



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA  
MESTRADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

LOUIZE NASCIMENTO

EFICIÊNCIA DE USO DE FÓSFORO EM GENÓTIPOS DE MELOEIRO

Mossoró

2020

LOUIZE NASCIMENTO

EFICIÊNCIA DE USO DE FÓSFORO EM GENÓTIPOS DE MELOEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Impactos Ambientais pelo Uso do Solo e da Água

Orientador: Prof. Dr. Glauber Henrique de Sousa Nunes

Coorientador: Prof. Dr. Francisco de Assis de Oliveira

Mossoró

2020

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N244e Nascimento, Louize .  
Eficiência de uso de fósforo em genótipos de meloeiro / Louize Nascimento. - 2020.  
62 f. : il.

Orientador: Glauber Henrique de Sousa Nunes .  
Coorientador: Francisco de Assis de Oliveira.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água, 2020.

1. Aquisição de fósforo. 2. Cucumis melo L. 3. melhoramento de plantas. 4. nutrição mineral. 5. utilização interna. I. Nunes , Glauber Henrique de Sousa , orient. II. Oliveira, Francisco de Assis de , co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

LOUIZE NASCIMENTO

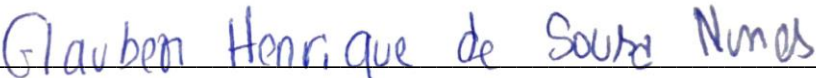
EFICIÊNCIA DE USO DE FÓSFORO EM GENÓTIPOS DE MELOEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

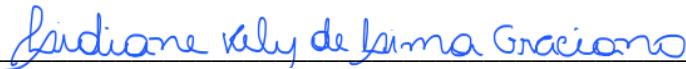
Linha de Pesquisa: Impactos Ambientais pelo Uso do Solo e da Água

Defendida em: 18/05/2020

**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Glauber Henrique de Sousa Nunes (UFERSA)  
Presidente



Dra. Lidiane Kely de Lima Graciano (UFERSA)  
Membro externo ao PPGMSA



Dra. Cynthia Cavalcanti de Albuquerque (UERN)  
Membro externo à instituição

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus por permitir concretizar esse sonho.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água (PPGMSA), pela oportunidade de realizar um mestrado e aperfeiçoar meus conhecimentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudo.

Ao meu orientador Glauber Henrique de Sousa Nunes, por todo ensinamento repassado durante o mestrado, disponibilidade em ajudar e amizade construída que levarei por toda vida.

Ao meu coorientador Francisco de Assis de Oliveira, que aceitou o convite de participar e contribuir com essa pesquisa, sempre ajudando e disponível para tirar dúvidas. A sua contribuição foi essencial.

Aos membros da banca examinadora: Profa. Dra. Lidiane Kely de Lima e Profa. Dra. Cynthia Cavalcanti de Albuquerque pela valiosa contribuição na dissertação.

Ao meu filho Charles Darwin Nascimento Oliveira, razão da minha vida e luta por dias melhores.

Aos meus pais Luciene Maria do Nascimento e Gilberto Costa da Silva pelo amor, apoio e dedicação. Sem vocês meus dias seriam mais difíceis.

Ao meu marido Jônata Fernandes de Oliveira pelo amor, companherismo e compreensão e por sonhar esse momento comigo.

Ao Sérgio por sua contribuição, ajuda na condução do experimento e amizade.

À amiga que ganhei nesse mestrado Daisy Daniele da Silva pela ajuda, principalmente no laboratório, só Deus sabe o que passamos e aprendemos.

Ao Sandy Thomaz dos Santos pelo auxílio em algumas análises do meu experimento.

Por fim, agradeço a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a conquista de mais uma etapa acadêmica.

**OBRIGADA!**

Ao meu filho Charles Darwin,  
amor incondicional.

**DEDICO**

“Eu tenho muitos amigos  
Tenho discos e livros  
Mas quando eu mais preciso  
Eu só tenho você”.  
(Humberto Gessinger)

## RESUMO

O estabelecimento de programas de melhoramento genéticos, visando maior eficiência de uso de fósforo, é importante para reduzir o uso de fertilizantes fosfatados e minimizar os efeitos ambientais e econômicos da agricultura. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência de uso de fósforo em genótipos de meloeiros cultivados em sistema de hidroponia. O experimento foi realizado em casa de vegetação da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, em Mossoró, Rio Grande do Norte. Avaliando 10 genótipos de meloeiro, sendo cinco cultivares melhorados (vereda, gaúcho redondo conesul (GRC), amarillo canário (Aca), gaúcho casca de carvalho (GCC) e trinity) e cinco não melhorados (A-02, A-16, A-29, A-50 e A-52), que foram submetidos a duas soluções nutritivas (S1 - solução nutritiva sem restrição de fósforo (P+) e S2- solução nutritiva com restrição de fósforo (P-)). O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 10 x 2, totalizando 20 tratamentos, com cinco repetições. Cada unidade experimental foi representada de um vaso plástico contendo 8,0 L de solução nutritiva e uma planta em cada vaso. As plantas foram avaliadas, aos 19 dias após o transplante, quanto ao número de folhas (NFO), diâmetro do caule (DCA), comprimento do ramo principal (CRP), comprimento do sistema radicular (CSR), volume do sistema radicular (VSR), clorofila (CLO), razão do teor de fósforo na raiz e parte aérea P(R/A), fósforo total (PTO), razão da matéria seca na raiz e parte aérea MS(R/A) e matéria seca total (MST). Verificou-se também a Eficiência de Uso de Fósforo (EUP), de Aquisição de Fósforo (EAP) e Utilização Interna de Fósforo (EUTP). Os dados foram submetidos às análises de variância (ANOVA) e, em seguida, procedeu o agrupamento de médias pelo teste de Scott Knott, onde foram obtidas respostas significativas. Para se ter melhor visão da variabilidade entre os genótipos, realizou-se o agrupamento hierárquico pelo método UPGMA a partir das distâncias de Mahalanobis. Os genótipos foram classificados em quatro grupos: Eficientes e Responsivos (ER), Ineficientes e Responsivos (IR), Eficientes e Não Responsivos (ENR) e Ineficientes e Não Responsivos (INR). As análises revelaram existência de variabilidade genética entre os genótipos para as variáveis da parte aérea, do sistema radicular, fósforo e matéria seca na solução sem restrição de fósforo (P+) e solução com restrição de fósforo (P-). A solução P- afetou o crescimento das plantas em todos os genótipos, provocando redução no NFO, DCA, CRP, VSR, PTO e MST, independente do genótipo, sendo as maiores reduções observadas para MST, PTO, CRP, NFO e VSR, obtendo-se perdas de 77,3; 70,5; 64,8; 60,0 e 47,7%, respectivamente. Por outro lado, as variáveis CSR, P(R/A) e MS(R/A) foram maiores nas plantas em solução P-, ocorrendo aumento de 50,0; 45,2 e 100%, para CSR, P(R/A) e MS(R/A), respectivamente. Assim, observa-se que houve aumento no CSR e redução do VSR quando há menor disponibilidade de fósforo. No entanto, a CLO não foi afetada pelo efeito de fósforo, uma vez que as médias estimadas nas soluções com e sem restrição de fósforo não diferem entre si pelo teste t de Student ( $p > 0,05$ ). Verificou-se maior EUP e EUTP na solução com menor disponibilidade de fósforo (P-), enquanto a maior EAP foi observada na solução P+. Com relação à EUP, os genótipos 'GCC' e A-29, foram os mais eficientes na solução P+. Em situação de baixo teor de fósforo (P-), 'trinity', A-02, A-16, A-29, A-50 e A-52 foram os mais eficientes. Concernente à EAP, na solução P+, destacaram-se os genótipos 'vereda', 'Aca', 'GCC', 'trinity', A-29 e A-52. Na solução P-, sobressaíram-se apenas o 'vereda'. Os genótipos mais eficientes na EUTP, na solução P+, foram os genótipos 'GCC' e A-29, enquanto com menor disponibilidade, 'trinity', A-02, A-29 e A-52. Os genótipos A-16, A-29, A-50, A-52 e 'trinity' foram classificados em eficientes e responsivos (ER) na solução com menor disponibilidade de fósforo.

**Palavras-chave:** Aquisição de fósforo, *Cucumis melo* L., melhoramento de plantas, nutrição mineral, utilização interna.



## ABSTRACT

The establishment of breeding programs in melon in order to improve the phosphorus use efficiency is important to reduce the use of phosphate fertilizers and minimize the environmental and economic effects of agriculture. The objective of this work was to determine the efficiency of phosphorus use of melon genotypes cultivated in hydroponic system. The experiment was carried out in a greenhouse at the Federal Rural University of Semi-Arid, in Mossoró, Rio Grande do Norte. Evaluating 10 melon genotypes, five of which are improved cultivars (vereda, gaúcho redondo conesul (GRC), amarillo canário (Aca), gaúcho casca de carvalho (GCC) e trinity) and five unimproved (A-02, A-16, A -29, A-50 and A-52), which were submitted to two nutrient solutions (S1 - nutrient solution without phosphorus restriction (P +) and S2- nutrient solution with phosphorus restriction (P-)). The experimental design adopted was in randomized blocks, in a 10 x 2 factorial scheme, totaling 20 treatments, with five replications. Each experimental unit was represented by a plastic pot containing 8.0 L of nutrient solution and a plant in each pot. Plants were evaluated, at 19 days after transplanting, for leaf number (NFO), stem diameter (DCA), length of the main branch (CRP), length of the root system (CSR), volume of the root system (VSR), chlorophyll (CLO), ratio of phosphorus content in the root and aerial part P(R/A), total phosphorus (PTO), dry matter ratio in the root and aerial part MS(R/A) and total dry matter (MST). Phosphorus Efficiency (EUP), Phosphorus Acquisition (EAP) and Internal Phosphorus Use (EUTP) were also verified. The data were subjected to analysis of variance (ANOVA) and, then, the grouping of means was performed by the Scott Knott test, where significant responses were obtained. In order to have a better view of the variability between the genotypes, the hierarchical grouping was performed by the UPGMA method from the Mahalanobis distances. The genotypes were classified into groups: Efficient and Responsive (ER), Inefficient and Responsive (IR), Efficient and Non-Responsive (ENR) and Inefficient and Non-Responsive (INR). The analyzes revealed the existence of genetic variability among the genotypes for the aerial part, root system, phosphorus and dry matter variables in the solution without phosphorus restriction (P +) and solution with phosphorus restriction (P-). The P- solution affected plant growth in all genotypes, causing a reduction in NFO, DCA, CRP, VSR, PTO and MST, regardless of the genotype, with the largest reductions observed for MST, PTO, CRP, NFO and VSR, obtaining losses of 77.3; 70.5; 64.8; 60.0 and 47.7%, respectively. On the other hand, the variables CSR, P(R/A) and MS(R / A) were higher in plants in P- solution, with an increase of 50.0; 45.2 and 100%, for CSR, P(R/A) and MS(R/A), respectively. Thus, it is observed that there was an increase in CSR and a reduction in VRS when there is less phosphorus availability. However, CLO was not affected by the of phosphorus effect, since the averages estimated in solutions with and without phosphorus restriction do not differ by the Student's t test ( $p > 0.05$ ). Higher EUP and EUTP were found in the solution with less phosphorus availability (P-), while the highest EAP was observed in the solution P+. Regarding the EUP, the genotypes, 'GCC' and A-29, were the most efficient in the P+ solution. In situations of low phosphorus content (P-), 'trinity', A-02, A-16, A-29, A-50 and A-52 were the most efficient. Concerning the EAP, in the P + solution, the genotypes 'vereda', 'Aca', 'GCC', 'trinity', A-29 and A-52 stood out. In the P- solution, only the 'vereda' stood out. The most efficient genotypes in the EUTP, in the P + solution, were the genotypes 'GCC' and A-29, while with less availability, 'trinity', A-02, A-29 and A-52. The genotypes A-16, A-29, A-50, A-52 and 'trinity' were classified as efficient and responsive (ER) in the solution with less phosphorus availability.

**Keywords:** Phosphorus acquisition, *Cucumis melo* L., plant breeding, mineral nutrition, internal utilization.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Localização do experimento, Imagem Google Earth, 2019 (A) vista externa da casa de vegetação onde foi realizado o experimento (B), Mossoró, RN .....	23
<b>Figura 2</b> - Produção dos genótipos de meloeiro em bandeja de polietileno.....	24
<b>Figura 3</b> - Transplântio das mudas (A), vaso plástico com tampa de isopor e um copo para a plântula ficar suspensa (B) e compressor de ar (C).....	25
<b>Figura 4</b> - Medidor portátil (Clorofilog) (A) realização das leituras do Índice Relativo de Clorofila (IRC) com o Medidor portátil (Clorofilog) (B).....	26
<b>Figura 5</b> - Variáveis da análise de crescimento: comprimento da parte aérea (A), diâmetro do caule e número de folhas (B), área foliar (C), comprimento do sistema radicular (D), volume da raiz (E) e massa seca da raiz (F) .....	28
<b>Figura 6</b> - Massa seca da amostra de 0,5 g sendo pesada (A) e realização da digestão nítrica (B) .....	28
<b>Figura 7</b> - Genótipo de meloeiro exposto a S1: solução nutritiva sem restrição de fósforo (P+) e S2: solução nutritiva com restrição de fósforo (P-). Escala na foto de 5 cm.....	31
<b>Figura 8</b> - Dendrograma gerado por UPGMA a partir das distâncias de Mahalanobis entre genótipos de meloeiro cultivados em soluções hidropônicas com alto e baixo teor de fósforo. Coeficiente de correlação cofenética, nas duas soluções, foi superior a 0,70. ....	35
<b>Figura 9</b> - Dispersão dos genótipos avaliados em função das eficiências de aquisição e uso interno em soluções hidropônicas com alto teor de fósforo (P+) e baixo teor de fósforo (P-). ....	38
<b>Figura 10</b> - Matéria seca de genótipos de meloeiro cultivados em de hidroponia em soluções com alto teor de fósforo (P+) e baixo teor de fósforo (P-). ER: Eficientes e Responsivos; ENR: Eficientes e Não Responsivos; INR: Ineficientes e Não Responsivos; IR: Ineficientes e Responsivos. ....	40
<b>Figura 11</b> - Índice de Seleção (ISE) de genótipos de meloeiro cultivados em de hidroponia em com alto teor de fósforo (P+) e baixo teor de fósforo (P-). ....	41

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Média de caracteres da parte aérea, do sistema radicular, índice relativo de clorofila total, do teor de fósforo e da matéria seca em soluções hidropônicas com alto e baixo teor de fósforo.....	32
<b>Tabela 2.</b> Médias dos caracteres da parte aérea, do sistema radicular, clorofila, do teor de fósforo e da matéria seca em genótipos de meloeiro cultivados em soluções hidropônicas com alto e baixo teor de fósforo.....	33
<b>Tabela 3.</b> Contribuição das variáveis para a divergência genética entre genótipos de meloeiro cultivados em soluções hidropônicas com alto e baixo teor de fósforo. ....	36
<b>Tabela 4.</b> Resumo da análise de variância (ANOVA) e médias dos índices de Eficiência de Uso de Fósforo (EUP), de Aquisição de Fósforo (EAP) e Utilização Interna (EUTP) em genótipos de meloeiro cultivados em soluções hidropônicas sem (P+) e com (P-) restrição de fósforo.....	37
<b>Tabela 5.</b> Contribuição da Soma de Quadrados de Genótipos (SQGen) da eficiência de aquisição de fosforo e eficiência de utilização de fósforo para a soma de quadrados da eficiência de uso de fósforo, coeficiente de correlação entre Xi e Y ( $r_{XiY}$ ), e relação entre razão entre desvio-padrão ( $S_{Xi}/S_Y$ ) em soluções hidropônicas sem (P+) e com (P-) restrição de fósforo. ....	39

## LISTA DE APÊNDICES

**Apêndice 1-** Croqui do experimento no ambiente protegido. (1: ‘Vereda’; 2: ‘Gaúcho redondo conesul’; 3: ‘Amarillo canário’; 4: ‘Gaúcho casca de carvalho melhorado’; 5: ‘Trinity’; 6: A-02; 7: A- 16; 8: A-29; 9: A-50 e 10: A-52)..... 61

**Apêndice 2-** Raízes dos genótipos de meloeiro. Legenda: S1: solução 1; S2: solução 2; (1: vereda; 2: gaúcho redondo conesul; 3: amarillo canário; 4: gaúcho casca de carvalho; 5: trinity ; 6: A-02; 7: A- 16; 8: A-29; 9: A-50 e 10: A-52). Escala na foto de 5 cm. .... 62

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	17
2. 1 <i>Cucumis melo</i> L.....	17
2. 2 Fósforo.....	17
2. 3 Raízes .....	19
2. 4 Melhoramento Genético .....	20
2. 5 Hidropônia.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1 Descrição do local .....	23
3.2 Germoplasma.....	23
3.3 Condução do experimento .....	24
3.4 Quantificação do teor de P na água .....	25
3.5 Caracteres avaliados .....	26
3.5.1 Análise de clorofila.....	26
3.5.2 Análise de crescimento.....	26
3.6 Quantificação do teor de P nas plantas.....	28
3.7 Eficiência da nutrição fosfatada .....	28
3.8 Delineamento experimental e tratamentos .....	29
3.9 Análises estatísticas .....	29
3.9.1 Análise de variância Uni e Multivariada .....	29
3.9.2 Agrupamento dos genótipos .....	29
3.9.3 Eficiência de Uso de Fósforo .....	30
4. RESULTADOS .....	31
4.1 Influência da disponibilidade de P reduz crescimento, teor de fósforo e matéria seca .....	31
4.2 Existe variabilidade entre os genótipos para variáveis da parte aérea, do sistema radicular, fósforo e matéria seca nas soluções P+ e P-.....	32

4.2.1 Análise Univariada .....	32
4.2.2 Análise Multivariada .....	34
4.3 Eficiência do Uso de Fósforo .....	36
4.4 Eficiência de uso e Responsividade ao Fósforo .....	39
5. DISCUSSÃO .....	42
5.1 Efeito da disponibilidade de fósforo e variabilidade genética.....	42
5.2 Eficiência de uso, responsividade e tolerância a restrição de Fósforo .....	44
6. CONCLUSÕES .....	48
7. REFERÊNCIAS .....	49
APÊNDICE 1 .....	61
APÊNDICE 2 .....	62

## 1. INTRODUÇÃO

O melão (*Cucumis melo* L.;  $2n = 2x = 24$ ) é uma espécie que pertence à família Cucurbitácea com alto valor comercial em todo o mundo (Vendruscolo et al., 2019; Sanabria-Verón et al., 2019). A região Nordeste do Brasil se destaca por ser a maior produtora e exportadora da fruta em razão das condições edafoclimáticas favoráveis e o uso de alta tecnologia empregada pelo setor produtivo. Além disso, destaca-se por sua importância na geração de muitos empregos e contribui para o desenvolvimento socioeconômico da região (Cavalcante Neto et al., 2020).

