 10, n. 1, p. 83-96, 1986.

BANZIGER, M.; SETIMELA, P. S.; HODSON, D.; VIVEK, B. Breeding for improved abiotic stress tolerance in maize adapted to Southern Africa. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 80, n. 1, p. 212-224, 2006.

BATTEN, G. D., KHAN, M. A.; CULLIS, B. R. Yield responses by modern wheat genotypes to phosphate fertilizer and their implications for breeding. **Euphytica**, Dordrecht, v. 33, n. 1, p. 81-89, 1984.

BEEBE, S. E.; RAO, I. M.; CAJIAO, C.; GRAJALES, M. Selection for drought resistance in common bean also improves yield in phosphorus limited and favorable environments. **Crop Science**, Madison, v. 48, n. 2, p. 582-592, 2008.

BENITES, F. R. G.; PINTO, C. A. B. P. Genetic gains for heat tolerance in potato in three cycles of recurrent selection. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v. 11, n. 2, p. 133-140, 2011.

BOLAN, N. S. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. **Plant and Soil**, The Hague, v. 134, n. 2, p. 189-207, 1991.

BOLAÑOS, J.; EDMEADES, G. O. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. I. Responses in grain yield, biomass, and radiation utilization. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 31, n. 3, p. 233-252, 1993.

BORGES, A., P. M.; MAINARDI, A.; VELASQUEZA, A. D. P. Avaliação do custo de produção de arroz em pequenas propriedades rurais do Rio Grande do Sul: um estudo de caso. **Revista em agronegócio e meio ambiente**, Maringá, v.6, n.1, p. 99-116, 2013.

BRESEGHELLO, F.; MORAIS, O. P.; CASTRO, E. M.; PRABHU, S. A.; BASSINELLO, P. Z.; PEREIRA, J. P.; UTUMI, M. M.; FERREIRA, M. E.; SOARES, A. A. Recurrent selection resulted in rapid genetic gain for upland rice in Brazil. **International Rice Research Notes**, Manila, v. 34, n. 1, p. 1-4, 2009.

BURDICK, R. K.; GRAYBILL, F. A. **Confidence Intervals on Variance Components**. 2. ed. New York: CRC Press, 1992. 230 p.

CANCELLIER, E. L.; BRANDÃO, D. R.; SILVA, J.; SANTOS, M. M.; FIDELIS, R. R. Phosphorus use efficiency of upland rice cultivars on cerrado soil. **Ambiência**, Guarapuava, v. 8, n. 2, p. 307-318, 2010.

CARGNIN, A. **Seleção recorrente no melhoramento genético de plantas autógamas**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. 24 p. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento: Embrapa Arroz e Feijão.

CARVALHO, F.I.F.; LORENCETTI, C.; BENIN, G. **Estimativas e implicações da correlação no melhoramento vegetal**. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária - UFPel, 2004. 141p.

CECCARELLI, S. Wide adaptation: how wide? **Euphytica**, Dordrecht, v. 40, n. 3, p. 197-205, 1989.

CECCARELLI, S. Specific adaptation and breeding for marginal conditions. **Euphytica**, Dordrecht, p. 101-127, 1994.

CECCARELLI, S. Adaptation to low/high input cultivation. **Euphytica**, Dordrecht, v. 92, n. 1-2, p. 203-214, 1996.

CECCARELLI, S.; GRANDO, S.; HAMBLIN, J. Relationship between barley grain yield measured in low-and high-yielding environments. **Euphytica**, Dordrecht, v. 64, n. 1-2, p. 49-58, 1992.

CHAUBEY, C. N.; SENADHIRA, D.; GREGORIO, G. B. Genetic analysis of tolerance for phosphorous deficiency in rice (*Oryza sativa* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 89, n. 3, p. 313-317, 1994.

CHAPMAN, S. C.; EDMEADES, G. O. Selection improves drought tolerance in tropical

maize populations: II. Direct and correlated responses among secondary traits. **Crop Science**, Madison, v. 39, n. 5, p. 1315-1324, 1999.

CHIN, J. H.; GAMUYAO, R.; DALID, C.; BUSTAMAM, M.; PRASETIYONO, J.; MOELJOPAWIRO, S.; WISSUWA, M.; HEUER, S. Developing rice with high yield under phosphorus deficiency: Pup1 sequence to application. **Plant physiology**, Lancaster, v. 156, n. 3, p. 1202-1216, 2011.

CHIN, J. H.; LU, X.; HAEFELE, S. M.; GAMUYAO, R.; ISMAIL, A.; WISSUWA, M.; HEUER, S. Development and application of gene-based markers for the major rice QTL Phosphorus uptake 1. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 120, n. 6, p. 1073-1086, 2010.

COCHRAN, W. G.; COX, G. M. **Experimental designs**. New York: John Wiley, 1957. 611 p.

COCKERHAM, C. C. Estimation of genetic variances. in: HANSON, W. D.; ROBINSON, H. F. (Eds). **Statistical genetics and plant breeding**. Washington: National Academy of Science, 1966. p. 53-93.

COLLARD, B. C. Y.; MACKILL, D. J. Marker-assisted selection: an approach for precision plant breeding in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society: Biological Sciences**, London, v. 363, n. 1491, p. 557-572, 2008.

COLOMBARI FILHO, J. M.; RESENDE, M. D. V.; MORAIS, O. P.; CASTRO, A. P.; GUIMARÃES, E. P.; PEREIRA, J. A.; UTUMI, M. M.; BRESEGHELLO, F. Upland rice breeding in Brazil: a simultaneous genotypic evaluation of stability, adaptability and grain yield. **Euphytica**, Dordrecht, v.192, p.117-129, 2013.

COLTMAN, R. R.; KUO, W. Screening for low-phosphorus tolerance among tomato strains. **Delovepements in Plant and Soil Sciences**, Netherlands, v. 45, p.1, p. 967-975, 1991.

COLTMAN, R. R.; GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C., BARTA, S. Genetics and physiology of low-phosphorus tolerance in a family derived from two differentially adapted strains of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). **Genetic aspects of plant mineral nutrition**, Netherlands, v. 27, n. 1, p. 309-315, 1987.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, 12º levantamento, setembro 2014**. Brasília: Conab. 2014. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_09_10_14_35_09_boletim_graos_setembro_2014.pdf>. Acesso em: 11/11/2014.

CORDEIRO, A. C. C.; RANGEL, P. H. N. Avaliação de populações de arroz irrigado conduzidas por seleção recorrente em várzea de Roraima. **Revista Agro@mbiente**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 3, p. 182-187, 2011.

