

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA RADICIAL de *Avena sativa* L. SUBMETIDO
A DIFERENTES pHs

Bianca Oliveira Machado
Engenheira agrônoma/IFRS

Dissertação apresentada como um dos requisitos
à obtenção do Grau de Mestre em Fitotecnia
Área de concentração: Biotecnologia, Recursos Genéticos e Melhoramento
Vegetal

Porto Alegre (RS), Brasil
Setembro de 2021

CIP - Catalogação na Publicação

Machado, Bianca Oliveira
Caracterização do sistema radical de Avena sativa
L. submetido a diferentes pHs / Bianca Oliveira
Machado. -- 2021.
87 f.
Orientador: Marcelo Teixeira Pacheco.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, BR-RS,
2021.

1. Aveia. 2. Variabilidade fenotípica. 3.
Morfologia de raízes. 4. Solução hidropônica. I.
Teixeira Pacheco, Marcelo, orient. II. Título.

BIANCA OLIVEIRA MACHADO
Engenheira Agrônoma - IFRS

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRA EM FITOTECNIA

Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 30.09.2021
Pela Banca Examinadora
(Via videoconferência)

Homologado em:
Por

MARCELO TEIXEIRA PACHECO
Orientador
PPG Fitotecnia/UFRGS

CARLA ANDRÉA DELATORRE
Coordenadora do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia

JOSÉ ANTÔNIO MARTINELLI
Coorientador
PPG Fitotecnia/UFRGS

CARLA ANDRÉA DELATORRE
PPG Fitotecnia/UFRGS

LUIZ CARLOS FEDERIZZI
PPG Fitotecnia/UFRGS

PAULO HENRIQUE DE OLIVEIRA
PPG Desenvolvimento Regional
UTFPR

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade de
Agronomia

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Vera e José Itair, meus irmãos Cristiano e Viviane, meus sobrinhos Ana Carolina, Artur, Beatriz e Vitória e ao meu namorado Dieizon que, com muito amor e carinho me guiam e me apoiam, possibilitando que os meus sonhos se tornem realidade.

Ao professor Marcelo Teixeira Pacheco pelos inúmeros conhecimentos transmitidos, por estar sempre disposto a orientar e pela paciência e busca de soluções nos momentos de dificuldade.

Ao professor José Antônio Martinelli pelo tempo de participação, auxílio e ensinamentos.

À Cátia Meneguzzi, Fernanda Arns e Estéfani Sulzbach pela amizade, momentos de diversão e apoio. Compartilhar os meus dias com vocês tornou a caminhada mais leve.

À Jacqueline Schmitz por transmitir suas experiências e conhecimentos, me guiando na aventura com as raízes.

À Jéssica Argenta pelo companheirismo e auxílio nas atividades.

À Vanessa Duarte por transmitir tranquilidade e adoçar nossos dias com seus bolos maravilhosos.

Às amigas Lucero Huasasquiche Sarmiento e Ângela Machado, com as quais tive o privilégio de morar junto e dividir as angústias e alegrias.

À Jozefine Barros e Thienne Pires pelas conversas e risadas.

À Daniela da Silva e a Adriana Nunes pelo incentivo, carinho e bate-papos.

Aos demais colegas e professores do Departamento de Plantas de Lavoura da UFRGS pelo convívio e ensinamentos.

À UFRGS pela estrutura e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

*“Permaneça em seu caminho apesar dos obstáculos.
Confie na caminhada apesar das adversidades. É a
coragem de acreditar. Em que se é. No que se quer.
É a coragem de ser fiel. Ao que se acredita. Ao seu
próprio coração. É seguir com a firmeza da verdade.
E com a força da fé” - Autor desconhecido*

CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DO SISTEMA RADICIAL de *Avena sativa* L. SUBMETIDO A DIFERENTES pHs¹