O fósforo (P) é um macronutriente imprescindível para a produção de alimentos e fibras em todo o mundo, pois desempenha um papel estrutural e regulatório essencial na fotossíntese, conservação de energia, metabolismo de carbono, reações enzimáticas e síntese de ácidos nucleicos (Vance et al., 2003). No entanto, mesmo quando abundante no solo, o fósforo está imobilizado porque forma compostos inorgânicos, quando associado a cátions como ferro, cálcio e alumínio; ou orgânicos, não assimiláveis pelas plantas (Akhtar et al., 2007). Estima-se que 30% dos solos agricultáveis apresenta alta capacidade de fixação do fósforo (Kochian, 2012).

O fósforo é disponibilizado às raízes das plantas por processos naturais de intemperismo, porém em pequenas quantidades; em razão disso, a carência de P em solos é considerado um fator limitante para a agricultura (Wang et al., 2010). Para superar a limitação da baixa disponibilidade de fósforo para as plantas, são aplicadas grandes quantidades de fertilizantes fosfatados para a manutenção do nível de produção agrícola mundial. Entretanto, a rocha de fósforo, matéria prima utilizada na fabricação da maioria dos fertilizantes fosfatados, é um recurso não renovável e estima-se seu esgotamento nos próximos séculos (Sattari et al., 2012). Em adição, a produção de fertilizantes em rocha de fósforo é localizada em poucos lugares, sendo Marrocos detentor de 85% das reservas mundiais (Cordell et al., 2009).

O mercado de fertilizantes vem respondendo à tendência de escassez de fósforo. Países com os Estados Unidos e a China, maior produtor mundial de fósforo, reduziram suas exportações do referido recurso (Van de Wiel et al., 2016). A falta de fontes de fertilizantes fosfatados localmente disponíveis e o alto custo de importação e transporte aumentam os custos de produção, reduzindo o lucro dos grandes produtores e impedindo que pequenos agricultores tenham acesso a esse recurso, especialmente em países em desenvolvimento (Wissuwa & Ae, 2001).

A aplicação de fertilizantes de fósforo pode ampliar a degradação do meio ambiente. Dentre os potenciais problemas estão eutrofização e hipóxia de corpos de água (Cordell et al.,

2009), acúmulo de metais pesados em solos aráveis (Van de Wiel et al., 2016) e contaminação de corpos d'água e lagos (Fita et al., 2011). Além disso, sabe-se que apenas 10 a 30% de fertilizante de fósforo aplicado no primeiro ano é absorvido pelas raízes das plantas, sendo uma parcela substancial acumulada no solo e não prontamente disponível para as plantas (Syers et al., 2008).

Concernente ao cenário supradescrito, pesquisadores têm defendido o cultivo de genótipos mais eficientes no uso de fósforo para diminuir a aplicação de fertilizantes fosfóricos e minimizar os impactos ambientais e econômicos da agricultura. A eficiência de uso é definida como a quantidade do nutriente acumulado no tecido por unidade de biomassa ou grãos produzidos (Rose et al., 2012). Esse índice de eficiência está associada a dois processos: aquisição e utilização interna do macronutriente. O primeiro, denominado de eficiência de aquisição, refere-se à capacidade da planta absorver o fósforo do solo. O segundo, denominado de eficiência de utilização interna, está associado à capacidade da planta alocar e mobilizar fósforo para a alta produção de biomassa em ambientes com restrição de fósforo (Rose et al., 2012; Sandaña & Pinochet, 2016).

Para iniciar um programa de melhoramento uma das primeiras ações de pesquisa é identificar genótipos eficientes no uso de fósforo no germoplasma disponível. Muitos estudos foram realizados especialmente em grandes culturas como milho (Reis et al., 2017), soja (Colombo et al., 2016), trigo (Barbieri et al., 2018), arroz (Lange et al., 2016) e feijão-caupi (Silva et al., 2019), sejam em condições de campo ou sistema de hidroponia. No caso do meloeiro, avaliando doze acessos de diferentes grupos botânicos, Fita et al. (2011) observaram que a eficiência de uso está associada à arquitetura do sistema radicular. Os acessos mais eficientes e indicados como genitores para melhoramento pertencem aos grupos botânicos *conomon* e *momordica* Naudi.

Entretanto, o meloeiro é uma espécie muito polimórfica para muitos caracteres morfológicos, bioquímicos e fisiológicos e ainda são escassas informações sobre a eficiência de uso de fósforo no germoplasma disponível. Também há poucos registros sobre a eficiência dos cultivares modernos e acessos utilizados pelos agricultores em condições de semiárido brasileiro. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência de uso de fósforo de genótipos de meloeiro em sistema hidropônico.



## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 *Cucumis melo* L.

A espécie *Cucumis melo* L., conhecida popularmente como meloeiro, pertence à família Cucurbitaceae e é composta por vários grupos (Vendruscolo et al., 2019). Essa curcubitácea é uma cultura tropical que possui alto valor comercial, sendo originário da Ásia Central e África, com maior diversidade botânica encontrada na Índia, Irã, Afeganistão e China (Sanabria-Verón et al., 2019). Além de apresentar ampla distribuição em todo mundo, o meloeiro possui grande variabilidade fenotípica que apresenta-se como importante fonte de germoplasma para programas de melhoramento genético (Dantas et al., 2012). Os meloeiros mais cultivados no Brasil pertencem ao grupo amarelo Inodorus, embora haja uma tendência a aumentar a demanda pelo Grupo Cantaloupensis, principalmente para exportação (Carvalho et al., 2017).

O melão tem grande representação no mercado mundial de frutas. No Brasil, a região do semiárido nordestino se destaca por ser o principal produtor de melão, fornecendo mais de 90% da produção nacional (Malta et al., 2017), além da sua importância na geração de muitos empregos e contribuir para o desenvolvimento socioeconômico da região (Carvalho et al., 2017).

Dentre os estados localizados na região semiárida do nordeste brasileiro, Rio Grande do Norte e Ceará se destacam como responsáveis pela maior parte da produção e exportação, em decorrência das condições climáticas - altas temperaturas ( $> 28^{\circ}\text{C}$ ), baixa precipitação ( $\approx 600 \text{ mm ano}^{-1}$ ) e alta luminosidade (Oliveira et al., 2019). Além da exportação, os estados do Rio Grande do Norte e Ceará também se destacam por uma produção destinada para o mercado interno (Lima et al., 2012). Nestes estados os polos de Assú-Mossoró (RN) e baixo Jaguaribe (CE) são os maiores produtores de melão do Brasil (Lopes et al., 2012).

Essa cultura é caracterizada por necessitar de alta demanda de nutrientes, sendo o fósforo (P) o macronutriente que mais limita a sua produção, assim, o manejo nutricional é um dos fatores mais importantes que condicionam o seu desempenho, pois, para que o melão atinja uma elevada produtividade a adubação é necessária (Sousa, 2018).

### 2.2 Fósforo

A produtividade primária em ambientes terrestres está diretamente relacionada com a quantidade de nutrientes do solo (Lana et al., 2017). Dentre os nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas, o fósforo (P) destaca-se por atuar na síntese de proteínas, pois

constituí nucleoproteínas necessárias à divisão celular, favorecendo o desenvolvimento do sistema radicular, aumentando a aquisição de água e nutrientes (Malavolta, 2006). Além de desempenhar funções nas plantas, pois o fósforo é contituente da membrana celular, compõem nucleotídeos e são importantes para fornecer energia celular (Shen et al., 2011).

O P é absorvido pelas raízes das plantas da solução do solo como fosfato inorgânico (Pi), como íons ortofosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) (Syers et al., 2008). A concentração de P no tecido vegetal varia de 0,05 a 0,50% seca peso (Vance et al., 2003), e sua falta no início do desenvolvimento da planta pode restringir o seu crescimento, a ponto de esta não conseguir se recuperar ao longo do ciclo, mesmo se fornecido a partir daí teores de fósforo na quantidade adequada (Grant et al., 2001).

Embora o Brasil apresente alto potencial agrícola, seus solos carecem de fósforo (Silva et al., 2017a) pois, no solo o P está imobilizado porque forma compostos inorgânicos, quando associado a cátions como ferro, cálcio e alumínio; ou composto orgânicos, não assimiláveis pelas plantas (Akhtar et al., 2007). O fósforo é mal difundido no solo, porque existe como componente integrante em sais ou em moléculas orgânicas, logo, não é facilmente disponível para as plantas (Syers et al., 2008).

De acordo com Balemi & Negisho (2012), 40% de terras aráveis do mundo exigem aplicações de fertilizantes de P o que implica altos custos financeiros e ambientais, como nos solos do Agropolo Mossoró-Assú. A carência de P em solos é considerado um fator limitante para o crescimento das culturas (Wang et al., 2010). Diante disso, a aplicação de fertilizantes contendo esse nutriente é recomendada para melhorar a sua quantidade no solo (Vance et al., 2003). E nos países em desenvolvimento, há uma grande aplicação de fósforo nos cultivos, aumentando os custos de produção (Vance et al., 2003; Cordell et al., 2009).

É importante mencionar que a rocha de fósforo, matéria prima utilizada na fabricação da maioria dos fertilizantes de fósforo, é um recurso não renovável e estima-se seu esgotamento daqui a 50-100 anos (Cordell et al., 2009). Estes autores afirmam ainda, que o uso excessivo de fertilizantes de fósforo resulta na eutrofização e hipóxia de corpos de água. Dessa forma, plantas eficientes em fósforo desempenham um papel importante no aumento da produção devido à escassez de recursos inorgânicos de fertilizantes com P, recursos terrestres e hídricos e crescentes preocupações ambientais (Wang et al., 2010).

O fósforo desempenha um papel importante em uma variedade de processos nas plantas, sendo eles: geração de energia, síntese de ácidos nucléicos, fotossíntese, glicólise, respiração, síntese de membranas, ativação/inativação enzimática, reações redox, sinalização, metabolismo de

carboidratos e fixação de nitrogênio (Vance et al., 2003). No meloeiro, o fósforo é importante para o desenvolvimento satisfatório e influencia na fase reprodutiva, aumentando o número de frutos e o teor total de sólidos solúveis (Amorim et al., 2008). Com essa perspectiva, uma das abordagens eficazes para o problema de deficiência de fósforo é desenvolver cultivares de plantas tolerantes a deficiência de P. Essas cultivares seriam mais eficientes na utilização e/ou na aquisição de P, dando rendimentos comparáveis com menor disponibilidade desse nutriente, que permita uma redução na utilização de fertilizantes fosfatados (Lynch, 2007).

As plantas têm evoluído diferentes adaptações morfológicas, fisiológicas e moleculares para lidar com a deficiência de fósforo. Estas incluem duas estratégias complementares: (i) melhorar a eficiência na utilização de fósforo para remobilizar fósforo e adaptação do metabolismo da planta, e (ii) melhorar a eficiência e aquisição de fósforo, modificando sistemas radiculares e mobilizando fósforo do solo (Vance et al. 2003). Mudanças morfológicas associadas à deficiência de fósforo incluem aumento no comprimento e número de raízes laterais, mudanças no gravitropismo da raiz e proliferação de pêlos radiculares (Bates & Lynch, 2001; Lynch & Brown, 2001; Lopez-Bucio et al. 2003). As mudanças na arquitetura da raiz para se adaptar às condições de baixa disponibilidade de P melhoraram, significativamente, a eficiência do seu uso.

A compreensão dos mecanismos reguladores relevantes, permitiria aos produtores de plantas, definir critérios de seleção para o desenvolvimento de culturas eficientes em P, reduzindo assim o uso de fertilizantes (Niu et al., 2013). Lynch et al. (1991) constataram que a deficiência de P em feijão comum reduziu o número de folhas, a área foliar, ramificações e taxa relativa de aparência foliar. Assim, a disponibilidade de P afetou, principalmente, por meio de efeitos na aparência das folhas e pela partição de biomassa entre os órgãos fotossintéticos e respiratórios, e não pelos efeitos na fotossíntese das folhas.

### 2. 3 Raízes

A raiz é o principal órgão vegetal responsável pela aquisição de todos os elementos minerais necessários para o crescimento das plantas (Vance et al., 2003). Com isso, pesquisas sobre o desenvolvimento da raiz têm recebido atenção devido à plasticidade fenotípica da raiz e da influência dessa variável sobre o crescimento de plantas (Postma et al., 2014).

A arquitetura das raízes é de suma importância para determinar a exploração do solo pelas plantas e sua aquisição de nutrientes. Essas características arquitetônicas sob controle genético incluem gravitropismo nas raízes basais, formação de raízes adventícias e ramificação lateral. As

características arquitetônicas que melhoram a estrutura do solo são importantes para a aquisição de fósforo de solos inférteis (Lynch, 2007). O entendimento da resposta do crescimento das raízes frente a diferentes condições de cultivo é essencial para práticas de manejo como forma de aumentar a exploração pelo sistema radicular para aquisição de água e nutrientes (Balbinot Junior et al., 2018).

O crescimento em condições de deficiência de P resulta em um alongamento reduzido da raiz primária, acompanhado pelo aumento da densidade da raiz lateral e seu alongamento (Vance et al., 2003). São exemplos de estudos com diferentes fontes de nutrientes e sua relação com o crescimento do sistema radicular de diversas culturas, os trabalhos realizados por Souza et al. (2017), onde avaliaram a influência de diferentes doses de fósforo sobre o crescimento inicial da cebolinha comum (*Allium fistulosum* L.), e concluíram que o aumento das doses de fósforo influenciaram de forma positiva a intensidade de verde nas folhas, matéria fresca total, matéria fresca e seca das raízes, e para o comprimento da maior raiz e número de raízes, verificaram um comportamento quadrático. Eloi et al. (2004) avaliaram o efeito de diferentes doses de nitrogênio e potássio no sistema radicular da gravioleira (*Annona muricata* L.) e tiveram como resultados, que no tratamento com doses de fertilizantes de 380 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de N e 420 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O as plantas apresentaram o melhor perfil vertical de distribuição radicular, e as doses elevadas de potássio inibiram o desenvolvimento radicular da gravioleira. Arruda et al. (2018) estudaram a eficiência da aquisição de nitrato e desenvolvimento do sistema radicular do arroz da cultivar Nipponbare e constataram que as plantas transgênicas apresentaram um maior acúmulo de NO<sub>3</sub> na raiz o que afetou o seu crescimento, as quais apresentaram uma menor massa seca de parte aérea e um sistema radicular menos desenvolvido. Mollier e Pellerin (1999) analisaram o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular do milho por deficiência de fósforo evidenciaram que a deficiência de P afetou principalmente a morfologia do sistema radicular e houve uma redução precoce do crescimento da parte aérea após a privação de P.

Para superar a baixa disponibilidade de P, as plantas desenvolveram mecanismos adaptativos rigidamente controlados para manter a homeostase do fósforo. Um dos principais mecanismos é maximizar a capacidade da raiz de absorver P do solo, alterando a arquitetura radicular, que é um veículo para o desenvolvimento de plantas com uma eficiente capacidade de aquisição de P (Niu et al., 2013).

## 2. 4 Melhoramento Genético

A variação genética no comprimento e na densidade dos pêlos radiculares é importante para a aquisição de nutrientes imóveis no solo como P, assim genótipos de culturas com maior rendimento em solos deficientes melhorará substancialmente a produtividade e a sustentabilidade dos agroecossistemas de baixo insumo; e nos agroecossistemas de alto insumo, reduzirão os impactos ambientais da fertilização intensiva (Lynch, 2007).

O conhecimento da diversidade genotípica possibilita o uso racional e sustentável dos recursos genéticos (Dantas et al., 2012). Para manter um programa de melhoramento, é necessário avaliar a importância da variação genética para o manejo eficiente, assim, a detecção e uso da variação genética, bem como a identificação de cultivares, são algumas tarefas importantes (Carvalho et al., 2017). A adoção de genótipos mais eficientes em P é uma maneira para reduzir o uso de fertilizantes que utiliza esse nutriente, conseqüentemente, mitigando os impactos econômicos da agricultura (Fita et al., 2011).