- CORDELL, D.; DRANGERT, J.-O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, Guildford, v. 19, n. 2, p. 292-305, 2009.
- COSTA, N. H. A. D.; SERAPHIN, J. C.; ZIMMERMANN, F. J. P. Novo método de classificação de coeficientes de variação para a cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 3, p. 243-249, 2002
- COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v. 40, n. 2, p. 436-443, 2000.
- CRANADOS, G.; PANDEY, S.; CEBALLOS, H. Response to selection for tolerance to acid soils in a tropical maize population. **Crop Science**, Madison, v. 33, n. 5, p. 936-940, 1993.
- CRUSCIOL, C. A. C.; MAUAD, M.; ALVAREZ, R. C. F.; LIMA, E. V.; TIRITAN, C. S. Doses de fósforo e crescimento radicular de cultivares de arroz de terras altas. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 4, p. 643-649, 2005.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2012. 514 p.
- DEL VILLAR, P. M.; FERREIRA, C. M. Dinâmicas territoriais do arroz de terras altas na região Centro-Oeste do Brasil. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 97-107, 2005.
- DOBERMANN, A.; CASSMAN, K. G.; MAMARIL, C. P.; SHEEHY, J. E. Management of phosphorus, potassium, and sulfur in intensive, irrigated lowland rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 56, n. 1-2, p. 113-138, 1998.
- DOVALE, J. C.; FRITSCHÉ-NETO, R. Controle genético de caracteres associados à eficiência no uso de fósforo em milho via REML/BLUP. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 3, p. 554-563, 2013.
- DOWLING, N. G.; GREENFIELD, S. M.; FISCHER, K. S. (Ed.). **Sustainability of rice in the global food system**. Manila: International Rice Research Institute, 1998. 404p.
- DU, Y. M.; TIAN, J.; LIAO, H.; BAI, C. J.; YAN, X. L.; LIU, G. D. Aluminium tolerance and high phosphorus efficiency helps *Stylosanthes* better adapt to low-P acid soils. **Annals of Botany**, v. 74, p. 1-9, n.1, 2009.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Solos/Embrapa Informática Agropecuária/Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1997. 370 p.
- STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H.; DICKEY, D.A. **Principles and procedures of statistics**. A biometrical approach. New York: McGraw-Hill Book Company, 1997, 666p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT: production of crops**. 2011. Disponível em: < <http://faostat3.fao.org/home/E>>. Acesso em: 11 nov. 2014.

FAGERIA, N. K. Nutrient management for improving upland rice productivity and sustainability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n. 15-16, p. 2603-2629, 2001.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Upland rice genotypes evaluation for phosphorus use efficiency. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 20, n. 4-5, p. 499-509, 1997.

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P.; STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M. Nutrição de fósforo na produção de arroz de terras altas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Anais do Simpósio sobre Fósforo na Agricultura Brasileira**. 1 ed. Piracicaba: POTAFOS, 2004. 726 p.

FAGERIA, N. K.; KLUTHCOUSKI, J. **Metodologia para avaliação das cultivares de arroz e feijão, para condições adversas de solo**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1980, 21 p. Circular técnica: Embrapa Arroz e Feijão.

FAGERIA, N. K., DE MORAIS, O. P., DOS SANTOS, A. B., et al. Phosphorus Use Efficiency in Upland Rice Genotypes Under Field Conditions. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 37, n. 5, p. 633-642, 2014.

FAGERIA, N. K.; MORAES, O. P.; VASCONCELOS, M. J. Upland rice genotypes evaluation for phosphorus use efficiency. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 36, n. 12, p. 1868-1880, 2013.

FAGERIA, N. K.; MORAIS, O. P.; BALIGAR, V. C.; WRIGHT, R. J. Response of rice cultivars to phosphorus supply on an oxisol. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 16, n. 1, p. 195-206, 1988b.

FAGERIA, N. K., SLATON, N. A.; BALIGAR, V. C. Nutrient management for improving lowland rice productivity and sustainability. **Advances in Agronomy**, Newark, v. 80, p. 63-152, 2003.

FAGERIA, N. K.; SOUZA, N. P. Respostas das culturas de arroz e feijão em sucessão à adubação em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 3, p. 359-368, 1995.

FAGERIA, N. K.; WRIGHT, R. J.; BALIGAR, V. C. Rice cultivar evaluation for phosphorus use efficiency. **Plant and Soil**, The Hague, v. 111, n. 1, p. 105-109, 1988a.

FALCONER, D. S. **Introdução à genética quantitativa**. Viçosa: UFV, 1987. 279 p.

FALCONER, D. S.; MACKAY, T. F. C. **Introduction to Quantitative Genetics**. 4 ed. Essex: Longman, 1996.

FIDELIS, R. R.; MIRANDA, G. V.; ERASMO, E. A. L. Seleção de populações base de

milho sob alta e baixa dose de fósforo em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 4, p. 285-293, 2009.

FIDELIS, R. R.; MIRANDA, G. V.; PELÚZIO, J. M.; GALVÃO, J. C. C. Classificação de populações de milho quanto à eficiência e resposta ao uso de fósforo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, vol. 32, no 2, p. 241-246, 2010.

FIDELIS, R. R.; PINTO, L. C.; SANTOS, M. M.; FACCIROLI, A. M.; BRANDÃO, D. R.; SCHEIDT, G. Efeito do fósforo em genótipos de arroz em solos de Cerrado. **Científica**, Jaboticabal, v. 41, n. 1, p. 46-51, 2013.

FIDELIS, R. R.; SANTOS, M. M.; SILVA, J.; BARROS, A. B.; ROTILI, E. A. Avaliação de genótipos de arroz irrigado de várzea sob diferentes adubações com fósforo. **Agrarian**, Dourados, v. 5, n. 18, p. 319-324, 2012.

FISCHER, R.; MAURER, R. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. **Crop and Pasture Science**, Collingwood, v. 29, n. 5, p. 897-912, 1978.

FRITSCHÉ-NETO, R.; MIRANDA, G. V.; DELIMA, R. O.; SOUZA, L. V.; SILVA, J. Herança de caracteres associados à eficiência de utilização do fósforo em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 5, p. 465-471, 2010.

FRITSCHÉ-NETO, R.; DO VALE, J. C.; LANES, E. C. M. D.; RESENDE, M. D. V. D.; MIRANDA, G. V. Genome-Wide Selection for tropical maize root traits under conditions of nitrogen and phosphorus stress. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 34, n. 4, p. 389-395, 2012.

FUJIMAKI, H. Recurrent selection by using genetic male sterility for rice improvement. **JARQ**, Tsukuba, v. 13, n. 3, p. 153-156, 1979.

GAMUYAO, R.; CHIN, J. H.; PARIASCA-TANAKA, J.; PESARESI, P.; CATAUSAN, S.; DALID, C.; SLAMET-LOEDIN, I.; TECSON-MENDOZA, E. M.; WISSUWA, M.; HEUER, S. The protein kinase Pstol1 from traditional rice confers tolerance of phosphorus deficiency. **Nature**, London, v. 488, n. 7412, p. 535-539, 2012.

GAUTNEY, T. L.; HAYNES, F. L. Recurrent selection for heat tolerance in diploid potatoes (*Solanum tuberosum*). **American Potato Journal**, Takoma, v. 60, no 7, p. 537-542, 1983.

GEORGE, T.; MAGBANUA, R.; RODER, W.; VAN KEER, K.; TRÉBUIL, G.; REOMA, V. Upland rice response to phosphorus fertilization in Asia. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 6, p. 1362-1370, 2001.

GERALDI, I. O. Selección recurrente en el mejoramiento de plantas. In: GUIMARÃES, E. P. (Ed.) **Selección recurrente en arroz**. Cali: CIAT, 1997. p. 3-11.

GRANT, C. A.; FLATEN, D. N.; TOMASIEWICZ, D. J.; TOMASIEWICZ, D. J.; HEPPARD, S. C. **A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta**. Piracicaba: ESALQ, 2001. (Informações Agronômicas, n. 95).

GUIMARÃES, C. M.; FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P. **Como a planta de arroz se desenvolve**. Piracicaba: Potafós, 2002. 12 p.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; NEVES, P. C. F. Resposta fenotípica de arroz de terras altas ao estresse de fósforo no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 578-584, 2007.

HEINEMANN, A. B.; SENTELHAS, P. C. Environmental group identification for upland rice production in central Brazil. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68, n. 5, p. 540-547, 2011.