Autor: Bianca Oliveira Machado
Orientador: Marcelo Teixeira Pacheco

RESUMO

As raízes são essenciais para muitas funções da planta, como absorção de água e nutrientes e ancoragem da planta ao solo. As características morfológicas do sistema radicial, além de serem geneticamente controladas, variam com o ambiente, como a concentração de íons de hidrogênio (pH) do solo, que afeta o crescimento e o desenvolvimento das raízes das plantas. Este trabalho teve como objetivos caracterizar morfológicamente o sistema radicial de *Avena sativa* L., crescido em solução hidropônica, sob diferentes pHs, e desenvolver metodologia adequada para esta caracterização. Para fins de manutenção do pH da solução mais próximo possível ao pH alvo, foi testado o ajuste do pH a cada dois dias e ajuste diário, com e sem adição do tampão MES à solução. Os genótipos avaliados foram URS Altiva, URS Corona e URS Taura, sob os pHs 4,5, 5,5 e 6,5. Os diferentes caracteres morfológicos do sistema radicial foram medidos através de scanner e software WinRHIZO®. A metodologia mais adequada para manutenção do pH foi através da adição do tampão MES e ajuste diário do pH da solução hidropônica. Ainda assim, as alterações do pH foram se intensificando à medida que ocorreu o crescimento das plantas, com acidificação da solução até em torno do nono ou décimo dia de condução dos experimentos e aumento do pH, em direção à neutralidade, entre o décimo e o décimo quinto dia. Embora, para a maioria dos caracteres avaliados, tenha ocorrido interação entre genótipo e pH, URS Altiva tendeu a apresentar o maior sistema radicial, enquanto que URS Corona e URS Taura apresentaram maior variabilidade fenotípica, de acordo como o pH da solução nutritiva. URS Corona apresentou o sistema radicular menos desenvolvido, para a maioria dos caracteres avaliados, nos três pHs, além de apresentar maior diâmetro médio de raízes, que é uma característica indesejável. O pH ótimo para desenvolvimento do sistema radicial foi o pH 5,5, o qual permitiu melhor distinção entre os genótipos. Enquanto o pH 4,5 foi o mais restritivo, tendendo a aumentar o diâmetro médio das raízes. URS Taura, sob pH 4,5, mostrou-se superior quanto ao comprimento de raízes finas, com diâmetro entre 0 e 0,5 mm. O comprimento total do sistema radicial é formado, quase que inteiramente, pelo comprimento das raízes finas, que, juntamente com o número de forquilhas, são os principais responsáveis em determinar a superfície total de raízes. O crescimento potencial do sistema radicial de plantas jovens de aveia parece que, em parte, é devido à alometria com o crescimento potencial da parte aérea, tanto estatura como biomassa, das plantas adultas, porém há diferenças entre genótipos que não são devidas à essa alometria.

¹ Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (87f.) Setembro, 2021.

MORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE *Avena sativa* L. ROOT SYSTEM SUBMITTED TO DIFFERENT pHs¹

Author: Bianca Oliveira Machado
Adviser: Marcelo Teixeira Pacheco

ABSTRACT

Roots are essential for many plant functions, such as water and nutrients uptake, and anchorage in the soil. The root system morphological traits, in addition of being genetically controlled, vary with the environment, such as hydrogen ion concentration (pH) in the soil, which affects plant root growth and development. This work aimed to morphologically characterize the *Avena sativa* L. root system, grown in hydroponic solution, under different pHs, and to develop adequate methodology for this characterization. In order to maintain the solution pH as close as possible to the target pH, it was tested the adjustment of the solution pH every other day or daily, with and without adding MES buffer to the solution. The evaluated genotypes were URS Altiva, URS Corona and URS Taura, under the pHs 4.5, 5.5 and 6.5. The different morphological traits of the root system were measured using a scanner and WinRHIZO® software. The most adequate methodology for maintaining the pH was through the addition of the MES buffer and daily adjustment of the hydroponic solution pH. Even so, the changes in pH were intensified as the plants grew, with acidification of the solution until around the ninth or tenth day of conducting the experiments and an increase in pH, towards neutrality, between the tenth and the fifteenth day. Although, for most of the characters evaluated, there was interaction between genotype and pH, URS Altiva tended to present the largest root system, while URS Corona and URS Taura presented greater phenotypic variability, according to the pH of the nutrient solution. URS Corona tended to present a less developed root system, for most of the evaluated characters, in the three pHs, in addition to presenting larger average root diameter, which is an undesirable trait. The optimum pH for the development of the root system was pH 5.5, which allowed a better distinction between the genotypes. While the pH 4.5 was the most restrictive, tending to increase the average diameter of the roots. URS Taura, under pH 4.5, was superior in terms of the length of thin roots, with a diameter between 0 and 0.5 mm. The total length of the root system is formed almost entirely by the thin roots length, which, together with the number of forks, are mainly responsible for determining the total root surface. Potential growth of the root system of young oat plants appears to be due in part to allometry with above ground potential growth, both height and biomass, of adult plants, but there are differences between genotypes that are not due to this allometry.