Os desafios agora são alcançar uma maior compreensão dos mecanismos e regulação da aquisição e utilização interna de P e desenvolver uma colaboração mais estreita entre fisiologistas e produtores de plantas, para trazer as realizações dos estudos sobre a eficiência do uso de fósforo no melhoramento de plantas (Wang et al., 2010).

## 2. 5 Hidropônia

Uma terra agrícola limitada encoraja a aplicação de métodos alternativos de plantio e uma dessas é o uso do sistema hidropônico (Christy et al., 2018). A hidroponia é uma técnica de cultivo de plantas sem solo, onde utiliza uma solução nutritiva que é composta por água e nutrientes (Furlani, 1998; Douglas, 2001).

Existem vários sistemas de cultivo hidropônico, dentre eles, podemos destacar o *floating* (flutuante), nesse sistema as plantas são mantidas em vasos, sem solo, com o sistema radicular submerso em solução com nutrientes, sendo disponibilizado ar para a respiração das raízes a partir de um sistema de bombeamento (Bezzerra Neto & Barreto, 2013). Essa técnica tem se expandindo no Brasil nos últimos anos, sendo uma alternativa cada vez mais praticada, resultando em uma produção com menor utilização de mão-de-obra, e sem agressão ao solo (Ferreira et al., 2017).

O cultivo hidropônico apresenta uma série de benefícios quando comparados com o tradicional, como menor necessidade de nutrientes minerais (Araujo et al., 2016), diminuição no uso de agrotóxicos (Luz et al., 2006). Com maior eficiência no uso da água, além de equacionar as questões relacionadas à degradação e salinização do solo (Cavalcante et al., 2016). No entanto,

para obter sucesso neste sistema de produção é importante conhecer aspectos nutricionais e de manejo das espécies cultivadas, como a composição da solução nutritiva e a vazão de aplicação desta solução que melhor se adequem ao vegetal e as condições locais (Rezende et al., 2007).

Silva et al. (2017b) avaliaram a produção e qualidade de frutos do meloeiro em sistema semi-hidropônico. Os autores observaram que o rendimento do melão foi influenciado pela concentração de nutrientes da solução, com dose limite de 50% para o parâmetro peso médio de frutos. Além disso, constataram que doses nutritivas acima de 50% promoveram a diminuição do peso do fruto. Nascimento et al. (2020) analisaram a adequada relação no fornecimento de nitrogênio (N) e potássio (K) no meloeiro em sistema hidropônico, onde, obtiveram os seguintes resultados: a proporção recomendada para o estágio vegetativo do crescimento do melão foi de 238,1 mg L<sup>-1</sup> de N e 195,4 mg L<sup>-1</sup> de K e, para a fase reprodutiva, 196,0 mg L<sup>-1</sup> de N e 175,9 mg L<sup>-1</sup> de K.

Cecílio Filho et al. (2008) trabalhando com sistema hidropônico com melão cantaloupe, comprovaram que o aumento da concentração de fósforo de 15,6 para 58,5 mg L<sup>-1</sup> na solução nutritiva não incrementa o crescimento do meloeiro, e os maiores acréscimos de matéria seca nas partes vegetativas das plantas de melão ocorrem até 45 dias. Resultados apresentados por Charlo et al. (2009) em ambiente protegido com melão-rendilhado mostraram que os híbridos Fantasy e Louis são os mais indicados para o cultivo em fibra da casca de coco com fertirrigação.

O sistema hidropônico também está sendo utilizado para avaliar a sintomatologia de deficiência de nutrientes em plantas por alguns autores. Fita et al. (2011) estudaram a diversidade na arquitetura radicular e a resposta à deficiência de P em melão, e constataram variação genética natural entre os acessos de *Cucumis melo* L. demonstrando o potencial de cultivares em utilizar fertilizantes inorgânicos de P aplicados com mais eficiência.

Diante da relevância que a cultura de melão apresenta para a região semiárida, existe uma grande demanda de informações que visa definir um sistema produtivo que apresente redução de custos, que aumente a produtividade, e que também alcance os padrões mínimos de qualidade que são exigidos no mercado internacional (Silva et al., 2017b). Entretanto, informações sobre soluções nutritivas para o cultivo sem solo de melão ainda são generalizadas, o que requer estudos adaptados às condições locais e à grande variedade existente de cultivares (Cosme et al., 2017).

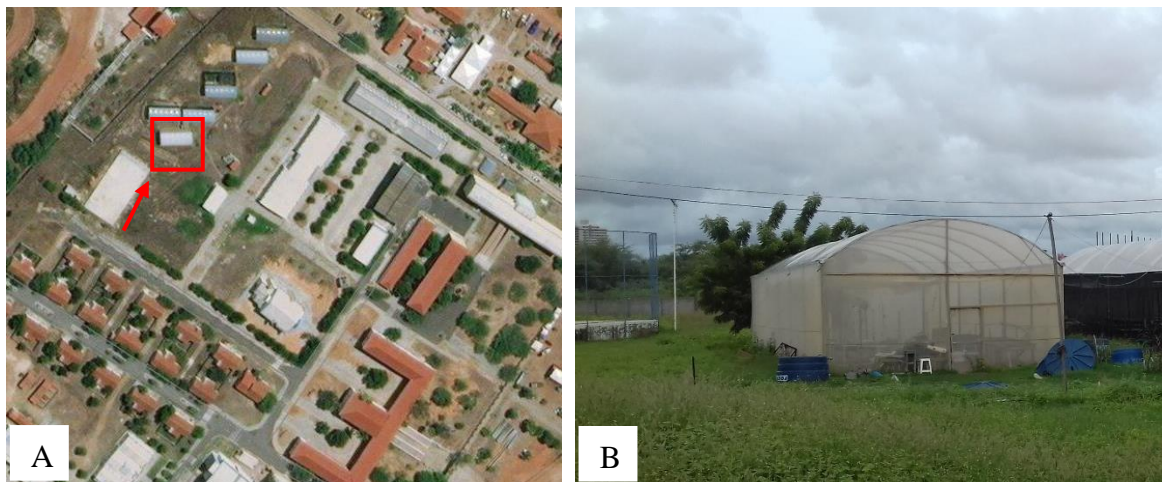
A ausência de informações sobre os referidos temas no germoplasma de meloeiro coletado na região semiárida, principalmente no sistema hidropônico, torna necessário a realização de trabalhos que auxiliem na identificação de acessos de meloeiro promissores para esse tipo de

cultivo, visando a sua integração como genitores em programas de melhoramento genético dessa cucurbitácea.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição do local

O experimento foi realizado no mês de abril de 2019 em casa de vegetação localizada no Departamento de Ciências Agrônômicas e Florestais (DCAF) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Campus Oeste, no município de Mossoró, Rio Grande do Norte, localizado a 5°12'48'' S e 37°18'44'' W, altitude de 37m (Figura 1 A e B).



**Figura 1** - Localização do experimento, Imagem Google Earth, 2019 (A) vista externa da casa de vegetação onde foi realizado o experimento (B), Mossoró, RN

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo BSw<sup>h</sup> (quente e seco), com precipitação pluviométrica média anual de 673,9 mm, temperatura de 28 °C e umidade relativa do ar média de 68,9% (Alvares et al., 2013). O município de Mossoró é caracterizado por possuir clima tropical semiárido e sua precipitação pluviométrica é irregular, com temperaturas médias variando entre 22,5°C mínima e 33,3°C máxima (Sousa, 2013).

#### 3.2 Germoplasma

Foram avaliados dez genótipos de meloeiro, sendo cinco melhorados (Vereda, Gaúcho Redondo Conesul - GRC, Amarillo Canário - Aca, Gaúcho Casca de Carvalho – GCC e Trinity) e cinco não melhorados (A-02, A- 16, A-29, A-50 e A-52).

### 3.3 Condução do experimento

As sementes foram semeadas em bandejas de polietileno contendo 200 células preenchidas com substrato de fibra de coco comercial Golden<sup>®</sup> mix (Amafibra, s.d.) (Figura 2).



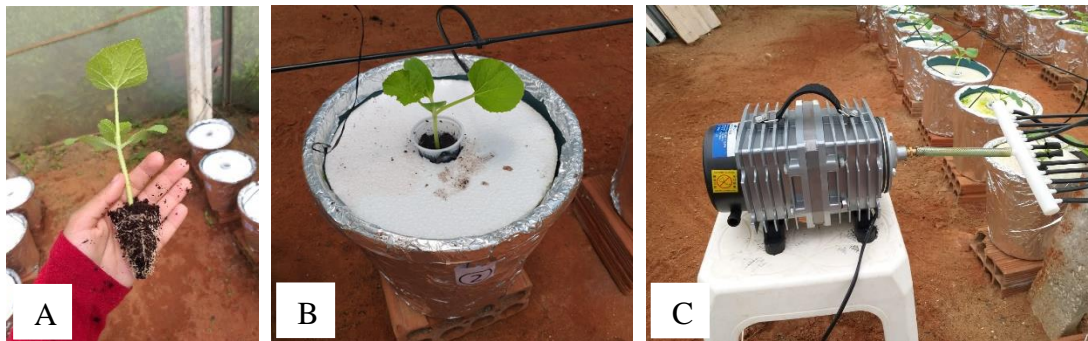
**Figura 2** - Produção dos genótipos de meloeiro em bandeja de polietileno

O experimento foi desenvolvido em sistema hidropônico flutuante (*floating*), também denominado DFT (Deep Film Technique), em que as plantas ficam apoiadas em sistema flutuantes e as raízes submersas durante o período experimental em solução nutritiva, sendo a unidade representada por um vaso plástico com capacidade para 10 litros (24 cm de altura, 18 cm de diâmetro inferior e 23 cm de diâmetro superior), contendo 8 litros de solução nutritiva.

As mudas foram transplantadas com 15 dias após a semeadura, quando possuíam um par de folhas definitivas (Figura 3 A), colocando-se uma muda por vaso. Em cada vaso foi colocado um disco de poliestireno expandido de 10 mm de espessura e 21 cm de diâmetro. No centro de cada disco foi feito um orifício com diâmetro de 4,5 cm, no qual foi colocado um copo plástico com capacidade para 80 mL, de forma cônica o copo foi colocado, para evitar que o mesmo caísse no interior do vaso. Em cada copo plástico foram feitas duas aberturas retangulares (altura de 0,5 cm e base de 2 cm) em sua base para possibilitar a passagem das raízes (Figura 3 B).

A oxigenação da solução nutritiva foi realizada continuamente utilizando um compressor de ar, modelo ACO-008 120W 220v, com fluxo de 110 L min<sup>-1</sup>. O sistema de distribuição de ar nos vasos constou de microtubos com 0,5 mm de diâmetro interno e conexões (Figura 3 C).





**Figura 3** - Transplântio das mudas (A), vaso plástico com tampa de isopor e um copo para a plântula ficar suspensa (B) e compressor de ar (C)

A solução nutritiva completa foi preparada utilizando água com a seguinte composição, em g 1000 L<sup>-1</sup>: 152 de N, 39 de P, 245 de K, 119 de Ca, 29 de Mg e 32 de S (Castellane e Araújo, 1994). Os micronutrientes foram fornecidos utilizando Rexolin (30 g 1000 L<sup>-1</sup>), apresentando a seguinte concentração: 11,6% de óxido de potássio (K<sub>2</sub>O), 1,28% de enxofre, 0,86% de magnésio, 2,1% de boro, 2,66% de ferro, 0,36% de cobre, 2,48% de manganês, 0,036% de molibdênio e 3,38% de zinco. A solução nutritiva deficiente em P apresentou a mesma concentração de nutrientes, exceto de P, na qual foi disponibilizado apenas o P presente na água utilizada no preparo da solução nutritiva.

No preparo das soluções nutritivas foram utilizados os seguintes fertilizantes: nitrato de cálcio, nitrato de potássio, cloreto de potássio, fosfato monoamônico e sulfato de magnésio. Diariamente, foi realizado o monitoramento da solução nutritiva para controle da condutividade elétrica a fim de manter a concentração iônica próxima à obtida na solução inicial. Também foi monitorado o pH da solução nutritiva, mantendo-o na faixa de 5,5 a 6,5, por meio das soluções de KOH a 0,05 mol L<sup>-1</sup> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 0,025 mol L<sup>-1</sup>. As soluções nutritivas foram trocadas semanalmente evitando grandes desequilíbrios entre os nutrientes.

### 3.4 Quantificação do teor de P na água

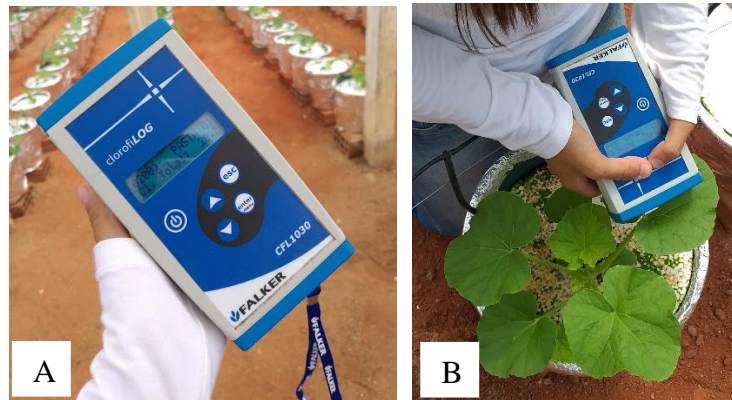
Para esse parâmetro foi utilizado água de abastecimento da UFERSA e a análise de fósforo na água foi realizada no Laboratório de Catálise, Ambiente e Materiais (LACAM), que pertence ao Departamento de Química da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte - UERN. A análise físico-química foi realizada usando a metodologia prescrita no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Apha, 2005), realizada em triplicata e o resultado expresso com a média dessas medidas. O fósforo encontrado na água foi de 0,072 g L<sup>-1</sup>.

### 3.5 Caracteres avaliados

As análises das plantas coletadas foram realizadas na Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), aos 19 dias após o transplântio (DAT), sendo avaliadas as seguintes variáveis.

#### 3.5.1 Análise de clorofila

Antes da coleta das plantas (19 DAT) foram realizadas as leituras do Índice Relativo de Clorofila (IRC) (clorofila a, clorofila b e clorofila total) em duas folhas de cada planta, por meio de um medidor de clorofila portátil (Clorofilog) utilizando o método analítico de quantificação do teor de clorofila (Figura 4 A e B).



**Figura 4** - Medidor portátil (Clorofilog) (A) realização das leituras do Índice Relativo de Clorofila (IRC) com o Medidor portátil (Clorofilog) (B)

#### 3.5.2 Análise de crescimento

A análise de crescimento realizou-se ao final do experimento (19 DAT) através das seguintes variáveis:

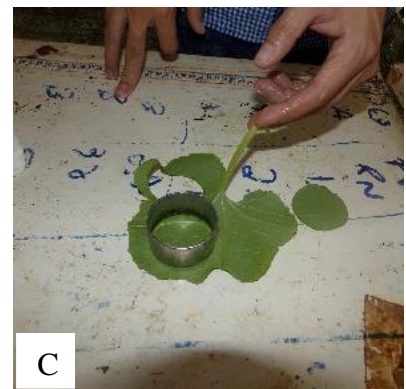
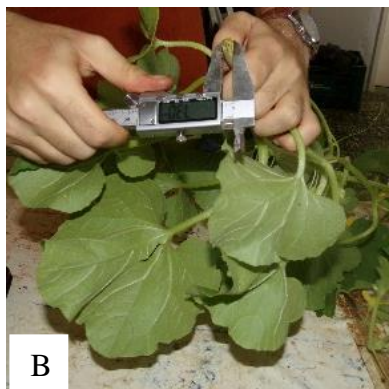
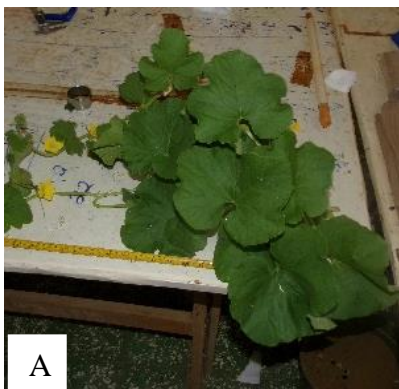
- Comprimento do Ramo Principal (CRP): Foi utilizada uma fita métrica graduada em centímetro (cm), considerando apenas a parte aérea da planta (Figura 5 A);
- Diâmetro do Caule (DCA): Foi determinado com o auxílio de um paquímetro digital, e a medida foi tomada a uma distância de 2 cm acima do local de corte da (Figura 5 B);
- Número de Folhas (NFO): Considerando na contagem todas as folhas verdes e senescentes de cada genótipo (Figura 5 B);
- Área Foliar: Foi utilizado o método dos discos foliares, os quais foram coletados com o auxílio de um furador. O diâmetro foi de acordo com o tamanho das folhas de cada genótipo, retirando

5 discos foliares por planta (Figura 5 C). As amostras dos discos foram acondicionadas separadamente em sacos de papel, etiquetadas e levadas à estufa para secagem a uma temperatura de 65°C. A massa de matéria seca dos discos foi determinada com auxílio de uma balança eletrônica. A área foliar foi calculada de acordo com a seguinte equação (Souza et al., 2012).

$$AF = \frac{(PF+PD) \times AD}{PD}$$

Onde AF é a área foliar (cm<sup>2</sup> planta<sup>-1</sup>), PF é a massa seca de folha (g planta<sup>-1</sup>), PD a massa seca dos discos (g) e AD a área conhecida do disco retirado da folha (cm<sup>2</sup>).