HEINZ, R.; MOTA, L. H. S.; GONÇALVES, M. C.; NETO, A. L. V.; CARLESSO, A. Seleção de progênes de meios-irmãos de milho para eficiência no uso de nitrogênio. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 4, p. 731-739, 2012.

HEUER, S.; LU, X.; CHIN, J. H.; TANAKA, J. P.; KANAMORI, H.; MATSUMOTO, T.; DE LEON, T.; ULAT, V. J.; ISMAIL, A. M.; YANO, M. Comparative sequence analyses of the major quantitative trait locus *phosphorus uptake 1* (Pup1) reveal a complex genetic structure. **Plant biotechnology journal**, Oxford, v. 7, n. 5, p. 456-471, 2009.

HOARD, K. G.; CROSBIE, T. M. S1-line recurrent selection for cold tolerance in two maize populations. **Crop Science**, Madison, v. 25, n. 6, p. 1041-1045, 1985.

HORST, W. J.; KAMH, M.; JIBRIN, J. M.; CHUDE, V. O. Agronomic measures for increasing P availability to crops. **Plant and Soil**, The Hague, v. 237, n. 2, p. 211-223, 2001.

IRRI. International Rice Research Institute. **Rice in Brazil**. Disponível em: <http://www.irri.org/index.php?option=com_k2&view=item&id=10916:rice-in-brazil&Itemid=100340&lang=en>. Acesso em: 30 maio 2014.

ISMAIL, A. M.; HEUER, S.; THOMSON, M. J.; WISSUWA, M. Genetic and genomic approaches to develop rice germplasm for problem soils. **Plant molecular biology**, Dordrecht, v. 65, n. 4, p. 547-570, 2007.

KOIDE, Y.; PARIASCA TANAKA, J.; ROSE, T.; FUKUO, A.; KONISHO, K.; YANAGIHARA, S.; FUKUTA, Y.; WISSUWA, M. QTLs for phosphorus deficiency tolerance detected in upland NERICA varieties. **Plant Breeding**, Berlin, v. 132, n. 3, p. 259-265, 2013.

KOTTEARACHCHI, N. S.; WIJESEKARA, U. A. D. S. L. Implementation of *PUP 1* gene based markers for screening of donor varieties for phosphorus deficiency tolerance in rice. **Indian Journal of Plant Sciences**, Jaipur, v. 2, n. 4, p. 76-83, 2013.

LANDI, P.; FRASCAROLI, E.; LOVATO, A. Divergent full-sib recurrent selection for germination at low temperature in a maize population. **Euphytica**, Dordrecht, v. 64, n. 1-2, p. 21-29, 1992.

LANG, N. T.; BUU, B. C. Mapping QTLs for phosphorus deficiency tolerance in rice (*Oryza sativa* L.). **Omonrice**, Can Tho, v. 14, n. 1, p. 1-9, 2006.

LANNA, A. C.; CARVALHO, M. A. F.; HEINEMANN, A. B.; STEIN, V. C. **Panorama Ambiental e Fisio-Molecular do Arroz de Terras Altas**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2012, 34 p. Embrapa Arroz e Feijão: Documentos nº 274.

LI, J.; XIE, Y.; DAI, A.; LIU, L.; LI, Z. Root and shoot traits responses to phosphorus deficiency and QTL analysis at seedling stage using introgression lines of rice. **Journal of Genetics and Genomics**, Beijing, v. 36, n. 3, p. 173-183, 2009.

LI, Y.D.; WANG, Y.-J.; TONG, Y.-P.; GAO, J.-G.; ZHANG, J. S.; CHEN, S.-Y. QTL mapping of phosphorus deficiency tolerance in soybean (*Glycine max* L. Merr.). **Euphytica**, Dordrecht, v. 142, n. 1-2, p. 137-142, 2005.

LIANG, Q.; CHENG, X.; MEI, M.; YAN, X.; LIAO, H. QTL analysis of root traits as related to phosphorus efficiency in soybean. **Annals of Botany**, London, v. 106, n. 1, p. 223-234, 2010.

LIAO, H.; YAN, X.; RUBIO, G.; BEEBE, S. E.; BLAIR, M. W.; LYNCH, J. P. Genetic mapping of basal root gravitropism and phosphorus acquisition efficiency in common bean. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 31, n. 10, p. 959-970, 2004.

LIAO, H.; WAN, H.; SHAFF, J.; Wang, X.; Yan, X.; Kochian, L. V. Phosphorus and aluminum interactions in soybean in relation to aluminum tolerance. Exudation of specific organic acids from different regions of the intact root system. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 141, n. 2, p. 674-684, 2006.

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

LYNCH, J. P.; BROWN, K. M. Topsoil foraging – an architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. **Plant and Soil**, The Hague, v. 237, n. 2, p. 225-237, 2001

LOPES, A. S. Soils under cerrado: A success story in soil management. **Better crops international**, Norcross, v. 10, n. 2, p. 9-15, 1996.

LOUGHMAN, B. C., ROBERTS, S. C., et GOODWIN-BAILEY, C. I. Varietal differences in physiological and biochemical responses to changes in the ionic environment. **Plant and Soil**, The Hague, v. 72, n. 2-3, p. 245-259, 1983.

MAEJIMA, E.; WATANABE, T.; OSAKI, M.; WAGATSUMA, T. Phosphorus deficiency enhances aluminum tolerance of rice (*Oryza sativa*) by changing the physicochemical characteristics of root plasma membranes and cell walls. **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 171, n. 2, p. 9-15, 2014.

MAJUMDER, N. D.; BORTHAKUR, D. N.; RAKSHIT, S. C. Heterosis in rice under phosphorous stress. **Indian Journal Genetics and Plant Breeding**, New Delhi, v. 49, n.1, p. 231-235, 1989.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Brasil:** Projeções do Agronegócio 2011/2012 a 2021/2022. Disponível em: <[http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Ministerio/gestao/projecao/Projecoes%20do%20Agronegocio%20Brasil%202011-20012%20a%202021-2022%20\(2\)\(1\).pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Ministerio/gestao/projecao/Projecoes%20do%20Agronegocio%20Brasil%202011-20012%20a%202021-2022%20(2)(1).pdf)>. Acesso em: 30 maio 2014.

MARIOTTI, J.A.; OYARZABAL, E.S.; OSA, J.M.; BULACIO, A.N.R.; ALMADA, G.H. Analisis de estabilidad y adaptabilidad de genótipos de caña de azucar. **Revista Agronomica del Noroeste Argentino**, Tucuman, v.13, n.1-4, p.105-27, 1976.

MELO, P. G. S.; MORAIS, O. P.; ALMEIDA, J. BRSGO Serra Dourada - cultivar de arroz de terras altas para agricultura familiar do estado de Goiás. In: Embrapa Arroz e Feijão-Artigo em anais de congresso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 5., 2009, Guarapari. **Anais...** Vitória: Incaper, 2010.

MENDES, F. F., GUIMARÃES, L. J. M.; SOUZA, J. C.; GUIMARÃES, P. E. O.; MAGALHAES, J. V.; GARCIA, A. A. F.; PARENTONI, S. N.; GUIMARAES, C. D. Genetic Architecture of phosphorus use efficiency in tropical maize cultivated in a low-P Soil. **Crop Science**, Madison, v.54, n.1, p.1530-1538, 2014.

MORAIS, O. P.; SILVA, J. C.; CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; NEVES, P. C. F. Estimación dos parâmetros genéticos da população de arroz irrigado CNA-IRAT 4/0/3. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 4, p. 421-433, 1997.