¹ Master Dissertation in Plant Science, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (87p.) September, 2021.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Hipóteses	2
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo geral	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1. A cultura da aveia.....	2
2.2. Sistema radicial	6
2.3. Efeito do pH sobre o crescimento e desenvolvimento radicial	9
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
3.1 Material vegetal.....	13
3.2 Preparo das sementes.....	13
3.3 Condições de crescimento.....	14
3.4 Condução dos experimentos	14
3.5 Análises morfológicas	17
3.6 Análise estatística.....	17
4 RESULTADOS.....	14
4.1. Alterações ocorridas no pH da solução nutritiva	14
4.2 Caracterização morfológica das raízes em solução nutritiva com tampão MES e com ajuste de pH diário	31
4.3 Associação entre os caracteres morfológicos radiciais.....	42
5 DISCUSSÃO	21
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
7 REFERÊNCIAS	56
8 APÊNDICES.....	63

RELAÇÃO DE QUADROS

	Página
1. Genealogia dos genótipos utilizados no estudo.....	13
2. Resumo das diferenças na condução dos cinco experimentos	15

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Principais características da morfologia da raiz	6
2. Representação esquemática da arquitetura do sistema radicial típico de monocotiledôneas, exemplificado pelo arroz, em plântulas com 7 e 14 dias após emergência	8
3. Disponibilidade dos nutrientes: Ferro, Cobre, Manganês, Zinco, Molibdênio, Cloro, Fósforo, Nitrogênio, Enxofre, Boro, Potássio, Cálcio, Magnésio e Alumínio, em diferentes pHs do solo	11
4. Valores mínimos, médias e valores máximos do pH da solução nutritiva onde foram avaliados os genótipos de aveia. A e B: experimentos 1 e 2, respectivamente, sem uso do tampão MES e com ajuste do pH a cada dois dias. C: experimento 3, sem uso do tampão MES e com ajuste diário do pH. D e E: experimentos 4 e 5, respectivamente, com uso do tampão MES e com ajuste diário do pH. Barras representam o desvio padrão.....	22
5. Diferenças nas médias do pH da solução nutritiva em valores absolutos, relativo ao pH alvo, onde foram avaliados os genótipos de aveia. A e B: experimentos 1 e 2, respectivamente, sem uso do tampão MES e com ajuste do pH a cada dois dias. C: experimento 3, sem uso do tampão MES e com ajuste diário do pH. D e E: experimentos 4 e 5, respectivamente, com uso do tampão MES e com ajuste diário do pH. Barras representam o desvio padrão.....	23
6. Diferença de pH da solução nutritiva, em porcentagem, relativo ao pH alvo, onde foram avaliados os genótipos de aveia. A e B: experimentos 1 e 2, respectivamente, sem uso do tampão MES e com ajuste do pH a cada dois dias. C: experimento 3, sem uso do tampão MES e com ajuste diário do pH. D e E: experimentos 4 e 5, respectivamente, com uso do tampão MES e com ajuste diário do pH. Barras representam o desvio padrão.....	26
7. Valor do pH medido imediatamente antes e após o ajuste para o pH alvo da solução nutritiva, onde foram avaliados os genótipos de aveia, no experimento 1, sem uso do tampão MES e com ajuste do pH a cada dois dias. Seta indica troca da solução nutritiva	27

8. Valor do pH medido imediatamente antes e após o ajuste para o pH alvo da solução nutritiva, onde foram avaliados os genótipos de aveia, no experimento 2, sem uso do tampão MES e com ajuste do pH a cada dois dias. Seta indica troca da solução nutritiva 28
9. Valor do pH medido imediatamente antes e após o ajuste para o pH alvo da solução nutritiva, onde foram avaliados os genótipos de aveia, no experimento 3, sem uso do tampão MES e com ajuste diário do pH. Seta indica troca da solução nutritiva 29
10. Valor do pH medido imediatamente antes e após o ajuste para o pH alvo da solução nutritiva, onde foram avaliados os genótipos de aveia, no experimento 4, realizado com uso do tampão MES e ajuste diário do pH. Seta indica troca da solução nutritiva 30
11. Valor do pH medido imediatamente antes e após o ajuste para o pH alvo da solução nutritiva, onde foram avaliados os genótipos de aveia, no experimento 4, realizado com uso do tampão MES e ajuste diário do pH. Seta indica troca da solução nutritiva 31
12. Comprimento total de raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH..... 32
13. Área de raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH..... 33
14. Diâmetro médio de raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH..... 34
15. Volume de raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH..... 35

16. Número de ápices radiciais em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH..... 36
17. Número de forquilhas radiciais em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH..... 37
18. Comprimento total de raízes com diâmetro entre 0 e 0,5mm em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH..... 38
19. Comprimento total de raízes com diâmetro entre 0,5 e 1,0mm em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos, dentro de cada pH 39
20. Comprimento de raízes com diâmetro entre 1,0 e 1,5mm em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, dentro de pH e de genótipo 40
21. Massa seca raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH..... 41
22. Massa seca parte aérea em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, dentro de pH e de genótipo 42
23. Associação entre as variáveis morfológicas do sistema radicial, envolvendo os genótipos de aveia branca URS Altiva, URS Corona e URS Taura, submetidos aos pHs 4,5, 5,5 e 6,5, em solução nutritiva, com o uso de tampão MES e ajuste diário do pH 44