- Comprimento do Sistema Radicular (CSR): O comprimento do eixo radicular principal foi quantificado por meio de uma fita métrica graduada e a unidade foi dada em cm (Figura 5 D);
- Volume do Sistema Radicular (VSR): Obtido pelo deslocamento de água em uma proveta de 1,0 L, expresso cm<sup>3</sup> (Figura 5 E).
- Acúmulo de massa seca (MS) as plantas foram coletadas e avaliadas quanto ao acúmulo de massa seca de hastes, folhas e raízes, em gramas (Figura 5 F). As massas secas foram obtidas pela separação das hastes, folhas e raízes através de um corte, em seguida cada parte foi acondicionada em sacos de papel, etiquetadas e secadas em estufa a 65°C. E posteriormente, os materiais foram pesados de forma individual, utilizando uma balança eletrônica. Depois de seca a Massa Seca Total (MST) foi obtida pelo somatório (hastes, folhas e raízes) e a razão da matéria seca na raiz e parte aérea MS(R/A) foi calculada.

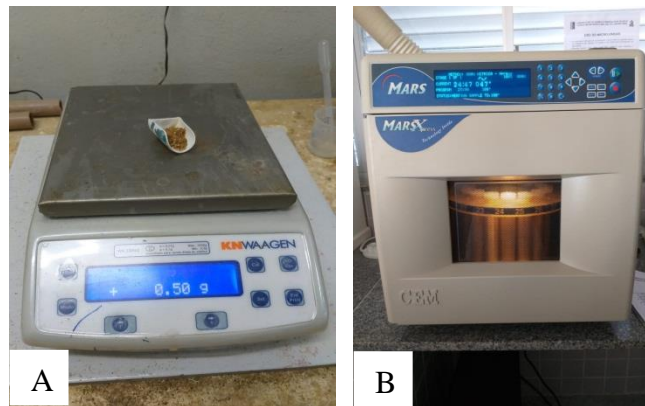




**Figura 5** - Variáveis da análise de crescimento: comprimento da parte aérea (A), diâmetro do caule e número de folhas (B), área foliar (C), comprimento do sistema radicular (D), volume da raiz (E) e massa seca da raiz (F)

### 3.6 Quantificação do teor de P nas plantas

- Para a quantificação do teor de P, 0,5 g da amostra foi submetida à digestão nítrica (Figuras 6 A e B). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro (Bel Photonics, modelo 1105) no comprimento de onda de 725 nm, no Laboratório de Pesquisa que pertence ao Departamento Centro de Ciências Agrárias – CCA da UFERSA. A digestão e o método da espectrofotometria com azul-de-molibdênio foram realizadas de acordo com o manual de análises de solo, plantas e fertilizantes da Embrapa (Silva, 2009). Com os resultados do teor de fósforo na parte aérea e nas raízes de cada planta foi calculada a razão do fósforo na raiz e parte aérea  $P(R/A)$ .



**Figura 6** - Massa seca da amostra de 0,5 g sendo pesada (A) e realização da digestão nítrica (B)

### 3.7 Eficiência da nutrição fosfatada

A partir do acúmulo de biomassa e da concentração de P no tecido vegetal determinou-se os seguintes índices de eficiência conforme a metodologia de Moll et al. (1982):

- Eficiência no uso do fósforo (EUP): determinada a partir do aumento no acúmulo de biomassa por unidade no teor de P que foi aplicado na planta, obtida pela equação a seguir:

$$EUP = \frac{MS \text{ (g)}}{P \text{ aplicado (g)}}$$

- Eficiência na aquisição de fósforo (EAP): determinada tendo como referência os dois níveis deste nutriente na solução nutritiva, obtida pela equação abaixo:

$$EAP = \frac{P \text{ acumulado (g)}}{P \text{ aplicado (g)}}$$

- Eficiência na utilização do P (EUTP): determinada a partir da produção de biomassa, e do teor de P no tecido vegetal, obtida pela equação a seguir:

$$EUTP = \frac{MS \text{ (g)}}{P \text{ acumulado (g)}}$$

### 3.8 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados com cinco repetições, em que a unidade experimental foi representada por um vaso plástico com capacidade para 10 litros, contendo 8 litros de solução nutritiva. A estrutura de tratamentos correspondeu a um fatorial 2 x 10, sendo duas soluções nutritivas (S1 - solução com alto teor de fósforo; S2 - solução com baixo teor de fósforo, apenas com o fósforo presente na água) e 10 genótipos de meloeiro, totalizando 20 tratamentos (Apêndice 1).

### 3.9 Análises estatísticas

#### 3.9.1 Análise de variância Uni e Multivariada

Inicialmente, para os caracteres quantitativos normalmente distribuídos foram efetuadas as análises de variâncias uni e multivariada utilizando, o teste F de Snedecor e o critério de Wilks a 5% de probabilidade, respectivamente. As médias foram agrupadas pela metodologia de Scott-Knott (1974).

#### 3.9.2 Agrupamento dos genótipos

A partir da matriz de médias dos caracteres morfológicos, calculou-se a distância euclidiana padronizada ( $Z$ ,  $\mu = 0$ ,  $\sigma = 1$ ) entre cada par de genótipos. Agrupou-se hierarquicamente os genótipos pelo método de distância por média aritmética denominado em inglês de UPGMA (*Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean*). A escolha das medidas de distâncias e do método de agrupamento baseou-se na correlação entre a matriz original de distâncias e a matriz final de agrupamento, denominada de correlação cofenética. Também se estimou a contribuição relativa dos caracteres quantitativos para a divergência utilizando o critério definido por Singh (1981).

### 3.9.3 Eficiência de Uso de Fósforo

Para a análise de variância Univariada agrupou-se as médias conforme Scott-Knott (1974). A importância relativa da eficiência de aquisição de P e eficiência de utilização interna sobre a eficiência de uso de P foi obtida de acordo com a metodologia de Moll et al. (1982). O índice de Seleção de cada genótipo e o seu agrupamento como eficiente e responsivo ao fósforo foram obtidos conforme descrito por Parentoni et al. (2011). As análises foram processadas nos *softwares* Genes (2013) e R (R CORE TEAM, 2020).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Influência da disponibilidade de P reduz crescimento, teor de fósforo e matéria seca

A baixa disponibilidade de fósforo (P-) afetou consideravelmente o crescimento das plantas em todos os genótipos (Figura 7), provocando redução no número de folhas (NFO), diâmetro do caule (DCA), comprimento do ramo principal (CRP), volume do sistema radicular (VSR), fósforo total (PTO) e matéria seca total (MST), sendo as maiores reduções observadas para MST, PTO, CRP, NFO e VSR, obtendo-se perdas de 77,3; 70,5; 64,8; 60,0 e 47,7%, respectivamente (Tabela 1).

Por outro lado, as variáveis comprimento do sistema radicular (CSR) (Apêndice 2), razão do fósforo na raiz e parte aérea P(R/A) e razão da matéria seca na raiz e parte aérea MS(R/A) foram maiores nas plantas em solução nutritiva com restrição de fósforo (P-), ocorrendo aumento de 50,0; 45,2 e 100%, para CSR, P(R/A) e MS(R/A), respectivamente (Tabela 1). Assim, observa-se que houve aumento no Comprimento do Sistema Radicular (CSR) e redução do volume do sistema radicular (VSR) quando há menor disponibilidade de fósforo. Por outro lado, Clorofila (CLO) não foi afetada pela redução de fósforo uma vez que as médias estimadas nas soluções com e sem restrição desse elemento não diferiram entre si pelo teste t de Student ( $p > 0,05$ ) (Tabela 1).



**Figura 7** - Genótipo de meloeiro exposto a S1: solução nutritiva sem restrição de fósforo (P+) e S2: solução nutritiva com restrição de fósforo (P-). Escala na foto de 5 cm

**Tabela 1.** Média de caracteres da parte aérea, do sistema radicular, índice relativo de clorofila total, do teor de fósforo e da matéria seca dos genótipos de meloeiro cultivados em soluções hidropônicas com alto e baixo teor de fósforo.

Solução	Média (Caráter)				
	NFO	DCA (cm)	CRP (cm)	CSR (cm)	VSR (cm <sup>3</sup> )
P+	26,90	7,62	71,15	48,33	40,25
P-	10,75	6,40	25,05	72,50	21,05
t <sub>c</sub>	9,5**	8,9**	18,7**	7,6**	6,5**
	CLO	P(R/A) (mg planta <sup>-1</sup> )	PTO (mg planta <sup>-1</sup> )	MS(R/A) (g)	MST (g)
	P+	37,64	0,62	40,85	0,16
P-	36,92	0,90	12,05	0,32	3,07
t <sub>c</sub>	0,84 <sup>ns</sup>	5,9**	28,5**	12,7**	14,8**

\*\* : Significativo pelo teste t de Student ( $p < 0,01$ ). NFO: Número de Folhas, DCA: Diâmetro do Caule, CRP: Comprimento do Ramo Principal, CSR: Comprimento do Sistema Radicular, VSR: Volume do Sistema Radicular, CLO: Clorofila, P(R/A): razão do teor de fósforo na raiz e parte aérea, PTO: Fósforo Total, MS(R/A): razão da matéria seca na raiz e parte aérea, MST: Matéria Seca Total, P+: solução sem restrição de fósforo, P-: solução com restrição em fósforo.

4.2 Existe variabilidade entre os genótipos para variáveis da parte aérea, do sistema radicular, fósforo e matéria seca nas soluções P+ e P-

#### 4.2.1 Análise Univariada

As estimativas das médias para os caracteres morfológicos, de raiz, clorofila, de fósforo e de matéria seca estão na Tabela 2. Os genótipos ‘GCC’, A-29 e A-52, agrupados no primeiro grupo, destacaram-se com maior NFO na solução sem restrição de fósforo, enquanto ‘Vereda’, A-02, A16, A-29, A-50 e A-52 sobressaíram-se na solução deficiente em fósforo.

Para DCA, os destaques foram ‘GRC’, ‘Aca’, ‘GCC’, ‘Trinity’, A-29 e A-52 em (P+). Na solução (P-) apenas A-16 e A-50, com menores estimativas, apresentaram desempenho inferior para o referido caráter. Para CRP, o genótipo GCG destacou-se na solução P+, enquanto GCC e A-52 sobressaíram-se na solução (P-) (Tabela 2).

Com relação aos caracteres relacionados ao sistema radicular, observa-se que o CSR não diferiu entre os genótipos submetidos à solução P+, porém, na solução com baixo teor de fósforo, os genótipos que apresentaram maior CRS foram A1-16, A-29, A-50 e A-52 (Tabela 2).

Para VSR, na solução P+, constatou-se a formação de grupos, com proeminência para ‘Aca’, ‘GCC’, Trinity, A-02, A-16 e A-50. Na solução P-, verificou-se que os genótipos de melhor desempenho foram ‘GCC’, A-50 e A-52 (Tabela 2).



**Tabela 2.** Médias dos caracteres da parte aérea, do sistema radicular, clorofila, do teor de fósforo e da matéria seca em genótipos de meloeiro cultivados em soluções hidropônicas com alto e baixo teor de fósforo.

Genótipo	Média (Caráter)									
	NFO	DCA	CRP	CSR	VSR	CLO	P <sub>(R/A)</sub>	PTO	MS <sub>(R/A)</sub>	MST
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm <sup>3</sup> )			(mg planta <sup>-1</sup> )	(mg planta <sup>-1</sup> )	(g)	(g)
Solução P+										
‘Vereda’	22,50 b	7,20 b	70,25 c	46,75 a	31,25 b	37,38 a	0,61b	48,43 a	0,13 b	8,38 c
‘GRC’	27,50 b	7,58 a	57,50 d	50,50 a	22,50 b	40,40 a	0,44 c	42,67 a	0,26 a	14,74 b
‘Aca’	20,50 b	8,25 a	53,50 d	47,25 a	51,25 a	33,79 a	0,64b	46,31 a	0,14 b	11,54 c
‘GCC’	39,50 a	8,53 a	112,5 a	44,25 a	51,25 a	38,95 a	0,33 c	37,31 b	0,15 b	19,04 a
‘Trinity’	26,50 b	8,18 a	73,25 c	58,50 a	42,50 a	36,73 a	0,83 a	37,81 b	0,16 b	14,10 b
A-02	24,00 b	7,15 b	72,25 c	41,75 a	57,50 a	37,84 a	0,44b	41,55 a	0,14 b	14,32 b
A-16	22,50 b	6,65 b	46,25 d	48,75 a	40,00 a	40,48 a	0,79 a	45,05 a	0,17 b	10,38 c
A-29	31,00 a	7,83 a	85,00 b	59,25 a	26,25 b	38,94 a	0,93 a	34,02 b	0,12 b	15,30 b
A-50	20,50 b	6,33 b	52,75 d	46,50 a	45,00 a	35,70 a	0,62b	35,19 b	0,20 a	12,67 c
A-52	34,50 a	8,53 a	88,50 b	39,75 a	35,00 b	36,20 a	0,60b	40,20 b	0,13 b	14,79 b
Solução P-										
‘Vereda’	10,00 a	6,43 a	26,75 b	61,25 b	15,00 b	38,06 a	0,40b	19,69 a	0,33 b	2,50 b
‘GRC’	8,25 b	6,38 a	23,00 b	61,75 b	12,50 b	41,79 a	1,03 a	11,61 b	0,34 b	2,09 b
‘Aca’	5,00 b	6,83 a	20,75 b	49,00b	17,50 b	35,71 a	0,90 a	12,34 b	0,61 a	2,06 b
‘GCC’	8,75 b	6,60 a	41,75 a	69,00 b	25,00 a	33,84 a	0,77 a	10,90 b	0,35 b	2,54 b
‘Trinity’	9,25 b	6,78 a	19,75 b	67,00 b	21,75 b	36,19 a	1,20 a	10,83 b	0,26 c	3,05 b
A-02	12,50 a	6,55 a	16,25 b	72,25 b	22,50 b	36,06 a	0,84 a	11,07 b	0,26 c	3,25 b
A-16	10,50 a	5,55 b	15,75 b	92,75 a	22,50 b	39,20 a	1,01 a	14,03 b	0,17 c	3,54 a
A-29	14,25 a	6,65 a	26,75 b	80,00 a	21,25 b	35,69 a	1,04 a	11,26 b	0,24 c	4,07 a
A-50	13,25 a	5,25 b	17,50 b	89,25 a	25,00 a	32,58 a	0,98 a	10,51 b	0,34 b	3,59 a
A-52	15,75 a	7,05 a	42,25 a	82,75 a	27,50 a	40,08 a	0,80 a	8,24 b	0,25 c	3,99 a

GRC: Gaúcho Redondo Conesul, Aca: Amarillo Canário, – GCC: Gaúcho Casca de Carvalho. NFO: Número de Folhas, DCA: Diâmetro do Caule, CRP: Comprimento do Ramo Principal, CSR: Comprimento do Sistema Radicular, VSR: Volume do Sistema Radicular, CLO: Clorofila, P(R/A): Razão do teor de fósforo na Raiz e Parte aérea, PTO: Fósforo Total; MS(R/A): razão da Matéria seca na Raiz e parte Aérea, MST: Matéria Seca Total. P+: solução sem restrição de fósforo; P-: solução com restrição em fósforo. Médias seguidas pela mesma letra minúscula pertencem ao mesmo grupo ( $p>0,05$ ) (Scott-Knott, 1974).

Os genótipos não diferiram para o índice de clorofila em ambas as soluções, sendo, portanto, agrupados em um mesmo grupo. Para a relação do teor de fósforo na raiz e parte aérea

(folhas e caule) [ $P_{(R/A)}$ ], na solução com alto teor de fósforo (P+), verificou-se a formação de três grupos de genótipos, com destaque para ‘Trinity’, A-16 e A-29. Na solução com deficiência em fósforo (P-), observou-se pequena discriminação entre os materiais, com a formação de dois grupos, sendo um deles formado apenas pelo genótipo ‘Vereda’, com menor relação [ $P_{(R/A)}$ ]. Com relação ao teor total de fósforo, nas duas soluções, houve a formação de dois grupos de genótipos. Na solução P+, os genótipos de maior realce foram ‘Vereda’, ‘GRC’, ‘Aca’, A-02 e A-16. Na solução (P-), destacou-se apenas o híbrido ‘Vereda’ com maior teor de fósforo (Tabela 2).

Na solução P+, as duas maiores estimativas de média para a relação da matéria seca na raiz e parte aérea (folhas e caule) [ $MS_{(R/A)}$ ] foram observadas em ‘GRC’ e A-50, embora com pouca superioridade em relação aos demais genótipos. Houve maior separação entre os genótipos na solução P- com a formação de três grupos. O genótipo ‘Aca’, único constituinte do primeiro grupo, teve a maior estimativa para [ $MS_{(R/A)}$ ] (Tabela 2).

Observou-se a formação de três grupos para a matéria seca na solução P+, com destaque para o genótipo ‘GCC’. Entretanto, na solução P- houve a formação de dois grupos, com destaque para o genótipo A-29.