MORAIS, O. P.; BRESEGHELLO, F.; CASTRO, E. D. M.; SOARES, ANTÔNIO ALVES; PEREIRA, J. A.; UTUMI, MARLEY MARICO; PRABHU, A. S.; BASSINELLO, PRISCILA ZACKZUK. **Progressos em dois ciclos de seleção recorrente na população CG3 de arroz de terras altas**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2008, 27 p. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento: Embrapa Arroz e Feijão.

NASS, L. L.; PATERNIANI, E. Pre-breeding: a link between genetic resources and maize breeding. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 3, p. 581-587, 2000.

NI, J. J.; WU, P.; SENADHIRA, D.; HUANG, N. Mapping QTLs for phosphorus deficiency tolerance in rice (*Oryza sativa* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 97, n. 8, p. 1361-1369, 1998.

OLIVEIRA, V. R.; CASALI, V. W. D.; PEREIRA, P. R. G.; CRUZ, C. D.; PIRES, N. D. M. Tolerância de genótipos de pimentão ao baixo teor de fósforo no solo. *Bragantia*, Campinas, v. 58, n. 1, p. 125-139, 1999.

OTANI, T.; AE, N. Sensitivity of phosphorus uptake to changes in root length and soil volume. **Agronomy journal**, Madison, v. 88, n. 3, p. 371-375, 1996.

OZTURK, L.; EKER, S.; TORUN, B.; CAKMAK, I. Variation in phosphorus efficiency among 73 bread and durum wheat genotypes grown in a phosphorus-deficient calcareous soil. **Plant and soil**, The Hague, v. 269, n. 1-2, p. 69-80, 2005.

PAIRUNAN, A. K.; ROBSON, A. D.; ABBOTT, L. K. The effectiveness of vesicular-arbuscular mycorrhizas in increasing growth and phosphorus uptake of subterranean clover from phosphorus sources of different solubilities. **New Phytologist**, Oxford, v. 84, n. 2, p. 327-338, 1980.

PANIGRAHY, M.; RAO, D. N.; SARLA, N. Molecular mechanisms in response to phosphate starvation in rice. **Biotechnology advances**, New York, v. 27, n. 4, p. 389-397, 2009.

PARENTONI, S. N. Seleção para estresses abióticos como fator de redução de riscos na exploração agrícola: interação melhoramento de plantas, fisiologia vegetal e biologia molecular. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 1., 2001, Santo Antônio de Goiás. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2001.

PARENTONI, S. N.; MENDES, F. F.; GUIMARÃES, L. J. M. Melhoramento para eficiência no uso de fósforo. In: FRITSCH NETO, R.; BORÉM, A. **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. Visconde de Rio Branco: Suprema, 2011. 250 p.

PINHEIRO, B. S.; CASTRO, E. M.; GUIMARÃES, C. M. Sustainability and profitability of aerobic rice production in Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 97, n. 1, p. 34-42, 2006.

PRABHU, A. S.; SILVA, G. B. **Época de adubação de cobertura de nitrogênio e potássio em arroz de terras altas, no controle da brusone nas panículas**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005, 4 p. Embrapa Arroz e Feijão: Circular técnica nº 75.

RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. F. B.; SANTOS, J. B. Genetic progress after four cycles of recurrent selection for yield and grain traits in common bean. **Euphytica**, Dordrecht, v. 144, n. 1-2, p. 23-29, 2005.

RAMALHO, M. A. P.; FERREIRA, D. F.; OLIVEIRA, A. C. **Experimentação em genética e melhoramento de plantas**. Lavras: UFLA, 2012b. ed. 3. 322p.

RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. F. B.; SANTOS, J. B.; NUNES, J. A. R. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. Lavras: UFLA, 2012a. 522 p.

RANGEL, P. H. N.; NEVES, P. C. F. **Seleção recorrente em arroz irrigado no Brasil: guia prático**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1995, 24 p. Embrapa Arroz e Feijão: Documentos nº 53.

RANGEL, P. H. N.; ZIMMERMANN, F. J. P.; NEVES, P. C. F.. Estimativas de parâmetros genéticos e resposta à seleção nas populações de arroz irrigado CNA-IRAT 4PR e CNA-IRAT 4ME. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 33, n. 6, p. 905-912, 1998.

REINA, E.; PELUZIO, J. M.; AFFERRI, F. S.; OLIVEIRA JUNIOR, W. P.; SIEBENEICHLER, S. C. Genetic divergence and phosphorus use efficiency in the soybean with a view to biodiesel production. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 2, p. 344-350, 2014.

REIS, M. C.; SOUZA, J. C.; RAMALHO, M. A. P.; GUEDES, F. L.; SANTOS, P. H. A. D. Progresso genético com a seleção recorrente recíproca para híbridos interpopulacionais de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 12, p. 1667-1672, 2009.

REITER, R. S.; COORS, J. G.; SUSSMAN, M. R.; GABELMAN, W. H. Genetic analysis of tolerance to low-phosphorus stress in maize using restriction fragment length polymorphisms. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 82, n. 5, p. 561-568, 1991.

REGENATO NETO, A.; JUNIOR, E. U. R.; GALLO, P. B.; DE FREITAS, J. G., AZZINI, L. E. Comportamento de genótipos de arroz de terras altas no estado de São Paulo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 3, p. 512-519, 2013.

RESENDE, M. D. V. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 561 p.

RODRIGUES, F.; MAGALHÃES, J. V.; GUIMARÃES, C. T.; TARDIN, F. D.; SCHAFFERT, R. E. Seleção de linhagens de sorgo granífero eficientes e responsivas à aplicação de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 8, p. 613-621, 2014.

ROSE, T. J.; IMPA, S. M.; ROSE, M. T.; PARIASCA-TANAKA, J.; MORI, A.; HEUER, S.; JOHNSON-BEEBOUT, S. E.; WISSUWA, M. Enhancing phosphorus and zinc acquisition efficiency in rice: a critical review of root traits and their potential utility in rice breeding. **Annals of botany**, London, v. 112, n. 2, p. 331-345, 2013.

ROSIELLE, A. A.; HAMBLIN, J. Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment. **Crop Science**, The Hague, v. 21, n. 6, p. 943-946, 1981.

ROTILI, E. A.; FIDELIS, R. R.; SANTOS, M. M.; BARROS, H. B.; PINTO, L. C. Eficiência do uso e resposta à aplicação de fósforo de cultivares de arroz em solos de terras altas. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 3, p. 705-709, 2010.

SAHRAWAT, K. L.; JONES, M. P.; DIATTA, S. Plant phosphorus and rice yield in an Ultisol of the humid forest zone in West Africa. **Communications in Soil Science & Plant Analysis**, New York, v. 29, n. 7-8, p. 997-1005, 1998.

SALLAH, P. Y. K.; EHLKE, N. J.; GEADELMANN, J. L. Progress from selection in La Posta maize population evaluated under three nitrogen fertilizer levels. **African Crop Science Journal**, Kampala, 1998, vol. 6, no 3, p. 241-248.

SANT'ANA, E. P.; SANT'ANA, E. V. P.; FAGERIA, N. K.; FREIRE, A. B. Utilização de fósforo e características do sistema radicular e da parte aérea da planta de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 2, p. 370-381, 2003.

SANTOS, M. X.; GUIMARÃES, P. E. O.; PACHECO, C. A. P.; FRANÇA, G. E.; PARENTONI, S. N.; GOMES, E. E.; LOPES, M. A. Melhoramento intrapopulacional no sintético elite NT para solos pobres em nitrogênio. I. Parâmetros genéticos de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 1, p. 55-61, 1998.