24. Associação entre as variáveis morfológicas do sistema radicial, envolvendo os genótipos de aveia branca URS Altiva, URS Corona e URS Taura, submetidos aos pHs 4,5, 5,5 e 6,5, em solução nutritiva, com o uso de tampão MES e ajuste diário do pH 45

1. INTRODUÇÃO

A aveia (*Avena sativa* L.) destaca-se como cultivo de inverno no sul do Brasil. Essa cultura é considerada uma excelente alternativa de diversificação e contribui para a efetividade econômica do sistema produtivo. Entre seus usos encontra-se a alimentação humana, pelo elevado valor nutritivo, e na alimentação animal, na forma de pastejo direto, grãos e silagem. Além disso, integra o sistema de rotação e sucessão de culturas permitindo o estabelecimento e manutenção do sistema plantio direto.

Os programas de melhoramento de aveia branca têm sido intensificados com o objetivo de lançar novos genótipos, com diferentes características agronômicas, que reflitam na produção de grãos, possibilitando maior resposta de rendimento e de qualidade industrial. Entretanto, os programas de melhoramento, historicamente, não têm explorado as raízes como critério de seleção para atingir essas finalidades. Esse fato pode ser explicado em função da dificuldade de seu estudo, tendo em vista que o desenvolvimento das raízes ocorre no solo, o que dificulta observações diretas. Dessa forma, busca-se o desenvolvimento de métodos mais práticos, de menor custo, que possibilitem avaliações rápidas e não destrutivas ao sistema radicular.

A aveia apresenta um sistema radicular fibroso e fasciculado, com raízes seminais e adventícias, sendo que as adventícias constituem a maior parte do sistema radicular. A função das raízes de aveia não é restrita à absorção de água e nutrientes, pois sabe-se que este órgão, pode também reduzir o nitrato, sintetizar aminoácidos e agir como fonte de hormônios de crescimento para a parte aérea.

Fatores genéticos determinam a grande variação na morfologia do sistema radicular, entretanto fatores ambientais também atuam e a planta

necessita se aclimatar para que o solo seja explorado de forma eficiente, na aquisição de água e nutrientes.

Genótipos eficientes podem aumentar a capacidade de exploração do solo por alterações na arquitetura do sistema radicial, aumentando assim o acesso a nutrientes com baixa mobilidade no solo, e da conversão de nutrientes em estado não utilizável em absorvível, por meio da exsudação de compostos orgânicos ou da associação com microrganismos simbióticos. Além disso, o solo apresenta distribuição variável de nutrientes, além de gradientes de temperatura, teor de oxigênio, disponibilidade de água, pH e densidade, que podem ocorrer em escala de centímetros com relação à profundidade do solo.

O potencial hidrogeniônico (pH) é uma das propriedades essenciais do solo, devido à sua influência em muitas outras propriedades e processos que afetam o crescimento das plantas. O pH afeta diretamente as raízes, principalmente, por alterar a disponibilidade dos nutrientes para as plantas. O maior fator limitante em solos ácidos está associado à presença de alumínio tóxico, já que a cultura é moderadamente sensível aos danos causados por esse elemento. Além disso, a aveia também não tolera solos salinos, assim como o trigo e a cevada. A cultura da aveia branca tolera solos ácidos, até 4,5 de pH, e solos alcalinos, de até aproximadamente 8,5 de pH, porém, seu desenvolvimento ótimo está na faixa de pH entre 5,0 e 6,0.

Sabendo-se disso, busca-se compreender quais as implicações na morfologia do sistema radicial de aveia branca ao submetê-la a diferentes pHs.

4.1 Hipóteses

- A aveia branca altera a morfologia do sistema radicial em resposta aos diferentes pHs testados.
- Os genótipos URS Altiva, URS Corona e URS Taura apresentam características morfológicas diferentes quando submetidos ao mesmo pH.
- O pH 4,5 afeta negativamente as características morfológicas das raízes.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver metodologia adequada para o estudo morfológico de raízes de *Avena sativa* L. em solução hidropônica e caracterizar morfológicamente o sistema radicial da espécie crescido sob diferentes pHs.