#### 4.2.2 Análise Multivariada

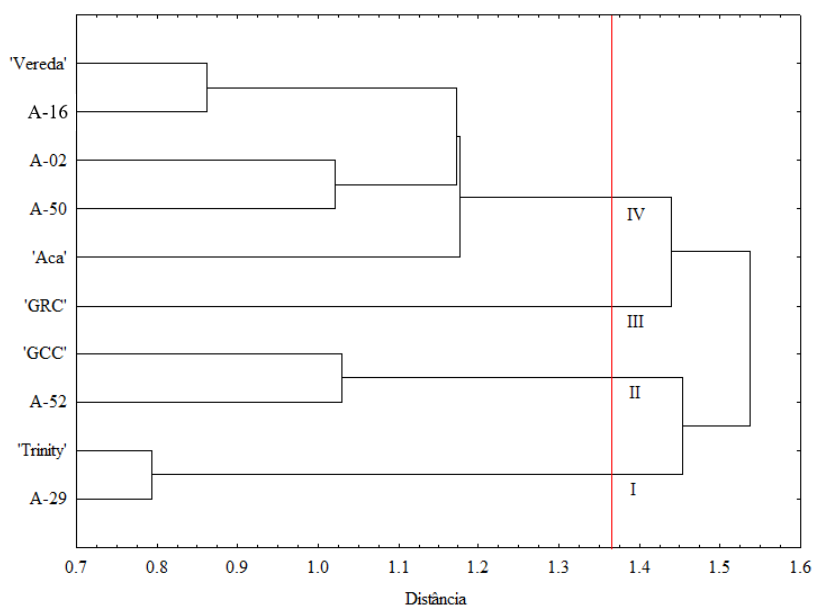
Considerando todos os caracteres simultaneamente, verificou-se diferenças genotípicas entre os genótipos ( $F_{Wilks} = 6,23$ , Tabela 3).

Para se ter melhor visão da variabilidade entre os genótipos, realizou-se o agrupamento hierárquico pelo método UPGMA (*Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean*) a partir das distâncias de Mahalanobis (Figura 8). Os dois agrupamentos podem ser considerados confiáveis uma vez que as estimativas da correlação cofenética, nas duas soluções, foram superiores a 0,70, indicando pequenas diferenças entre a matriz original das distâncias e a matriz final de agrupamento.

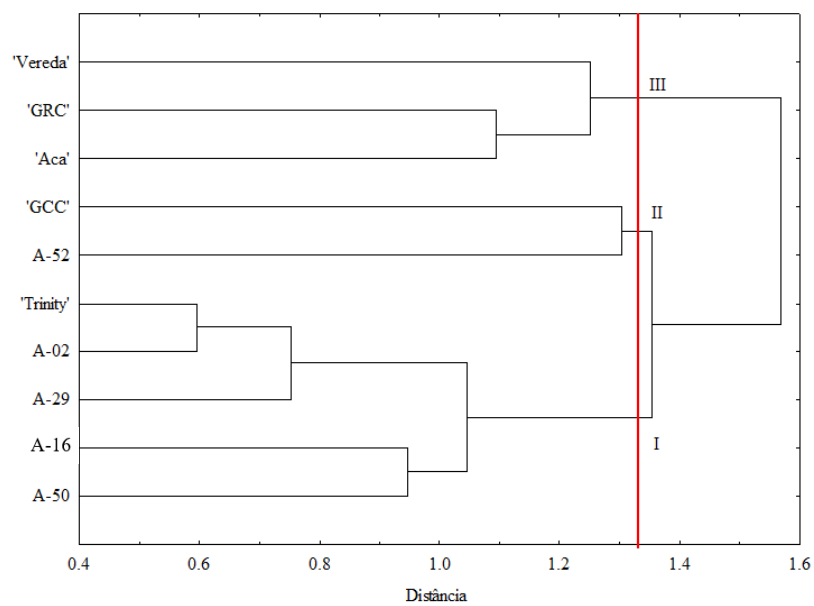
Para solução P+, verificou-se a formação de quatro grupos (Figura 8), sendo o primeiro grupo formado pelos genótipos ‘Trinity’ e A-29; o segundo, por ‘GCC’ e A-52 e o terceiro, apenas por ‘GRC’. No quarto, formado por 50% dos genótipos, foram alocados ‘Aca’, A-50, A-02, A-16 e ‘Vereda’.

Na solução com restrição de fósforo (P-), foram formados três grupos de genótipos. O primeiro grupo foi constituído por ‘Trinity’, A-02, A-29, A-16 e A-50. O segundo grupo foi

composto pelos genótipos ‘GCC’ e A-52. O terceiro grupo pelos três genótipos melhorados ‘Aca’, ‘GRC’ e ‘Vereda’.



Solução (P+) ( $r = 0,74^{**}$ )



Solução (P-) ( $r = 0,71^{**}$ )

**Figura 8** - Dendrograma gerado por UPGMA a partir das distâncias de Mahalanobis entre genótipos de meloeiro cultivados em soluções hidropônicas com alto e baixo teor de fósforo. Coeficiente de correlação cofenética, nas duas soluções, foi superior a 0,70.

As variáveis que mais contribuíram para a divergência genética na solução P+ foram CRP e VSR, enquanto na solução P-, destacaram-se o CSR e CRP (Tabela 3). Por outro lado, a variável de menor contribuição, nas duas situações, foi DCA.

**Tabela 3.** Contribuição das variáveis para a divergência genética entre genótipos de meloeiro cultivados em soluções hidropônicas com alto e baixo teor de fósforo.

Caráter	S <sub>j</sub> (%)	
	Solução (P+)	Solução (P-)
Número de folhas (NFO)	6,08	2,76
Diâmetro do caule (DCA)	0,09	0,09
Comprimento do ramo principal (CRP)	58,01	25,35
Comprimento do sistema radicular (CSR)	6,17	58,81
Volume do sistema radicular (VSR)	19,90	5,94
Clorofila (CLO)	0,68	2,16
Razão de fósforo na raiz e parte aérea [P <sub>(R/A)</sub> ]	1,76	0,10
Fósforo total (PTO)	0,52	1,77
Razão de matéria seca na raiz e parte aérea [MS <sub>(R/A)</sub> ]	1,40	0,23
Matéria seca total (MST)	3,51	2,49

S<sub>j</sub> (%): Contribuição relativa das variáveis (Singh, 1981). P+: solução sem restrição de fósforo; P-: solução com restrição em fósforo.

#### 4.3 Eficiência do Uso de Fósforo

Verificou-se maior eficiência no uso de fósforo (EUP) e utilização de fósforo (EUTP) na solução com menor disponibilidade de fósforo (P-), enquanto a maior eficiência de aquisição (EAP) foi observada na solução com maior disponibilidade de fósforo (P+) (Tabela 4).

Com relação à eficiência de uso de fósforo (EUP), os genótipos , ‘GCC’ e A-29, foram os mais eficientes na solução P+ . Em situação de baixo teor de fósforo (P-), ‘Trinity’, A-02, A-16, A-29, A-50 e A-52 foram os mais eficientes (Tabela 4).

Concernente à Eficiência de Aquisição de Fósforo (EAP), na solução P+, destacaram-se os genótipos ‘Vereda’, ‘Aca’, ‘GCC’, ‘Trinity’, A-29 e A-52. Na solução P-, sobressaíram-se apenas o ‘Vereda’. Os genótipos mais Eficientes na Utilização do Fósforo (EUTP), quando havia maior disponibilidade de fósforo, foram os genótipos ‘GCC’ e A-29, enquanto na solução P- com menor disponibilidade, os genótipos mais eficientes foram ‘Trinity’, A-02, A-29 e A-52 (Tabela 4).

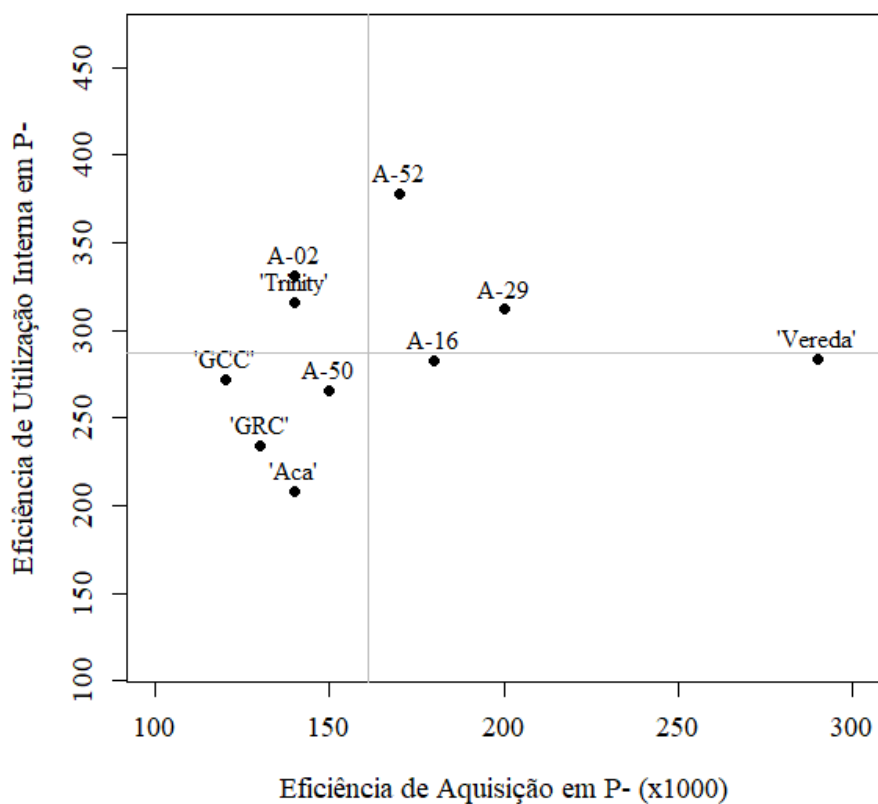
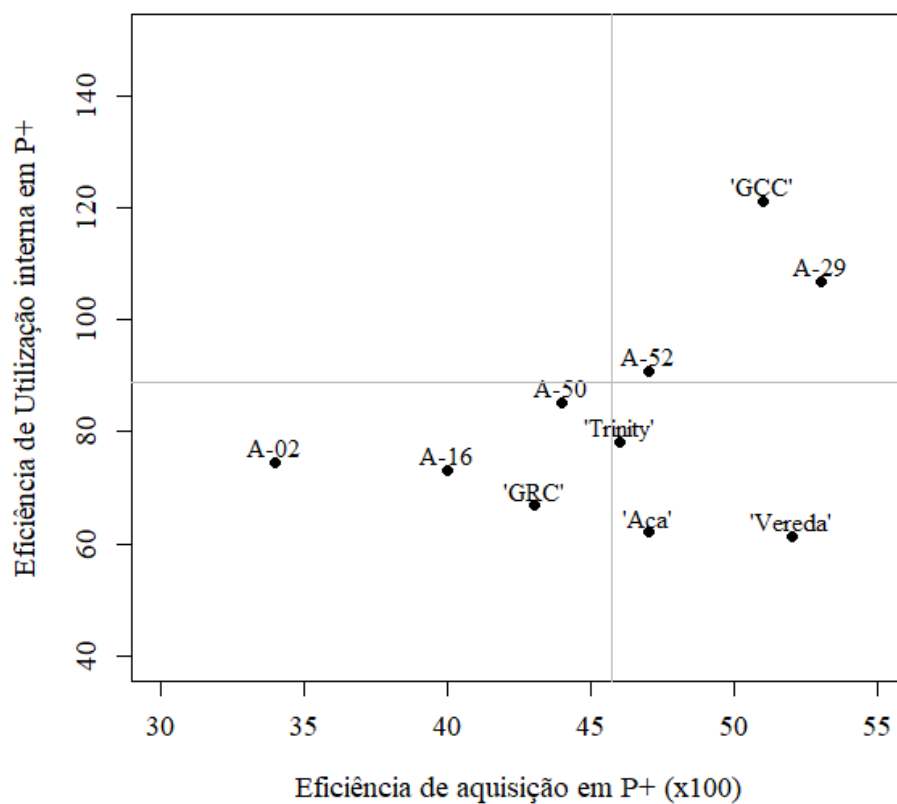
**Tabela 4.** Resumo da análise de variância (ANOVA) e médias dos índices de Eficiência de Uso de Fósforo (EUP), de Aquisição de Fósforo (EAP) e Utilização Interna (EUTP) em genótipos de meloeiro cultivados em soluções hidropônicas sem (P+) e com (P-) restrição de fósforo.

Genótipo	EUP		EAP		EUTP	
	P+	P-	P+	P-	P+	P-
Genótipo						
‘Vereda’	36,69 b	34,76 b	0,52 a	0,29 a	61,27 c	283,65 b
‘GRC’	34,91 b	28,99 b	0,43 b	0,13 b	66,79 c	234,18 b
‘Aca’	30,71 b	27,68 b	0,47 a	0,14 b	62,03 c	208,62 b
‘GCC’	47,40 a	39,52 b	0,51 a	0,12 b	121,07 a	271,84 b
‘Trinity’	37,72 b	44,76 a	0,46 a	0,14 b	78,16 b	316,16 a
A-02	38,64 b	50,49 a	0,34 b	0,14 b	77,44 b	323,16 a
A-16	30,03 b	49,20 a	0,40 b	0,18 b	73,16 b	282,75 b
A-29	48,84 a	62,50 a	0,53 a	0,20 b	106,67 a	312,19 a
A-50	32,29 b	49,83 a	0,44 b	0,15 b	85,28 b	265,53 b
A-52	41,95 b	55,42 a	0,47 a	0,17 b	88,80 b	378,32 a
Fósforo						
P+	37,47		0,46		81,33	
P-	43,08		0,17		277,56	

GRC: Gaúcho Redondo Conesul, Aca: Amarelo canário, – GCC: Gaúcho Casca de Carvalho. Médias seguidas pela mesma letra minúscula pertencem ao mesmo grupo ( $p>0,05$ ) (Scott-Knott, 1974).

Constatou-se que os genótipos ‘GCC’, A-29 e A-52 apresentaram as maiores EAP e EUTP na solução com maior disponibilidade de fósforo (P+). Os genótipos ‘Trinity’, ‘Aca’ e ‘Vereda’ apresentaram EAP superior à média, mas EUTP inferior ao valor médio. Os demais genótipos mostraram EAP e EUTP inferiores às respectivas médias (Figura 9).

Os genótipos A-29 e A-52 sobressaíram-se no ambiente com restrição de fósforo com EAP e EUTP acima da média. Os genótipos A-16 e ‘Vereda’ se destacaram com EAP superior à média, mas EUTP inferior ao valor médio (Figura 9).



**Figura 9** - Dispersão dos genótipos avaliados em função das eficiências de aquisição e uso interno em soluções hidropônicas com alto teor de fósforo (P+) e baixo teor de fósforo (P-).

Na solução com alto teor de fósforo (P+), verificou-se que a eficiência de utilização do P contribuiu com quase 70% para a soma de quadrados da eficiência do uso de fósforo, com uma correlação entre as duas variáveis de  $r_{(XiY)} = 0,90^{**}$  (Tabela 5). Estes resultados evidenciam que com maior disponibilidade de fósforo a EUTP é mais importante para EUP. Nessa situação, os estudos fisiológicos sobre a eficiência dos genótipos devem concentrar esforços para entender os mecanismos relacionados à EUTP do que aqueles mecanismos associados à EAP. Por outro lado, com restrição de P, o resultado foi oposto, isto é, a eficiência de aquisição foi quem mais contribuiu para a eficiência do uso do fósforo (66,08%) com uma correlação  $r_{(XiY)} = 0,87^{**}$  (Tabela 5).

**Tabela 5.** Contribuição da soma de quadrados de genótipos (SQGen) da eficiência de aquisição de fosforo e eficiência de utilização de fósforo para a soma de quadrados da eficiência de uso de fósforo, coeficiente de correlação entre Xi e Y ( $r_{XiY}$ ), e relação entre razão entre desvio-padrão ( $S_{Xi}/S_Y$ ) em soluções hidropônicas sem (P+) e com (P-) restrição de fósforo.