SANTOS, M. X.; MARRIEL, I. E.; PACHECO, C. A. P.; GAMA, E. E. G.; PARENTONI, S. N.; GUIMARAES, P. E. O.; CARVALHO, H. W.; MEIRELLES, W. F.; RIBEIRO, P. H. E.; FRANÇA, G. E. Quinto ciclo de seleção recorrente na população de milho sintético elite NT em solos com baixo nível de nitrogênio. **Revista Científica Rural**, Bagé, v. 8, n. 1, p. 79-84, 2003.

SANTOS, P. G.; SOARES, A. A.; RAMALHO, M. A. P. Predição do potencial genético de populações segregantes de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 4, p. 659-670, 2001.

SAS Institute (2012). **SAS technical report SAS/STAT software**. Cary Nc: SAS Institute.

SATTERTHWAITE, F. E. An Approximate Distribution of Estimates of Variance Components. **International Biometric Society**, Alexandria, v. 2, n. 6, p. 110-114, 1946.

SÁVIO, F. L.; FARIA, P. N.; PEREIRA, W. A. Divergência genética em híbridos de sorgo cultivados sob diferentes níveis de fósforo, em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 7, n 03, p. 305-321, 2010.

SILVA, H. D.; FERREIRA, D. F.; PACHECO, C. A. P. Avaliação de quatro alternativas de análise de experimentos em látice quadrado, quanto à estimação de componentes de variância. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 1, p. 117-123, 2000.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília: Embrapa Cerrados, v.4, 2004. 416 p.

SARKAR, S.; YELNE, R.; CHATTERJEE, M.; DAS, P.; DEBNATH, S.; CHAKRABORTY, A.; BHATTACHARYYA, S. Screening for phosphorus (P) tolerance and validation of *Pup-1* linked markers in indica rice. **Indian Journal of Genetics and Plant Breeding**, New Delhi, v. 71, n. 3, p. 209-213, 2011.

SHIMIZU, A.; KATO, K.; KOMATSU, A.; MOTOMURA, K.; IKEHASHI, H. Genetic analysis of root elongation induced by phosphorus deficiency in rice (*Oryza sativa* L.): fine QTL mapping and multivariate analysis of related traits. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 117, n. 6, p. 987-996, 2008.

SINGH, R. J.; IKEHASHI, H. I. Monogenic male-sterility in rice: introduction, identification and inheritance. **Crop Science**, Madinson, v. 21, n. 1, p. 286-289, 1981.

STEFANO, N. M. Análise do desempenho da indústria arrozeira do Rio Grande do Sul. **Revista de Desenvolvimento Econômico**, Salvador, v. 11, n 19, 2011.

SU, J.; XIAO, Y.; LI, M.; LIU, Q.; LI, B.; TONG, Y.; JIA, J.; LI, Z. Mapping QTLs for phosphorus-deficiency tolerance at wheat seedling stage. **Plant and Soil**, The Hague, v.

281, n. 1-2, p. 25-36, 2006.

SU, J.; ZHENG, Q.; LI, H.-W.; LI, B.; JING, R.-L.; TONG, Y.-P.; LI, Z. S. Detection of QTLs for phosphorus use efficiency in relation to agronomic performance of wheat grown under phosphorus sufficient and limited conditions. **Plant Science**, Limerik, v. 176, n. 6, p. 824-836, 2009.

TANGUILIG, V. C.; YAMBAO, E. B.; O'TOOLE, J. C.; DATTA, S. K. Water stress effects on leaf elongation, leaf water potential, transpiration, and nutrient uptake of rice, maize, and soybean. **Plant and Soil**, The Hague, v. 103, n. 2, p. 155-168, 1987.

TERRA, T. G. R.; BARROS LEAL, T. C. A.; BORÉM, A.; RANGEL, P. H. N. Tolerância de linhagens de arroz de terras altas à seca. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 2, 2013.

TONELLO, L. P.; SILVA, J.; RAMOS, D. P.; SOUSA, S. A.; FIDELIS, R. R. Eficiência do uso de fósforo em genótipos de arroz cultivados em solos de terras altas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 7, n. 2, p. 25-32, 2012.

TROLOVE, S. N.; HEDLEY, M. J.; KIRK, G. J. D.; BOLAN, N. S.; LOGANATHAN, P. Progress in selected areas of rhizosphere research on P acquisition. **Soil Research**, Lismore, v. 41, n. 3, p. 471-499, 2003.

TYAGI, W.; RAI, M.; DOHLING, A. Haplotype analysis for *Pup1* locus in rice genotypes of North Eastern and Eastern India to identify suitable donors tolerant to low phosphorus. **Sabao Journal of Breeding And Genetics**, Manila, v. 44, n. 2, p. 398-405, 2012.

VAN KAUWENBERGH, S. J. International Fertilizer Development Center (IFDC). **World phosphate rock reserves and resources**.

Disponível em: <http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADW835.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2014.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, Cambridge, v. 157, n. 3, p. 423-447, 2003.

VENKOVSKY, R. Herança quantitativa. In PATERNIANI, E.; VIEGAS, G. P. (Eds.) **Melhoramento e produção do milho**. 2. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, cap. 5, p. 135-214.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. **Genética biométrica no fitomelhoramento**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992. 496 p.

VINOD, K. K.; HEUER, S. **Approaches towards nitrogen-and phosphorus-efficient rice**. Disponível em: <<http://aobpla.oxfordjournals.org/content/2012/pls028.full>>. Acesso em: 10 out 2014.

VON UEXKULL, H. R.; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant and soil**, The Hague, v. 171, n. 1, p. 1-15, 1995.

WISSUWA, M. Combining a modelling with a genetic approach in establishing associations between genetic and physiological effects in relation to phosphorus uptake. **Plant and Soil**, The Hague, v. 269, n. 1-2, p. 57-68, 2005.

WISSUWA, M.; AE, N. Genotypic variation for tolerance to phosphorus deficiency in rice and the potential for its exploitation in rice improvement. **Plant Breeding**, Berlin, v. 120, n. 1, p. 43-48, 2001a.

WISSUWA, M.; AE, N. Further characterization of two QTLs that increase phosphorus uptake of rice (*Oryza sativa* L.) under phosphorus deficiency. **Plant and Soil**, The Hague, v. 237, n. 2, p. 275-286, 2001b.

WISSUWA, M.; MAZZOLA, M.; PICARD, C. Novel approaches in plant breeding for rhizosphere-related traits. **Plant and Soil**, The Hague, v. 321, n. 1-2, p. 409-430, 2009.

WISSUWA, M.; WEGNER, J.; AE, N.; YANO, M. Substitution mapping of Pup1: a major QTL increasing phosphorus uptake of rice from a phosphorus-deficient soil. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 105, n. 6-7, p. 890-897, 2002.

WISSUWA, M.; YANO, M.; AE, N. Mapping of QTLs for phosphorus-deficiency tolerance in rice (*Oryza sativa* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 97, n. 5, p. 777-783, 1998.

YAN, X.; LIAO, H.; BEEBE, S.; BLAIR, M.; LYNCH, J. QTL mapping of root hair and acid exudation traits and their relationship to phosphorus uptake in common bean. **Plant and Soil**, The Hague, v. 265, n. 1-2, p. 17-29, 2004.

ZHANG, D.; CHENG, H.; GENG, L. Detection of quantitative trait loci for phosphorus deficiency tolerance at soybean seedling stage. **Euphytica**, Dordrecht, vol. 167, no 3, p. 313-322, 2009.

APÊNDICES

Apêndice A Resultado da análise química do solo de Sinop e Santo Antônio de Goiás.

Local	Ca	Mg	Al	H+Al	K	P	MO	pH CaCl ₂	Argila g/kg
	cmol _c .dm ⁻³					mg.dm ⁻³	g.dm ⁻³		
Sinop	2,90	0,70	0,00	5,10	0,13	2,50	35,0	5,20	320
Santo Antônio de Goiás	1,08	0,50	0,29	2,29	0,14	0,97	16,8	4,59	630

Apêndice B Média do caráter produção de grãos (PG, em kg ha⁻¹) nas condições de baixo e alto nível de fósforo (P) no solo, Média Harmônica da Performance Relativa (*MHPR*), Índice de Tolerância à Deficiência de P (*IT*) e a média conjunta para ambos os níveis de P no solo. As 189 progêneses S_{0,2} e as sete testemunhas.

Tratamento	Genótipo	Média			PR		MHPR	IT
		Baixo P	Alto P	Conjunta	Baixo P	Alto P		
1	BRS_Pepita	3.906	4.571	2.826	1,56	1,33	1,43	1,18
2	BRS_Primavera	2.629	3.022	3.735	1,05	0,88	0,96	1,20
3	BRS_Esmeralda	3.379	4.876	4.306	1,35	1,41	1,38	0,96
4	BRS_Sertaneja	3.292	4.501	4.239	1,32	1,30	1,31	1,01
5	BRS_Bonança	3.636	3.555	3.897	1,45	1,03	1,21	1,41
6	BRSGO_Serra Dourada	3.767	3.703	4.127	1,51	1,07	1,25	1,40
7	BRS_Monarca	3.610	5.002	3.596	1,44	1,45	1,45	1,00
8	CNA9/3/1-1-4	2.683	3.785	3.234	1,07	1,10	1,08	0,98
9	CNA9/3/1-8-1	2.280	3.217	2.748	0,91	0,93	0,92	0,98
10	CNA9/3/1-8-2	2.344	3.299	2.821	0,94	0,96	0,95	0,98
11	CNA9/3/1-8-3	2.213	3.350	2.782	0,88	0,97	0,93	0,91
12	CNA9/3/1-8-4	2.510	3.624	3.067	1,00	1,05	1,03	0,95
13	CNA9/3/1-11-1	2.458	4.447	3.453	0,98	1,29	1,12	0,76
14	CNA9/3/1-11-2	2.970	3.480	3.225	1,19	1,01	1,09	1,18
15	CNA9/3/1-11-4	2.437	3.049	2.743	0,97	0,88	0,93	1,10
16	CNA9/3/1-11-5	2.525	3.652	3.088	1,01	1,06	1,03	0,95
17	CNA9/3/1-21-5	1.933	2.971	2.452	0,77	0,86	0,81	0,90
18	CNA9/3/1-22-1	1.724	3.379	2.552	0,69	0,98	0,81	0,70
19	CNA9/3/1-22-3	1.973	2.695	2.334	0,79	0,78	0,78	1,01
20	CNA9/3/1-22-5	2.240	2.015	2.128	0,90	0,58	0,71	1,53
21	CNA9/3/1-24-1	2.450	3.331	2.890	0,98	0,97	0,97	1,01
22	CNA9/3/1-24-2	2.351	3.330	2.840	0,94	0,97	0,95	0,97
23	CNA9/3/1-24-3	3.209	3.112	3.161	1,28	0,90	1,06	1,42
24	CNA9/3/1-24-4	2.315	3.372	2.843	0,93	0,98	0,95	0,95
25	CNA9/3/1-25-1	2.410	3.732	3.071	0,96	1,08	1,02	0,89
26	CNA9/3/1-25-2	2.707	2.439	2.573	1,08	0,71	0,86	1,53
27	CNA9/3/1-25-4	1.900	2.992	2.446	0,76	0,87	0,81	0,88
28	CNA9/3/1-25-5	2.222	4.064	3.143	0,89	1,18	1,01	0,75
29	CNA9/3/1-28-1	2.041	3.395	2.718	0,82	0,98	0,89	0,83
30	CNA9/3/1-31-1	2.440	3.026	2.733	0,98	0,88	0,92	1,11
31	CNA9/3/1-31-2	2.417	2.828	2.623	0,97	0,82	0,89	1,18
32	CNA9/3/1-31-3	2.424	4.137	3.281	0,97	1,20	1,07	0,81
33	CNA9/3/1-31-4	2.372	3.246	2.809	0,95	0,94	0,94	1,01
34	CNA9/3/1-31-5	2.321	2.877	2.599	0,93	0,83	0,88	1,11
35	CNA9/3/1-32-1	2.818	4.080	3.449	1,13	1,18	1,15	0,95
36	CNA9/3/1-32-2	2.611	3.539	3.075	1,04	1,03	1,03	1,02
37	CNA9/3/1-32-4	2.787	3.148	2.968	1,11	0,91	1,00	1,22
38	CNA9/3/1-32-5	3.202	4.406	3.804	1,28	1,28	1,28	1,00
39	CNA9/3/1-33-1	2.287	3.064	2.676	0,91	0,89	0,90	1,03
40	CNA9/3/1-34-1	1.857	2.865	2.361	0,74	0,83	0,78	0,89
41	CNA9/3/1-40-1	2.679	3.487	3.083	1,07	1,01	1,04	1,06
42	CNA9/3/1-40-3	2.757	3.949	3.353	1,10	1,14	1,12	0,96
43	CNA9/3/1-123-5	2.453	2.179	2.316	0,98	0,63	0,77	1,55
44	CNA9/3/1-40-5	3.213	3.878	3.545	1,28	1,12	1,20	1,14
45	CNA9/3/1-42-3	2.550	3.524	3.037	1,02	1,02	1,02	1,00
46	CNA9/3/1-42-5	2.235	3.894	3.064	0,89	1,13	1,00	0,79