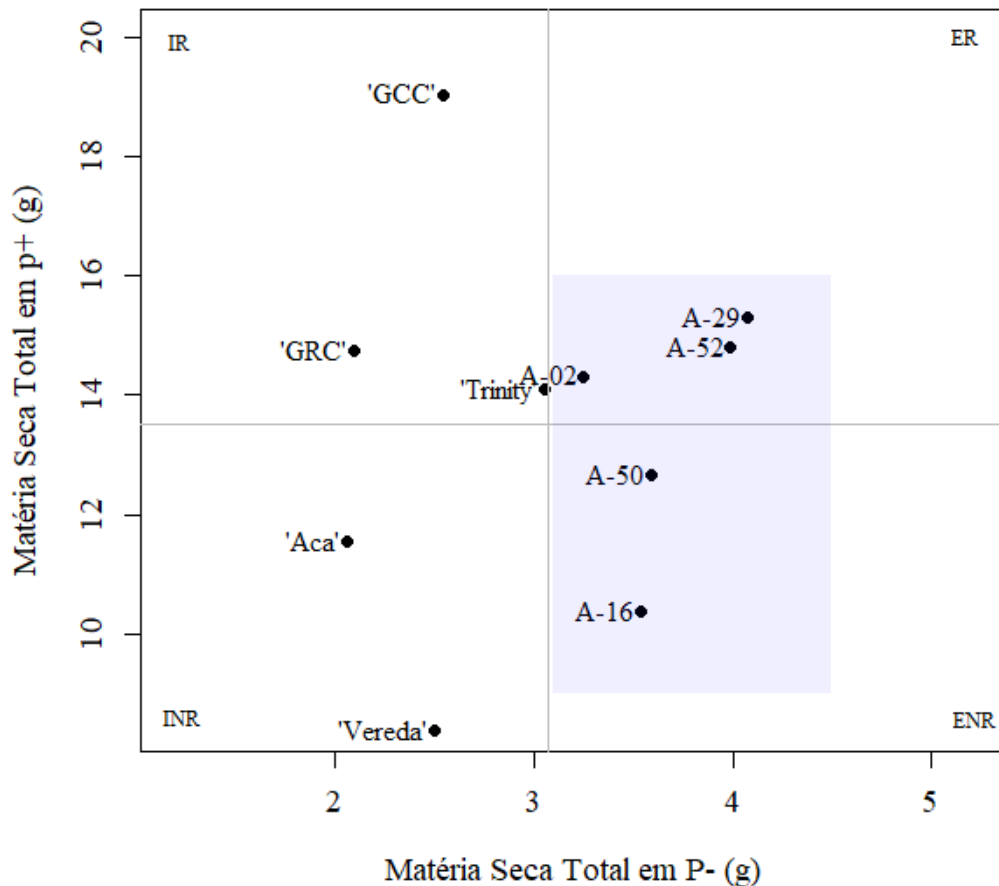
Caráter	(SQ <sub>Gen</sub> )	Contribuição de X <sub>i</sub> para (SQ <sub>Y</sub> )	$r_{(XiY)}$	( $S_{Xi}/S_Y$ )
Solução (P+)				
Eficiência de aquisição (X <sub>1</sub> )	0,0456	31,15	0,68	0,45
Eficiência de utilização (X <sub>2</sub> )	0,1013	68,85	0,90	0,76
Eficiência de Uso (Y)	0,1469			
Solução (P-)				
Eficiência de aquisição (X <sub>1</sub> )	0,1262	66,08	0,87	0,68
Eficiência de utilização (X <sub>2</sub> )	0,0648	33,92	0,67	0,90
Eficiência de Uso (Y)	0,1910			

#### 4.4 Eficiência de uso e Responsividade ao Fósforo

Além de eficientes no uso de um nutriente, é importante que os genótipos sejam responsivos. Uma maneira prática é plotar a matéria seca nas condições de alto e baixo teor de fósforo na solução. Isso permite classificar os genótipos em quatro classes quanto à eficiência e responsividade (Figura 10).

Os genótipos A-02, A-29 e A-52 foram classificados em Eficientes e Responsivos (ER), ou seja, apresentam matéria seca acima da média nas duas soluções. Os genótipos A-16 e A-50 foram alocados no segundo quadrante e classificados como Eficientes e Não Responsivos (ENR), matéria seca acima da média em condição de uma menor disponibilidade de fósforo (P-), mas abaixo da média quando não há restrição de fósforo (P+). Os genótipos ‘Vereda’ e ‘Aca’ foram

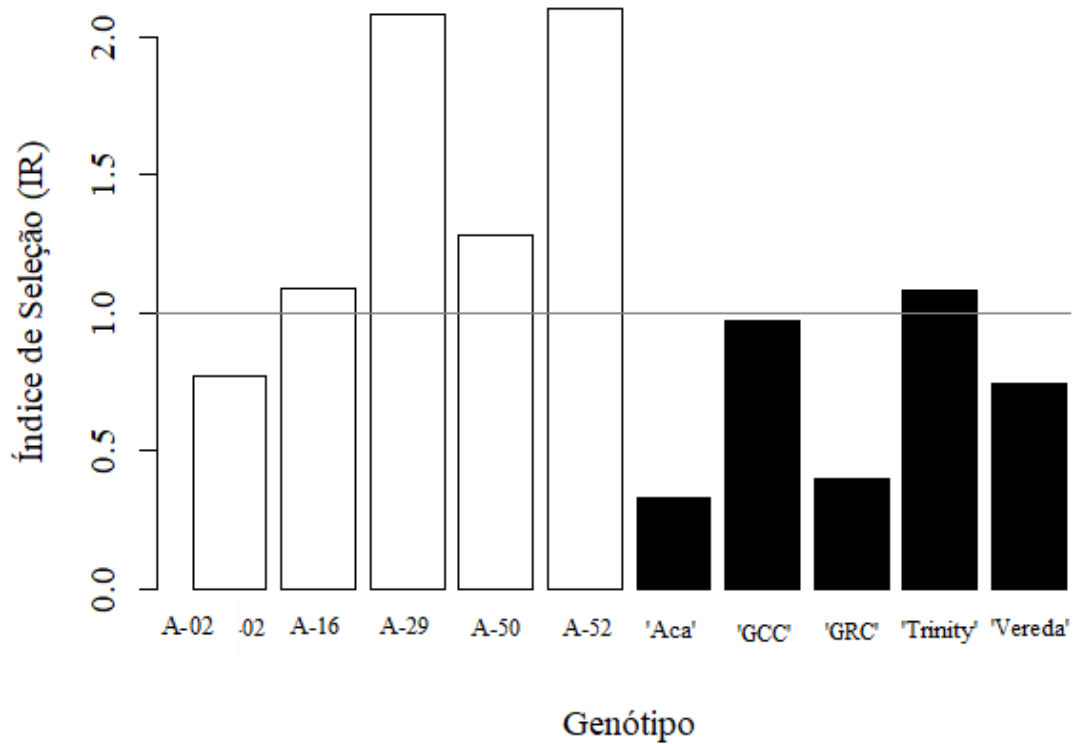
classificados como Ineficientes e Não Responsivos (INR) com matéria seca inferiores nas duas condições (com e sem restrição de fósforo). Por fim, os genótipos 'GCC', 'GRC' e 'Trinity' foram Ineficientes, mas Responsivos (IR), com matéria seca superior à média na solução sem restrição de fósforo (P+) e, inferior, na solução com restrição de fósforo (P-).



**Figura 10** - Matéria seca de genótipos de meloeiro cultivados em de hidroponia em soluções com alto teor de fósforo (P+) e baixo teor de fósforo (P-). ER: Eficientes e Responsivos; ENR: Eficientes e Não Responsivos; INR: Ineficientes e Não Responsivos; IR: Ineficientes e Responsivos.

Existem índices que podem auxiliar na seleção de genótipos mais eficientes e responsivos. No presente trabalho, foi estimado o Índice de Seleção (ISE) considerando a matéria seca dos genótipos avaliados nos dois níveis de disponibilidade de fósforo. Os genótipos de maior destaque (maior índice) foram A-52, A-29, A-50, A-16 e 'Trinity', sendo que dos cinco genótipos, quatro são não melhorados (Figura 11).





**Figura 11** - Índice de Seleção (ISE) de genótipos de meloeiro cultivados em hidroponia em com alto teor de fósforo (P+) e baixo teor de fósforo (P-).

## 5. DISCUSSÃO

### 5.1 Efeito da disponibilidade de fósforo e variabilidade genética

A redução nas variáveis número de folhas, diâmetro do caule, comprimento do ramo principal e matéria seca total, observada nas plantas cultivadas na solução com restrição de fósforo (P-), são concordantes com pesquisas em meloeiro desenvolvidas por outros autores que constataram redução no crescimento das plantas submetidas à menor disponibilidade de fósforo (Fita et al., 2011; Fita et al., 2012; Li et al., 2018). Essa redução de caracteres morfológicos relacionados ao desenvolvimento e crescimento vegetal se deve, provavelmente, ao fato de o fósforo não ser apenas um elemento constituinte de moléculas como os ácidos nucleicos, desoxirribosina trifosfato (ATP) e fosfolipídios, mas atuar como um regulador metabólico essencial para processos como transferência de energia, ativação proteica e metabolismo de carbono e nitrogênio. Assim sendo, esse macronutriente tem papel fundamental nos processos fisiológicos e bioquímicos que regulam o crescimento e desenvolvimento das plantas (Cruz-Ramírez et al., 2009).

Concernente ao fósforo total, também observou-se redução no teor desse elemento nas plantas sob restrição de fósforo. Todavia, observou-se resultado oposto quanto ao teor de fósforo na relação raiz e parte aérea, bem como na mesma relação da matéria seca. Este fato pode ser explicado pela realocação de recursos para o sistema radicular no sentido de promover maior desenvolvimento do sistema radicular e ampliar a capacidade de exploração das raízes sob menor disponibilidade de fósforo. Alguns estudos desenvolvidos com meloeiro (Fita et al., 2011; Fita et al., 2012; Li et al., 2018) e outras espécies, como melancia (Meng et al., 2014), batata-doce (Li et al., 2020), milho (Machado et al., 2011) e feijão (Fageria, 1998; Silva et al., 2014) corroboram com os resultados do presente trabalho.

Não se observou efeito do nível de fósforo sobre o índice de clorofila independente dos genótipos avaliados. Este resultado difere de alguns resultados encontrados na literatura consultada. Li et al. (2018) estudando o efeito do fósforo sobre os cloroplastos em meloeiro em sistema hidropônico concluíram que a baixa disponibilidade de fósforo inibiu a atividade do fotossistema e causou estresse fotooxidativo e fotoinibição. Em melancia em sistema flutuante em estufa, a fotossíntese de todos os genótipos diminuiu significativamente sob condições de estresse (Meng et al., 2014). Silva et al. (2014) também verificaram que genótipos de feijão cultivados na menor dose de fósforo em sistema hidropônico reduziram o índice relativo de clorofila. Porém, com batata em estufa, utilizando dois níveis de P no solo: 0 mg (-P) e 100 mg (P), observou-se

interação genótipos por níveis de fósforo. Por conseguinte, para alguns genótipos a atividade de fotossíntese foi maior no solo com deficiência de fósforo enquanto para outros genótipos a atividade foi maior no solo sem restrição de fósforo (Li et al., 2020). Segundo Bould et al. (1983), a deficiência de fósforo acarreta anormalidades nos cloroplastos e na sua morfologia, bem como a redução na expansão celular, na fotossíntese e na respiração. Por outro lado, Li et al. (2018) sugerem que são necessários mais estudos sobre o efeito da baixa disponibilidade de fósforo na fotossíntese nas plantas superiores. Os resultados do presente trabalho evidenciam que são necessários estudos mais aprofundados e a medição de mais caracteres envolvidos na fotossíntese para se detectar a diferença no germoplasma de meloeiro.

Com relação aos caracteres relacionados ao sistema radicular, constatou-se que houve aumento no comprimento da raiz principal e redução do volume do sistema radicular quando há menor disponibilidade de fósforo. A literatura menciona que a arquitetura do sistema radicular sofre modificações para se adaptar à menor disponibilidade de fósforo, dependendo da cultura, e as principais alterações são o alongamento das raízes laterais, alterações no gravitropismo radicular, aumento ou diminuição da densidade radicular lateral, crescimento primário da raiz interrompido e alterações no peso específico da raiz (Lopez-Bucio et al., 2003; Cruz-Ramírez et al., 2009).

Na espécie modelo para estudos genéticos, *Arabidopsis thaliana*, demonstrou-se diminuição na taxa de alongamento do raiz primária, em oposição a um aumento na taxa de alongamento das raízes laterais e diminuição do número de raízes laterais iniciais em estresse de fósforo (Al-Ghazi et al., 2003). Fita et al. (2011, 2012), avaliando o sistema radicular em meloeiro sob dois níveis de fósforo, observaram redução da dominância da raiz principal principalmente em acessos do grupo *agrestis* sob baixa disponibilidade de fósforo. No entanto, em acessos de outros grupos botânicos essa tendência não foi observada.

Os genótipos avaliados no presente estudo diferiram para a maior parte dos caracteres relacionados à morfologia da planta, sistema radicular e teor de fósforo nas duas soluções nutritivas. Ao considerar a análise simultânea dos caracteres (multivariada), observou-se que os genótipos também foram agrupados em grupos distintos em função da solução, indicando a presença de variabilidade genética.

Os materiais avaliados no presente estudo possuem diferenças quanto ao estágio de melhoramento genético. Entretanto, a análise multivariada não agrupou os genótipos quanto ao seu grau de melhoramento na solução sem deficiência de fósforo (P+), reunindo nos grupos formados

tanto materiais melhorados como não melhorados. Mas, na solução P-, houve uma tendência para o agrupamento de materiais quanto ao seu nível de melhoramento, com poucas exceções (Figura 8).

Esse fato evidencia, de um modo geral, a presença da interação entre genótipos e fósforo, ou seja, existe comportamento ou resposta diferenciada dos genótipos em função da disponibilidade de fósforo. Muitos estudos, com diversas espécies, têm demonstrado a heterogeneidade genotípica em diferentes condições de disponibilidade de fósforo (Silva et al., 2014; Neto et al., 2016; Uzokwe et al., 2017; Li et al., 2018; Bernardino et al., 2019; Li et al., 2020). A presença de variabilidade genética é uma condição imprescindível para que os melhoristas possam conduzir programas de melhoramento genético para obtenção de cultivares eficientes ou tolerantes para o uso de fósforo.

## 5.2 Eficiência de uso, responsividade e tolerância a restrição de Fósforo

Observou-se diferenças para as eficiências de uso, de aquisição e de utilização interna nas duas soluções, indicando heterogeneidade genotípica entre os acessos. Em meloeiro, Fita et al. (2011, 2012) observaram diferenças das eficiências de aquisição e uso entre acessos de meloeiro de diferentes grupos botânicos, sendo que acessos do grupo *agrestis* foram mais eficientes.

Os referidos autores supracitados observaram maior expressão de genes relacionados à mobilização e remobilização de P em três acessos mais eficientes (flex-Ac, in-Am e mo-kha) e menor expressão nos acessos menos eficientes para uso de fósforo (chi-SC, ma-YP e ca-NC), sugerindo que a mobilização e remobilização de P devem ser uma fonte preferencial de diversidade na adaptação de genótipos de melão à deficiência de P. As diferenças entre as eficiências têm sido identificadas, em diversos trabalhos, em outras espécies (Neto et al., 2016; Marcante et al., 2016; Chen et al., 2016; Rose et al., 2016; Kenobi et al., 2017; Prince et al., 2017; Chen et al., 2017; Li et al., 2018; Li et al., 2020).

A Eficiência de uso de fósforo (EUP) depende de dois componentes: i) eficiência de aquisição (EAP) e ii) eficiência de uso interno (EUTP) (Sandaña; Pinochet, 2016). O primeiro está relacionado com a quantidade de nutriente absorvido pela planta dividido pela quantidade de nutriente disponível. O segundo componente depende da biomassa ou produção de grãos produzidos por unidade de nutriente absorvido pela planta. Uma questão que surge é qual desses componentes é o mais importante para EUP em meloeiro? Até a realização do presente trabalho não havia essa informação.

Verificou-se que na solução P+, a EUP foi explicada principalmente pela EUTP, evidenciando que na maior disponibilidade de fósforo a EUTP é mais importante para EUP. Por outro lado, situação oposta ocorreu na solução com restrição de fósforo, na qual a EAP explicou a maior da EUP. Bernardino et al. (2019) concluíram que a EAP é o componente mais importante para a EUP em sorgo quando cultivados com baixo nível de fósforo, semelhante ao nosso estudo. Em milho (Parentoni et al., 2010) e trigo (Manske et al., 2001), os autores verificaram que a EAP foi mais importante tanto em solos com baixo e alto valor de fósforo. Adicionalmente, Manske et al. (2001) demonstraram a EAP é maior em solos ácidos quando comparados com solos calcários e que a EUTP também é afetada pelo tipo de solo.

O conhecimento da contribuição dos componentes EAP e EUTP para Eficiência de Uso de Fósforo (EUP) é importante porque cada uma dessas eficiências depende de diferentes mecanismos. Os mecanismos relacionados à aquisição de fósforo, principalmente em situação de pouca disponibilidade desse nutriente, são modificações radiculares, associações com microrganismos, modificações na rizosfera e modificações bioquímicas. Enquanto os mecanismos relacionados à utilização interna do fósforo são a transferência e distribuição de P na planta, remobilização interna, distribuição de P nos vacúolos (Wang et al., 2010; Shen et al., 2011). Assim, a quantificação da correlação entre EAP e EUTP com EUP auxiliam os pesquisadores a concentrar esforços para entender os mecanismos mais importantes envolvidos na variação genotípica avaliada.

Ressalta-se ainda que a independência de EAP e EUTP tem sido observadas por outros autores (Hu et al. 2010). Este fato é relevante pois sugere que há duas formas complementares de aumentar a eficiência de uso em condições de baixo fósforo. Em outras palavras, é possível a seleção simultânea para as duas eficiências. No presente trabalho, as estimativas nas soluções P+ e P- foram não significativas positivas e de reduzida magnitudes. Ao considerar as duas eficiências, foi possível identificar dois acessos com EAP e EUTP acima da média do grupo avaliado (A-29 e A-52).

Os genótipos foram avaliados quanto à sua eficiência e responsividade com base na matéria seca produzida nos dois níveis de fósforo. Observou-se variabilidade genotípica com os genótipos alocados nos quatro grupos considerados. Os genótipos A-02, A-29 e A-52 foram classificados como eficientes e responsivos. Sousa (2018) avaliando a eficiência e a demanda nutricional quanto ao uso de fósforo em genótipos de melão em diferentes doses de fósforo em condições de campo, concluiu que o genótipo A-50 foi eficiente, responsivo e aquele com maiores acúmulos de NPK. A

autora recomendou para aumentar a eficiência no uso de P por meio de cruzamentos com cultivares ou linhagens melhoradas. No nosso trabalho, o genótipo A-50 foi classificado como eficiente mas não responsivo, porém com matéria seca próxima do valor médio obtido pelos genótipos na solução P+. Diferenças do comportamento de um mesmo genótipo em diferentes estudos podem ser explicadas por vários fatores como, por exemplo, condição de plantio, nível de fósforo e condições edafoclimáticas.