Tratamento	Genótipo	Média			PR		MHPR	IT
		Baixo P	Alto P	Conjunta	Baixo P	Alto P		
47	CNA9/3/1-43-1	1.832	2.738	2.285	0,73	0,79	0,76	0,92
48	CNA9/3/1-43-3	1.936	3.338	2.637	0,77	0,97	0,86	0,80
49	CNA9/3/1-44-2	1.783	3.778	2.781	0,71	1,10	0,86	0,65
50	CNA9/3/1-45-1	2.191	3.652	2.922	0,88	1,06	0,96	0,83
51	CNA9/3/1-47-5	2.933	3.060	2.996	1,17	0,89	1,01	1,32
52	CNA9/3/1-50-1	2.518	3.319	2.919	1,01	0,96	0,98	1,05
53	CNA9/3/1-50-2	2.725	4.263	3.494	1,09	1,24	1,16	0,88
54	CNA9/3/1-50-3	2.289	4.015	3.152	0,91	1,16	1,02	0,79
55	CNA9/3/1-52-4	2.235	2.775	2.505	0,89	0,80	0,85	1,11
56	CNA9/3/1-52-5	2.062	3.970	3.016	0,82	1,15	0,96	0,72
57	CNA9/3/1-53-1	2.521	3.324	2.922	1,01	0,96	0,99	1,05
58	CNA9/3/1-53-2	2.488	3.594	3.041	0,99	1,04	1,02	0,95
59	CNA9/3/1-53-3	2.526	3.259	2.892	1,01	0,94	0,98	1,07
60	CNA9/3/1-54-4	2.943	4.053	3.498	1,18	1,17	1,18	1,00
61	CNA9/3/1-54-5	3.238	3.976	3.607	1,29	1,15	1,22	1,12
62	CNA9/3/1-57-3	2.247	4.115	3.181	0,90	1,19	1,02	0,75
63	CNA9/3/1-57-4	2.375	3.377	2.876	0,95	0,98	0,96	0,97
64	CNA9/3/1-58-1	2.187	3.616	2.901	0,87	1,05	0,95	0,83
65	CNA9/3/1-58-2	2.413	3.199	2.806	0,96	0,93	0,95	1,04
66	CNA9/3/1-58-3	3.012	3.884	3.448	1,20	1,13	1,16	1,07
67	CNA9/3/1-58-4	1.565	3.979	2.772	0,63	1,15	0,81	0,54
68	CNA9/3/1-62-1	2.226	2.648	2.437	0,89	0,77	0,82	1,16
69	CNA9/3/1-62-2	2.165	3.620	2.893	0,87	1,05	0,95	0,82
70	CNA9/3/1-62-3	2.338	4.215	3.277	0,93	1,22	1,06	0,76
71	CNA9/3/1-62-4	3.304	4.105	3.704	1,32	1,19	1,25	1,11
72	CNA9/3/1-62-5	2.980	3.965	3.472	1,19	1,15	1,17	1,04
73	CNA9/3/1-63-1	2.597	3.835	3.216	1,04	1,11	1,07	0,93
74	CNA9/3/1-63-2	2.313	3.460	2.886	0,92	1,00	0,96	0,92
75	CNA9/3/1-63-4	2.289	3.684	2.986	0,91	1,07	0,99	0,86
76	CNA9/3/1-63-5	2.853	4.096	3.474	1,14	1,19	1,16	0,96
77	CNA9/3/1-64-1	2.335	3.577	2.956	0,93	1,04	0,98	0,90
78	CNA9/3/1-64-2	1.804	4.044	2.924	0,72	1,17	0,89	0,62
79	CNA9/3/1-72-2	2.365	3.725	3.045	0,95	1,08	1,01	0,88
80	CNA9/3/1-74-1	2.324	3.233	2.778	0,93	0,94	0,93	0,99
81	CNA9/3/1-76-2	2.757	3.658	3.208	1,10	1,06	1,08	1,04
82	CNA9/3/1-78-3	2.265	2.010	2.138	0,91	0,58	0,71	1,55
83	CNA9/3/1-78-4	1.771	2.756	2.263	0,71	0,80	0,75	0,89
84	CNA9/3/1-81-3	2.368	3.215	2.791	0,95	0,93	0,94	1,02
85	CNA9/3/1-81-4	2.237	3.029	2.633	0,89	0,88	0,89	1,02
86	CNA9/3/1-81-5	2.566	3.720	3.143	1,03	1,08	1,05	0,95
87	CNA9/3/1-82-1	2.030	3.472	2.751	0,81	1,01	0,90	0,81
88	CNA9/3/1-82-2	2.708	3.387	3.048	1,08	0,98	1,03	1,10
89	CNA9/3/1-82-3	2.621	3.243	2.932	1,05	0,94	0,99	1,11
90	CNA9/3/1-82-4	3.366	3.465	3.415	1,35	1,00	1,15	1,34
91	CNA9/3/1-83-4	2.329	3.790	3.060	0,93	1,10	1,01	0,85
92	CNA9/3/1-83-5	2.523	4.031	3.277	1,01	1,17	1,08	0,86
93	CNA9/3/1-84-1	2.784	3.185	2.985	1,11	0,92	1,01	1,20
94	CNA9/3/1-84-2	2.985	3.217	3.101	1,19	0,93	1,05	1,28
95	CNA9/3/1-88-2	3.017	4.973	3.995	1,21	1,44	1,31	0,84
96	CNA9/3/1-88-5	2.883	3.584	3.233	1,15	1,04	1,09	1,11
97	CNA9/3/1-89-1	2.308	3.284	2.796	0,92	0,95	0,94	0,97
98	CNA9/3/1-89-4	2.947	3.426	3.187	1,18	0,99	1,08	1,19
99	CNA9/3/1-139-3	2.277	2.782	2.530	0,91	0,81	0,86	1,13
100	CNA9/3/1-90-2	3.134	3.562	3.348	1,25	1,03	1,13	1,21
101	CNA9/3/1-90-5	1.923	3.173	2.548	0,77	0,92	0,84	0,84
102	CNA9/3/1-91-2	2.548	3.997	3.272	1,02	1,16	1,08	0,88
103	CNA9/3/1-91-3	2.673	3.741	3.207	1,07	1,08	1,08	0,98