Maia et al. (2011) realçam que é importante não apenas considerar a eficiência de uso, mas também a tolerância dos genótipos em condições de estresse de fósforo. O Índice de Seleção (ISE) foi utilizado como medidor da plasticidade de cada genótipo. Novamente, se constatou variabilidade genética com destaque para A-29, A-50 e A-52 por apresentar maior plasticidade.

Convém ressaltar que no presente estudo foram avaliados dois grupos de genótipos. O primeiro grupo representado por cinco genótipos melhorados de diferentes tipos de melão ('Vereda', 'GRC', 'Aca', 'GCC' e 'Trinity') e o segundo por cinco acessos coletados em estradas ou pequenas propriedades sendo quatro da variedade botânica *momordica* (A-02, A-29, A-50 e A-52) e um do grupo *acidulus* (A-16). A ideia foi testar a hipótese de que genótipos melhorados são mais eficientes no uso de P conforme afirmam Hammond et al. (2009).

Sabe-se que as modernas cultivares foram obtidas sob condições de seleção com alta disponibilidade de fósforo e outros nutrientes por meio da aplicação de fertilizantes. Sob essa condição, alguns alelos relacionados à aquisição eficiente de nutrientes são perdidos, uma vez que os nutrientes estão diretamente disponíveis para as plantas. Em razão disso, características adaptativas das plantas em resposta a escassez de nutrientes geralmente resulta em custo adicional de carbono prejudicando à produção de biomassa ou grãos (Wissuwa et al., 2009).

Por conseguinte, a seleção para aquisição de P tem sido feita para as cultivares modernas, explicando seu maior poder de aquisição de fósforo. Entretanto, no presente trabalho, não se observou essa tendência. Em média, não houve diferença entre os grupos avaliados nas duas soluções. Considerando-se os valores individuais da EAP nas duas soluções (P+ e P-), verificou-se pequena variação dentro dos dois grupos na solução P+ e reduzida variação na solução (P-) no grupo não melhorado. O híbrido 'Vereda' apresentou a maior EAP na menor disponibilidade de fósforo, sendo o único a diferir dos demais genótipos avaliados.

Wang et al. (2010) entende que o grande desafio para aumentar a eficiência do uso de P em cultivares modernas é alterar os mecanismos relacionados à EUTP para se ter maiores produções. A média dos genótipos não melhorados foi superior àquele do grupo melhorado nas duas soluções,

sendo esse contraste muito menor na solução P+ pelo fato do genótipo de maior EUTP, ‘GCC’, pertencente ao grupo melhorado, ter incrementado à média do referido grupo. Este fato também evidencia que há variabilidade entre e dentro dos grupos para EUTP. Na condição de restrição de fósforo (P-), constatou-se menor variação dentro de cada grupo.

Ao se considerar as eficiências simultaneamente na solução P+, constatou-se que os genótipos A-29 e A-50 (não melhorados) e ‘GCC’ (melhorado) se destacaram como aqueles com comportamento acima da média para EAP e EUTP. Dos quatro genótipos com pior desempenho, isto é, estimativas de EAP e EUTP, quatro são não melhorados. Na solução P-, os genótipos A-29 e A-50 destacaram, enquanto que entre os quatro materiais de pior desempenho, três eram melhorados. Com esses resultados, nota-se que é perfeitamente possível obter genótipos com elevados EAP e EUTP (Hu et al., 2010). Por outro lado, os achados desta pesquisa discordam de Fita et al. (2011) que observaram, em sua maioria, maior eficiência no uso de fosforo por parte dos genótipos de melão melhorados.

Todos os genótipos não melhorados estavam entre os eficientes, sendo os A-02, A-29 e A-50 também responsivos. Do grupo melhorado, todos foram considerados ineficientes sendo três responsivos (‘GCC’, ‘GRC’ e ‘Trinity’). Sousa (2018), em condições de campo, também verificou que genótipos de meloeiro não melhorados foram mais eficientes e responsivos em relação aos cultivares melhorados.

Uma outra estratégia de melhoramento é a obtenção de genótipos tolerantes a uma menor disponibilidade de fósforo. Genótipos tolerantes geralmente são mais estáveis devido à sua maior plasticidade fenotípica nos distintos ambientes, esse tipo de genótipo é capaz de manter um nível adequado de produção de biomassa ou grãos mesmo em circunstâncias contrastantes (Bradshaw, 2006). Dos cinco genótipos mais tolerantes, quatro eram do grupo não melhorado. Genótipos melhorados tendem, em média, a ser menos plásticos porque foram selecionados para condições de cultivos com alta tecnologia e maior aplicação de adubos (Wang et al., 2010). Esses genótipos são menos responsivos de um modo geral e menos produtivos, mas podem ser uma alternativa para áreas marginais com deficiência de fósforo.

## 6. CONCLUSÕES

- Pouca disponibilidade de P reduz crescimento, teor de fósforo e matéria seca, mas não altera o índice de clorofila;
- As eficiências de uso e de utilização interna são maiores quando há menor disponibilidade de fósforo enquanto a eficiência de aquisição é menor;
- Há variabilidade para as eficiências de uso, de aquisição e utilização interna de fósforo entre e dentro dos grupos de genótipos melhorados e não melhorados;
- Os genótipos não melhorados têm, em média, maior eficiência de uso e de utilização interna do fósforo, porém eficiência de aquisição semelhante quando há menor disponibilidade de fósforo;
- Os genótipos A-16, A-29, A-50, A-52 e Trinity foram classificados em Eficientes e Responsivos (ER) na solução com menor disponibilidade de fósforo, dessa forma, são promissores para estudos em melhoramento genético.



## 7. REFERÊNCIAS

- Akhtar, M. S.; Oki, Y.; Adachi, T.; Murata, Y.; Khan, M. H. Relative phosphorus utilization efficiency, growth response, and phosphorus uptake kinetics of Brassica cultivars under a phosphorus stress environment. *Communications in soil science and plant analysis*, v. 38, p. 1061-1085, 2007.
- Al-Ghazi, Y.; Muller, B.; Pinloche, S.; Tranbarger, T. J.; Nacry, P.; Rossignol, M.; Tardieu, F.; Doumas, P. Temporal responses of Arabidopsis root architecture to phosphate starvation: evidence for the involvement of auxin signalling. *Plant, Cell & Environment*, v. 26, p. 1053-1066, 2003.
- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, p. 711-728, 2013.
- Amorim, L. B.; Martins, C. M.; Costa, W. P. L. B.; Souza, E. R. Disponibilidade de fósforo em Neossolo Quartzarênico cultivado com melão. *Caatinga*, v. 21, p. 141-146, 2008.
- Apha. Standard Methods for the examination of water and wasterwater. 21. ed. Washington, USA: American Public Health Association, 2005.
- Araujo, J. L.; Faquin, V.; Baliza, D. P.; Ávila, F. W. D.; Guerrero, A. C. Growth and mineral nutrition of green onions grown hydroponically under different N, P and K concentrations. *Revista Ceres*, v. 63, p. 232-240, 2016.
- Arruda, L. N.; Bucher, C. A.; Rangel, R. P.; Souza, A. F. F.; Fernandes, M. S.; Souza, S. R. Superexpressão do transportador OsNPF4. 11 (OsNRT1. 2) afeta teor de nitrato, parâmetros radiculares e crescimento de arroz. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 13, p. e5493, 2018.
- Balbinot Junior, A. A.; Debiasi, H.; Franchini, J. C.; Prieto, J. P. C.; De Moraes, M. T.; Werner, F.; Ferreira, A. S. Crescimento e distribuição de raízes de soja em diferentes densidades de plantas. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 17, n.1, p. 12-26, 2018.

- Balemi, T.; Negish, K. Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 12, p. 547-562, 2012.
- Barbieri, P. A.; Echeverria, H. E.; Rozas, H. S. Métodos de colocación de fósforo en trigo y maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, v. 44, p. 301-308, 2018.
- Bates, T. R.; Lynch, J. P. Root hairs confer a competitive advantage under low phosphorus availability. *Plant Soil*, v. 236, p. 243-250, 2001.
- Bernardino, K. C.; Pastina, M. M.; Menezes, C. B.; Sousa, S. M.; Maciel, L. S.; Carvalho Jr, G.; Guimarães, C. T. ; Barros, B. A. .; Silva, L. C .; Carneiro, P. C. S. .; Schaffert, R. E. .; Kochian, L. V.; Magalhaes, J. V. The genetic architecture of phosphorus efficiency in sorghum involves pleiotropic QTL for root morphology and grain yield under low phosphorus availability in the soil. *BMC plant biology*, v. 19, p. 87, 2019.
- Bezerra Neto, E.; Barreto, L. P. As técnicas de hidroponia. *Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica*, v. 8, p. 107-137, 2013.
- Bould, C.; Hewitt, E. J.; Needham, P. *Diagnosis of Mineral Disorders in Plants*. London: Her Majesty's Stationery Office, v. 1, 1983.
- Bradshaw, A. D. Unravelling phenotypic plasticity—why should we bother?. *New Phytologist*, v. 170, p. 644-648, 2006.
- Carvalho, N.; Canela, F. M.; Leite, P. H. S.; Ferreira, M. A.; Oliveira, V. R.; Santos, M. F; Souza, N. O. S.; Buso, G. S. C. Analysis of genetic variability of commercial melon cultivars using SSR molecular markers. *Genetics and Molecular Research*, v. 16, p. 1-8. 2017.
- Castellane, P. D.; Araújo, J. A. C. *Cultivo sem solo – hidroponia*. Jaboticabal. UNESP/FUNEP. 1994.

- Cavalcante Neto, J. G.; Ferreira, K. T. C.; Aragão, F. A. S. D.; Antônio, R. P.; Nunes, G. H. D. S. Potential of parents and hybrids experimental of the yellow melon. *Ciência Rural*, v. 50, 2020.
- Cavalcante, A. R.; Santos Junior, J. A.; Gheyi, H. R.; Dias, N. S.; Paz, V. P. S. Produção e composição mineral do coentro em sistema hidropônico de baixo custo. *Irriga*, v. 21, p.685-696, 2016.
- Cecílio filho, A. B.; Costa, C. C.; Rezende, B. L. A.; Barbosa, J. C. Crescimento e partição de assimilados em melão cantaloupe em função de concentrações de fósforo em solução nutritiva. *Científica*, v. 34, p. 123-130, 2008.
- Charlo, H. C. O.; Castoldi, R.; Vargas, P. F.; Braz, L. T. Desempenho de híbridos de melão-rendilhado cultivados em substrato. *Científica*, v. 37, p. 16-21, 2009.
- Chen, S.; Luo, Y.; Ding, G.; Xu, F. Comparative analysis of Brassica napus plasma membrane proteins under phosphorus deficiency using label-free and MaxQuant-based proteomics approaches. *Journal of proteomics*, v. 133, p. 144-152, 2016.
- Chen, Y.; Ghanem, M. E.; Siddique, K. H. Characterising root trait variability in chickpea (*Cicer arietinum* L.) germplasm. *Journal of Experimental Botany*, v. 68, p. 1987-1999, 2017.
- Christy, J.; Putri, L.A. P.; Hanafiah, D. S. A study of hydroponic melon cultivations with several substrate media and varieties. *Journal of Community Research and Service*, v. 1, p. 92-96, 2018.
- Colombo, G. A.; Pelúzio, J. M.; Pires, L. P. M.; Daronch, D. J.; Machado Filho, G. C. Phosphorus use efficiency of soybean cultivars in Cerrado conditions of Tocantins, Brazil. *Journal of bioenergy and food science*, v. 3, p. 42-49, 2016.
- Cordell, D.; Dranger, T J.; White, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environ Change Human Policy Dimens*, v. 19, p. 292-305, 2009.

- Cosme, C. R.; Dias, N. S.; Silva, K. M. P.; Silva, C. V. T.; Queiroz, Í. S. R.; Rebouças, T. C.; Fernandes, C. S. Yield and quality of 'gália' melon grown in coconut fiber under different concentrations of macronutrients in the nutrient solution. *Idesia*, v.35, p. 119-128, 2017.
- Cruz-Ramírez, A.; Calderón-Vázquez, C.; Herrera-Estrella, L. Effect of nutrient availability on root system development. *Effect of nutrient availability on root system development. Annual Plant Reviews online*, p. 288-324, 2009.
- Dantas, A. C. A.; Nunes, G. H. S.; Araújo, I. S.; Albuquerque, L. B. Caracterização molecular de acessos de melão coletados no Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v.34, p. 183-189, 2012.
- Douglas, J. S. *Hidroponia: cultura sem terra*. NBL Editora, 2001. 164 p.
- Eloi, W. M.; Sousa, V. F.; Araújo Viana, T. V.; Andrade Júnior, A. S.; Holanda, R. S. F.; Alcântara, R. M. C. M. Distribuição espacial do sistema radicular da gravioleira em função de diferentes doses de nitrogênio e potássio aplicadas via água de irrigação. *Irriga*, v. 9, p. 256-269, 2004.
- Fageria, N. K. Eficiência de uso de fósforo pelos genótipos de feijão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 2, p. 128-131, 1998.
- Ferreira, E. R.; Bezerra, L. A.; Oliveira, t.; Carvalho, J.; Silva, R. Benefícios do cultivo hidropônico em ambiente protegido. *Revista Conexão Eletrônica*, v. 14, p. 485-491. 2017.
- Fita, A.; Bowen, H. C.; Hayden, R. M.; Nuez, F.; Pico, B.; & Hammond, J. P. Diversity in expression of phosphorus (P) responsive genes in *Cucumis melo* L. *PloS one*, v. 7, p. 1-12, 2012.
- Fita, A.; Nuez, F.; Picó, B. Diversity in root architecture and response to P deficiency in seedlings of *Cucumis melo* L. *Euphytica*, v. 181, p. 323-339, 2011.

- Furlani, P. R. Instrução para o cultivo de hortaliça de folha pela técnica de hidroponia - NFT. Campinas: Instituto Agronômico, 1998.
- Grant, C. A.; Flaten, D. N.; Tomasiewicz, D. J.; Sheppard, S. C. The importance of early season phosphorus nutrition. *Canadian Journal of Plant Science*, v. 81, p. 211-224, 2001.
- Hammond, J. P.; Broadley, M. R.; White, P. J.; King, G. J.; Bowen, H. C.; Hayden, R.; Meacham, M. C.; Mead, A.; Overs, T.; Spracklen, W. P. Shoot yield drives phosphorus use efficiency in *Brassica oleracea* and correlates with root architecture traits. *Journal of Experimental Botany*, v. 60, p. 1953-1968, 2009.
- Hu, Y.; Ye, X.; Shi, L.; Duan, H.; Xu, F. Genotypic differences in root morphology and phosphorus uptake kinetics in *Brassica napus* under low phosphorus supply. *Journal of Plant Nutrition*, v. 33, p. 889-901, 2010.
- Kenobi, K.; Atkinson, J. A.; Wells, D. M.; Gaju, O.; Silva, J. G.; Foulkes, M. J.; Dryden, I. L.; Wood, A. T. A.; Bennett, M. J. Linear discriminant analysis reveals differences in root architecture in wheat seedlings related to nitrogen uptake efficiency. *Journal of experimental botany*, v. 68, p. 4969-4981, 2017.
- Kochian, L. V. Rooting for more phosphorus. *Nature*, v. 488, p. 466-467, 2012.
- Lana, R. M. Q.; Queiroz, I. D.; Torres, J. L. R.; Ferreira, A. D. S.; Faria, M. V.; Siqueira, T. P. Associação entre doses de nitrogênio e inoculação das sementes com bactéria diazotrófica no Milho. *Revista de la Facultad de Agronomía*, v. 116, p. 171-178, 2017.
- Lange, A.; Diel, D.; Carvalho, F. F.; Machado, R. A.; Zanuzo, M. R.; Silva, A.; Buchelt, A. C. Fontes de fósforo na adubação corretiva em arroz de terras altas em cultivo de primeiro ano. *Revista de ciências agroambientais*, v. 14, p. 67-75, 2016.
- Li, C.; Wang, J.; Zhang, Y. C. Root growth and phosphorus efficiency among sweet potato genotypes under low phosphorus. *Journal of Plant Nutrition*, v. 43, n. 9, p. 1320-1330, 2020.

- Li, P.; Weng, J.; Zhang, Q.; Yu, L.; Yao, Q.; Chang, L.; Niu, Q. Physiological and biochemical responses of *Cucumis melo* L. chloroplasts to low-phosphate stress. *Frontiers in plant science*, v. 9, p. 1-13, 2018.
- Lima, A. C. C.; Costa, E. M.; Araujo, E. L.; Rugama, A. J. M.; Godoy, M. S. Diagnóstico sobre o uso do MIP nas principais áreas produtoras de melão dos Estados do Rio Grande do Norte e Ceará. *Revista Agro@mbiente On-line*, v. 6, p. 172-178, 2012.
- Lopes, H. S. S.; Medeiros, M. G. D.; Silva, J. R.; Medeiros Júnior, F. A.; Santos, M. N. D.; Batista, R. O. Biomassa microbiana e matéria orgânica em solo de Caatinga, cultivado com melão na Chapada do Apodi, Ceará. *Revista Ceres*, v. 59, p. 565-570, 2012.
- Lopez-Bucio, J.; Cruz-Ramirez, A.; Herrera-Estrella, L. The role of nutrient availability in regulating root architecture. *Current Opinion Plant Biology*, v. 6, p.280-287, 2003.
- Luz, J. M. Q.; Guimarães, S. T. M. R.; Korndörfer, G. H. Produção hidropônica de alface em solução nutritiva com e sem silício. *Horticultura Brasileira*, v. 24, p. 295-300, 2006.
- Lynch, J. P. Roots of the second green revolution. *Australian Journal Botany*, v. 55, p. 493- 512, 2007.
- Lynch, J. P.; Brown, K. M. Topsoil foraging-an architectural adaptation of plants to low phosphorus availability. *Plant Soil*, v. 237, p. 225-237, 2001.
- Lynch, J. P.; Lauchli, A.; Epstein, E. Vegetative growth of the common bean in response to phosphorus nutrition. *Crop Science*, v.31, p.380-387, 1991.
- Machado, A. T.; Machado, C. T. D. T.; Nass, L. L. Manejo da diversidade genética e melhoramento participativo de milho em sistemas agroecológicos. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 6, p. 127-136, 2011.

- Maia, C.; Vale, J. C.; Fritsche-Neto, R.; Cavatte, P. C.; Miranda, G. V. The difference between breeding for nutrient use efficiency and for nutrient stress tolerance. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 11, p. 270-275, 2011.
- Malavolta, E. *Manual de nutrição de plantas*. São Paulo: Editora Agronômica Ceres. p. 1 – 631, 2006.
- Malta, A. O.; Oliveira, V. E. A.; Almeida, D. J.; Santos, A. S. Crescimento do meloeiro em diferentes substratos. *Revista Sítio Novo*, v.1, p.238-246, 2017.
- Manske, G. G. B.; Ortiz-Monasterio, J. I.; Van Ginkel, M.; Gonzalez, R. M.; Fischer, R. A.; Rajaram, S.; Vlek, P. L. G. Importance of P uptake efficiency versus P utilization for wheat yield in acid and calcareous soils in Mexico. *European Journal of Agronomy*, v. 14, p. 261-274, 2001.
- Marcante, N. C.; Muroaka, T.; Bruno, I. P.; Camacho, M. A. Phosphorus uptake and use efficiency of different cotton cultivars in savannah soil (Acrisol). *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 38, n. 2, p. 239-247, 2016.
- Meng, X.; Liu, N.; Zhang, L.; Yang, J.; Zhang, M. Genotypic differences in phosphorus uptake and utilization of watermelon under low phosphorus stress. *Journal of Plant Nutrition*, v. 37, p. 312-326, 2014.
- Mollier, A.; Pellerin, S. Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. *Journal of Experimental Botany*, v. 50, p. 487-497, 1999.
- Moll, R. H.; Kamprath, E. J.; Jackson, W. A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal, Madison*, v. 74, p. 562–564, 1982.
- Nascimento, C. S.; Nascimento, C. S.; Cecílio Filho, A. B. N:K ratio for phenological growth stages of net melon cultivated in NFT hydroponic system. *Revista Caatinga*, v. 33, p. 108-115, 2020.

- Neto, A. P.; Favarin, J. L.; Hammond, J. P.; Tezotto, T.; Couto, H. T. Analysis of phosphorus use efficiency traits in *Coffea* genotypes reveals *Coffea arabica* and *Coffea canephora* have contrasting phosphorus uptake and utilization efficiencies. *Frontiers in plant science*, v. 7, p. 408, 2016.
- Niu, Y. F.; Chai, R. S.; Jin, G. L.; Wang, H.; Tang, C. X.; Zhang, Y. S. Responses of root architecture development to low phosphorus availability: a review. *Annals of botany*, v.112, p. 391-408. 2013.
- Oliveira, L. A. A.; Cardoso, E. A.; Ricarte, A. O.; Martins, A. F.; Costa, J. M.; Nunes, G. H. S. Stability, adaptability and shelf life of Cantaloupe melon hybrids. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 41, p. 1-11, 2019.
- Parentoni, S. N.; Souza Jr, C. L.; Carvalho Alves, V. M.; Gama, E. E. G.; Coelho, A. M.; Oliveira, A. C.; Guimarães, P.E.O.; Guimarães, C.T.; Vasconcelos, M.J.V.; Patto Pacheco, C.A.; Meirelles, W.F. de Magalhães, J.V.; Moreira Guimarães, L.J.; Silva, A.R.; Ferreira Mendes, F.; Schaffert, R.E. Inheritance and breeding strategies for phosphorous efficiency in tropical maize (*Zea mays L*). *Maydica*, v. 55, p. 1-15, 2010.
- Parentoni, S.N.; Mendes, F.F.; Guimarães, L.J.M. Melhoramento para a eficiência no uso de fósforo. In: FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. (Eds.). Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos. Viçosa-MG: Editora UFV. 2011. 101-126p.
- Postma, J. A.; Ulrich, S.; Fiorani, F. Dynamic root growth and architecture responses to limiting nutrient availability: linking physiological models and experimentation. *Biotechnology Advances*, v. 32, p.53-65, 2014.
- Prince, S. J.; Murphy, M.; Mutava, R. N.; Durnell, L. A.; Valliyodan, B.; Shannon, J. G.; Nguyen, H. T. Root xylem plasticity to improve water use and yield in water-stressed soybean. *Journal of Experimental Botany*, v. 68, p. 2027-2036, 2017.



- R development core team r: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, R Foundation for Statistical Computing. 2020.
- Reis, G. G. D.; Pereira, F. B.; Granato, I. S. C.; DoVale, J. C.; Fritsche-Neto, R. Índices de seleção de genótipos de milho tropical para eficiência no uso de nutrientes: fósforo. *Revista Ceres*, v. 64, p. 266-273, 2017.
- Rezende, R.; Junior, C. H.; Freitas, P. S. L.; Gonçalves, A. C. A.; Dallacort, R.; Frizzone, J. A. Diferentes soluções nutritivas aplicadas em duas vazões na produção hidropônica da cultura da alface. *Irriga*, v. 12, p.354-363, 2007.
- Rose, T. J.; Mori, A.; Julia, C. C.; Wissuwa, M. Screening for internal phosphorus utilisation efficiency: comparison of genotypes at equal shoot P content is critical. *Plant and Soil*, v. 401, p. 79-91, 2016.
- Rose, T. J.; Pariasca-Tanaka, J.; Rose, M. T.; Mori, A.; Wissuwa, M. Seeds of doubt: Re-assessing the impact of grain P concentrations on seedling vigor. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 175, p. 799-804, 2012.
- Sanabria-Verón, N. C.; Melo, C. A. F.; Pereira, J.; Nunes, G. H. S.; Oliveira, O. L. S.; Corrêa, R. X. Cucumber mosaic virus resistance and reproductive biology of brazilian melon accessions. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 41, p. 1-16, 2019.
- Sandaña, P.; Pinochet, D. Phosphorus acquisition of wheat, pea and narrow-leafed lupin under different P supplies. *Journal of soil science and plant nutrition*, v. 16, p. 537-549, 2016.
- Sattari, S. Z.; Bouwman, A. F.; Giller, K. E.; Van Ittersum, M. K. Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, p. 6348-6353, 2012.
- Scott-knott, A. J.; Knott, M. Cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, v. 30, p. 507-512, 1974.

- Shen, J.; Yuan, L.; Zhang, J.; Li, H.; Bai, Z.; Chen, X.; Zhang, W.; Zhang, F. Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant physiology*, v. 156, p. 997-1005, 2011.
- Silva, D. A. D.; Esteves, J. A. D. F.; Messias, U.; Teixeira, A.; Gonçalves, J. G. R.; Chiorato, A. F.; Carbonell, S. A. M. Efficiency in the use of phosphorus by common bean genotypes. *Scientia Agricola*, v. 71, p. 232-239, 2014.
- Silva, E. M.; Santos, M. M.; Lopes, M. B. S.; Fidelis, R. R.; Rocha, W. S.; Júnior, A. F. C. Eficiência de rizóbios sob doses de fósforo na cultura do feijão-caupi. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, v. 9, p. 67-77, 2019.
- Silva, F. C. Manual de análises químicas de solos, planta e fertilizantes / (Ed) – 2. ed. Ver. Ampl. – Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.
- Silva, K. M. P.; Cosme, C. R.; Dias, N. S.; Queiroz, Í. S. R.; Diniz, A. A.; Santos Junior, J. A. Produção e qualidade de frutos do meloeiro cultivado em sistema semi-hidropônico. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.11, p. 1914-1923, 2017b.
- Silva, M. R.; Ignacio, L. A.; Da Silva, G. A. Desenvolvimento de mudas de maracujá amarelo em função de diferentes doses fósforo reativo. *Revista de Agronegócio*, v.6, p.41-50, 2017a.
- Singh, D. The relative importance of characters affecting genetic divergence. *Indian Journal of Genetic and Plant Breeding*, v. 41, p. 237-245, 1981.
- Sousa, R. S.; Costa, K. M. F. M.; Câmara, I. M. B.; Oliveira, G. B.; Moura, E. S. R.; Fonseca, Z. A. A. S.; Moreira, J. O.; Leite, A. I. Aspectos epidemiológicos dos acidentes ofídicos no município de Mossoró, Rio Grande do Norte, no período de 2004 a 2010. *Revista de Patologia Tropical*, v. 42, p.105 – 113, 2013.
- Sousa, V. F. L. Eficiência e demanda nutricional de cultivares de melão em função de doses de fósforo. Mossoró: Universidade Federal Rural Do Semi-Árido. 2018. 55 p. Tese Doutorado.

- Souza, M. P. S.; Melo Reis, B.; Prins, C. L.; Costa, A. C.; Santos, L. S. Efeito de doses de fósforo sobre crescimento inicial de mudas de cebolinha. *Seagro: Anais da Semana Acadêmica do Curso de Agronomia do CCAE/UFES*, v. 1, 2017.
- Souza, M. S.; Alves, S. S. V.; Dombroski, J. L. D.; Freitas, J. D. B. D.; Aroucha, E. M. M. Comparação de métodos de mensuração de área foliar para a cultura da melancia. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 42, p. 241-245, 2012.
- Syers, J. K.; Johnston, A. E.; Curtin, D. efficiency of soil and fertilizer phosphorus use: reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* 18. Rome, Italy, 2008. 108p.
- Uzokwe, V. N.; Asafo-Adjei, B.; Fawole, I.; Abaidoo, R.; Odeh, I. O.; Ojo, D. K.; Dashiell, K. Sanginga, N. Generation mean analysis of phosphorus-use efficiency in freely nodulating soybean crosses grown in low-phosphorus soil. *Plant breeding*, v. 136, n. 2, p. 139-146, 2017.
- Van de Wiel, C. C. M.; Van der Linden, C. G.; Scholten, O. E. Improving phosphorus use efficiency in agriculture: opportunities for breeding. *Euphytica*, v. 207, p. 1-22, 2016.
- Vance, C. P.; Uhde-stone C.; Allan, D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, v. 157, p. 423-447, 2003.
- Vendruscolo, E. P.; Araujo, L. V.; Semensato, L. R.; Campos, L. F. C.; Oliveira, P. R.; Seleguini, A. Resíduo de caldeira como substrato alternativo à produção de mudas de meloeiro Cantaloupe. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 2, p. 1201-1211, 2019.
- Wang, X.; Shen, J.; Liao, H. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops? *Plant Science*, v. 179, p. 302-306, 2010.
- Wissuwa, M.; Ae, N. Genotypic variation for tolerance to phosphorus deficiency in rice and the potential for its exploitation in rice improvement. *Plant Breeding*, v. 120, p. 43-48, 2001.

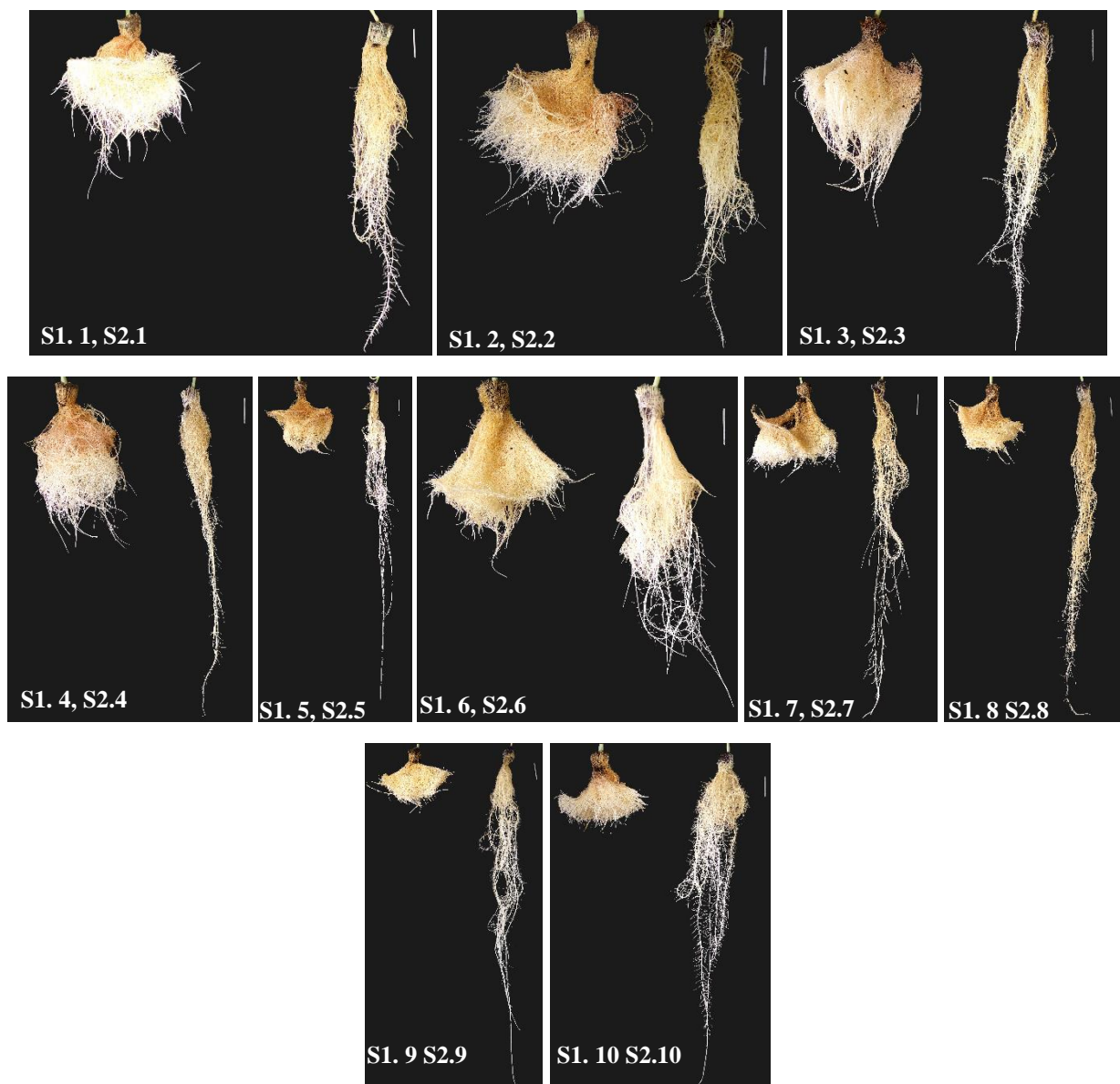
Wissuwa, M.; Mazzola, M.; Picard, C. Novel approaches in plant breeding for rhizosphere-related traits. *Plant and Soil*, v. 321, p. 409, 2009.

## APÊNDICE 1

Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3	Bloco 4	Bloco 5
S2	S1	S2	S1	S2
①	⑧	⑩	③	④
⑩	②	⑥	⑥	⑦
⑧	⑨	⑤	⑧	⑨
⑥	③	⑨	①	③
④	⑦	⑧	⑨	①
⑤	⑤	⑦	④	②
⑨	⑩	②	⑦	⑧
③	④	①	②	⑥
⑦	①	③	⑤	⑩
②	⑥	④	⑩	⑤
S1	S2	S1	S2	S1
⑥	⑤	③	②	⑦
⑧	⑨	⑦	⑤	⑩
①	③	⑥	⑨	⑧
⑨	④	⑤	④	⑨
③	⑧	⑨	①	③
⑦	①	②	⑧	④
②	⑥	④	⑩	①
⑩	②	⑩	⑦	⑥
④	⑦	⑧	⑥	②
⑤	⑩	①	③	⑤

**Apêndice 1-** Croqui do experimento no ambiente protegido. (1: ‘Vereda’; 2: ‘Gaúcho redondo conesul’; 3: ‘Amarillo canário’; 4: ‘Gaúcho casca de carvalho melhorado’; 5: ‘Trinity’; 6: A-02; 7: A- 16; 8: A-29; 9: A-50 e 10: A-52)

## APÊNDICE 2



**Apêndice 2-** Raízes dos genótipos de meloeiro. Legenda: S1: solução nutritiva sem restrição de fósforo (P+); S2: solução nutritiva com restrição de fósforo (P-); (1: vereda; 2: gaúcho redondo conesul; 3: amarillo canário; 4: gaúcho casca de carvalho; 5: trinity; 6: A-02; 7: A- 16; 8: A-29; 9: A-50 e 10: A-52). Escala na foto de 5 cm.