Tratamento	Genótipo	Média			PR		MHPR	IT
		Baixo P	Alto P	Conjunta	Baixo P	Alto P		
104	CNA9/3/1-91-5	2.803	3.477	3.140	1,12	1,01	1,06	1,11
105	CNA9/3/1-92-1	2.463	3.121	2.792	0,98	0,90	0,94	1,09
106	CNA9/3/1-92-2	2.477	3.119	2.798	0,99	0,90	0,95	1,09
107	CNA9/3/1-92-3	2.267	3.426	2.847	0,91	0,99	0,95	0,91
108	CNA9/3/1-93-2	1.524	3.181	2.353	0,61	0,92	0,73	0,66
109	CNA9/3/1-93-3	2.744	3.640	3.192	1,10	1,06	1,08	1,04
110	CNA9/3/1-93-4	2.792	3.858	3.325	1,12	1,12	1,12	1,00
111	CNA9/3/1-94-4	3.749	4.000	3.875	1,50	1,16	1,31	1,29
112	CNA9/3/1-147-1	2.753	2.846	2.799	1,10	0,82	0,94	1,33
113	CNA9/3/1-96-2	2.405	3.474	2.940	0,96	1,01	0,98	0,95
114	CNA9/3/1-96-5	2.452	3.595	3.023	0,98	1,04	1,01	0,94
115	CNA9/3/1-97-1	2.684	3.226	2.955	1,07	0,94	1,00	1,15
116	CNA9/3/1-97-3	2.665	2.854	2.759	1,06	0,83	0,93	1,29
117	CNA9/3/1-100-1	2.371	4.030	3.200	0,95	1,17	1,05	0,81
118	CNA9/3/1-102-1	2.737	3.848	3.293	1,09	1,12	1,10	0,98
119	CNA9/3/1-102-3	2.413	3.275	2.844	0,96	0,95	0,96	1,02
120	CNA9/3/1-102-4	2.382	3.135	2.758	0,95	0,91	0,93	1,05
121	CNA9/3/1-104-4	2.276	3.270	2.773	0,91	0,95	0,93	0,96
122	CNA9/3/1-105-3	2.770	3.183	2.976	1,11	0,92	1,01	1,20
123	CNA9/3/1-105-4	2.232	3.267	2.749	0,89	0,95	0,92	0,94
124	CNA9/3/1-105-5	2.140	2.999	2.570	0,86	0,87	0,86	0,98
125	CNA9/3/1-114-5	2.785	3.617	3.201	1,11	1,05	1,08	1,06
126	CNA9/3/1-115-3	2.276	2.856	2.566	0,91	0,83	0,87	1,10
127	CNA9/3/1-117-1	2.806	3.926	3.366	1,12	1,14	1,13	0,99
128	CNA9/3/1-117-2	2.569	3.642	3.105	1,03	1,06	1,04	0,97
129	CNA9/3/1-117-3	2.580	3.583	3.081	1,03	1,04	1,03	0,99
130	CNA9/3/1-117-4	2.060	3.164	2.612	0,82	0,92	0,87	0,90
131	CNA9/3/1-117-5	3.320	3.592	3.456	1,33	1,04	1,17	1,27
132	CNA9/3/1-119-1	1.948	3.709	2.828	0,78	1,08	0,90	0,72
133	CNA9/3/1-119-3	2.216	4.022	3.119	0,89	1,17	1,01	0,76
134	CNA9/3/1-119-4	2.414	3.671	3.042	0,96	1,06	1,01	0,91
135	CNA9/3/1-157-2	2.503	3.850	3.177	1,00	1,12	1,06	0,90
136	CNA9/3/1-121-2	1.743	1.891	1.817	0,70	0,55	0,61	1,27
137	CNA9/3/1-121-4	2.401	3.109	2.755	0,96	0,90	0,93	1,06
138	CNA9/3/1-121-5	2.223	3.724	2.974	0,89	1,08	0,97	0,82
139	CNA9/3/1-122-1	2.267	3.802	3.034	0,91	1,10	0,99	0,82
140	CNA9/3/1-122-2	2.433	3.256	2.844	0,97	0,94	0,96	1,03
141	CNA9/3/1-122-4	2.503	2.751	2.627	1,00	0,80	0,89	1,25
142	CNA9/3/1-122-5	2.279	3.240	2.759	0,91	0,94	0,92	0,97
143	CNA9/3/1-124-4	2.425	2.051	2.238	0,97	0,59	0,74	1,63
144	CNA9/3/1-124-5	1.295	2.606	1.950	0,52	0,76	0,61	0,68
145	CNA9/3/1-125-2	2.362	3.655	3.009	0,94	1,06	1,00	0,89
146	CNA9/3/1-125-5	2.318	3.087	2.702	0,93	0,89	0,91	1,04
147	CNA9/3/1-126-3	2.702	3.755	3.229	1,08	1,09	1,08	0,99
148	CNA9/3/1-127-2	2.544	4.247	3.395	1,02	1,23	1,11	0,83
149	CNA9/3/1-127-5	2.743	3.470	3.106	1,10	1,01	1,05	1,09
150	CNA9/3/1-128-2	2.972	3.988	3.480	1,19	1,16	1,17	1,03
151	CNA9/3/1-128-3	2.014	3.753	2.884	0,81	1,09	0,93	0,74
152	CNA9/3/1-129-2	1.905	2.614	2.260	0,76	0,76	0,76	1,00
153	CNA9/3/1-130-1	2.027	3.750	2.888	0,81	1,09	0,93	0,75
154	CNA9/3/1-130-5	2.356	3.134	2.745	0,94	0,91	0,92	1,04
155	CNA9/3/1-132-2	2.524	3.721	3.122	1,01	1,08	1,04	0,94
156	CNA9/3/1-132-5	2.523	3.615	3.069	1,01	1,05	1,03	0,96
157	CNA9/3/1-133-1	1.887	3.124	2.506	0,75	0,91	0,82	0,83
158	CNA9/3/1-133-2	2.154	2.753	2.453	0,86	0,80	0,83	1,08
159	CNA9/3/1-133-3	2.755	3.315	3.035	1,10	0,96	1,03	1,15
160	CNA9/3/1-133-4	2.184	3.209	2.696	0,87	0,93	0,90	0,94

Tratamento	Genótipo	Média			PR		MHPR	IT
		Baixo P	Alto P	Conjunta	Baixo P	Alto P		
161	CNA9/3/1-133-5	2.362	3.026	2.694	0,94	0,88	0,91	1,08
162	CNA9/3/1-135-3	2.792	3.488	3.140	1,12	1,01	1,06	1,10
163	CNA9/3/1-135-4	1.831	2.814	2.323	0,73	0,82	0,77	0,90
164	CNA9/3/1-136-1	2.878	3.888	3.383	1,15	1,13	1,14	1,02
165	CNA9/3/1-137-4	2.001	3.576	2.788	0,80	1,04	0,90	0,77
166	CNA9/3/1-138-1	2.485	3.034	2.759	0,99	0,88	0,93	1,13
167	CNA9/3/1-138-2	3.008	3.217	3.113	1,20	0,93	1,05	1,29
168	CNA9/3/1-139-1	2.297	3.430	2.864	0,92	0,99	0,95	0,92
169	CNA9/3/1-140-1	2.378	3.282	2.830	0,95	0,95	0,95	1,00
170	CNA9/3/1-142-2	2.674	3.679	3.177	1,07	1,07	1,07	1,00
171	CNA9/3/1-143-1	2.450	2.247	2.349	0,98	0,65	0,78	1,50
172	CNA9/3/1-143-2	2.536	2.305	2.421	1,01	0,67	0,81	1,52
173	CNA9/3/1-143-3	2.090	2.875	2.483	0,84	0,83	0,83	1,00
174	CNA9/3/1-145-3	2.588	2.550	2.569	1,03	0,74	0,86	1,40
175	CNA9/3/1-146-3	2.719	3.633	3.176	1,09	1,05	1,07	1,03
176	CNA9/3/1-149-1	2.431	3.625	3.028	0,97	1,05	1,01	0,92
177	CNA9/3/1-149-3	3.078	4.362	3.720	1,23	1,26	1,25	0,97
178	CNA9/3/1-149-4	2.515	3.044	2.779	1,01	0,88	0,94	1,14
179	CNA9/3/1-149-5	2.625	4.224	3.425	1,05	1,22	1,13	0,86
180	CNA9/3/1-151-2	2.428	3.400	2.914	0,97	0,99	0,98	0,98
181	CNA9/3/1-152-5	2.229	3.605	2.917	0,89	1,05	0,96	0,85
182	CNA9/3/1-153-2	2.636	2.907	2.772	1,05	0,84	0,94	1,25
183	CNA9/3/1-153-3	3.309	3.354	3.331	1,32	0,97	1,12	1,36
184	CNA9/3/1-153-5	2.370	2.980	2.675	0,95	0,86	0,90	1,10
185	CNA9/3/1-157-4	2.768	3.350	3.059	1,11	0,97	1,03	1,14
186	CNA9/3/1-158-4	3.138	3.528	3.333	1,25	1,02	1,13	1,23
187	CNA9/3/1-159-6	2.423	3.403	2.913	0,97	0,99	0,98	0,98
188	CNA9/3/1-161-2	2.400	3.797	3.099	0,96	1,10	1,03	0,87
189	CNA9/3/1-161-3	2.333	3.790	3.062	0,93	1,10	1,01	0,85
190	CNA9/3/1-161-4	2.612	3.782	3.197	1,04	1,10	1,07	0,95
191	CNA9/3/1-162-4	3.043	3.858	3.450	1,22	1,12	1,17	1,09
192	CNA9/3/1-162-5	2.385	3.210	2.797	0,95	0,93	0,94	1,02
193	CNA9/3/1-163-3	2.715	3.548	3.132	1,09	1,03	1,06	1,06
194	CNA9/3/1-163-4	3.004	3.978	3.491	1,20	1,15	1,18	1,04
195	CNA9/3/1-163-5	3.025	4.483	3.754	1,21	1,30	1,25	0,93
196	CNA9/3/1-192-2	1.252	2.464	1.858	0,50	0,71	0,59	0,70