1.2.2 Objetivos específicos

- Elaborar e avaliar metodologia adequada para o ajuste e manutenção do pH da solução hidropônica.
- Determinar a morfologia das raízes em genótipos de aveia branca crescidos em solução hidropônica sob diferentes pHs.
- Caracterizar os efeitos dos diferentes pHs nos caracteres morfológicos: comprimento total das raízes, área superficial das raízes, diâmetro médio das raízes, volume das raízes, quantidade de ápices do sistema radicial, quantidade de forquilhas do sistema radicial, comprimento de raízes com diâmetro entre 0 e 0,5mm, comprimento de raízes com diâmetro entre 0,5 e 1mm, comprimento de raízes com diâmetro entre 1 e 1,5mm, massa seca da parte aérea e massa seca das raízes.
- Verificar se o efeito do pH sobre os caracteres morfológicos avaliados varia entre genótipos.
- Conhecer a associação entre os caracteres morfológicos avaliados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A cultura da aveia

As espécies do gênero *Avena* L., pertencem à família *Poaceae*, subfamília *Poideae*, tribo *Aveneae*. É um gênero de plantas anuais, com autofecundação, nas quais a antese ocorre antes da abertura da flor (Barbieri, 2008).

Os genomas das espécies *Avena* L. formam uma série distinta de poliploides, ocorrendo em três níveis de ploidia, diploides $2n=2x=14$, tetraploides $2n=4x=28$ e hexaploides $2n=6x=42$ (Tavares *et al.*, 1993). As espécies diploides apresentam os genomas AA ou CC, enquanto as tetraploides podem conter os genomas AABB ou AACC e as hexaploides possuem o genoma AACCCDD (Loskutov *et al.* 2011).

O provável centro de origem do gênero *Avena* L. localiza-se na parte ocidental da região do Mediterrâneo, na região das montanhas Atlas, costa noroeste da África, e oeste dos Pireneus, onde se concentra a maior diversidade das espécies diploides. A partir dessa região a aveia moveu-se em direção à leste (Loskutov, 2008). A partir disso, o geneticista russo Nikolai Vavilov concluiu que a migração da aveia para a Europa, foi determinada principalmente pela disseminação da cultura do trigo (Barbieri, 2008). O avanço em direção a ambientes mais frios e úmidos fez com que as culturas até o momento utilizadas, como o trigo e a cevada, se tornassem progressivamente menos adaptadas, propiciando o desenvolvimento da aveia (Tavares *et al.*, 1993). É provável que a *A. sativa* tenha sido originada na região da Anatólia Oriental (Turquia), a partir da espécie silvestre *A. sterilis* (Zhou *et al.*, 1999). Presume-se que as espécies com três genomas A, C e D sofreram hibridação espontânea gerando um grande grupo de espécies, incluindo a *A. sativa*, sendo que a *Avena sterilis* é considerada a espécie geneticamente mais próxima (Loskutov, 2008).

A aveia branca (*A. sativa*) é classificada como uma espécie hexaploide (Rajhathy, 1966) e considerada um aloploiploide natural combinando três genomas diploides distintos (Ansari & Thomas, 1983). É composta pelo genoma AACCCDD, com número cromossômico $2n=42$ (Rajhathy & Morrison, 1960). É uma espécie diploidizada, formando 21 bivalentes na meiose (Chen & Armstrong, 1994).

A época de introdução da aveia no Brasil não está determinada, entretanto existe registro de cultivo de aveia desde o século XV (De Mori *et al.*, 2012). As cultivares de aveia branca, até o início da década de 1980, eram provenientes da Argentina e do Uruguai, sendo que no Sul do Brasil, essas cultivares apresentavam problemas de adaptação ao ambiente de cultivo, principalmente em relação ao ciclo tardio e à estatura elevada (Barbieri, 2008). Em meados da década de 1970, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a Universidade de Passo Fundo (UPF) iniciaram programas de melhoramento genético. No início da década de 1980, foram lançadas as primeiras cultivares brasileiras de aveia branca, oriundas dos programas de melhoramento citados acima (Barbosa Neto *et al.*, 2000).

Atualmente, o Brasil encontra-se em 7º lugar na produção mundial de aveia com aproximadamente 900 mil toneladas em uma área de 400 mil hectares, representando 4 % da produção e área mundial (USDA, 2021).

De acordo com os dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021) para a safra 2020, a aveia ocupa oitavo lugar em área de cultivo e em produção de grãos no Brasil, com uma área plantada de 425,7 mil hectares, sendo 89 % no Sul do Brasil, com o Rio Grande do Sul (RS) respondendo a 78 % do total. A aveia representa 11 % da produção de grãos das culturas de inverno, abaixo somente do trigo. No Brasil, a produção total foi de 845,7 mil toneladas em 2020, com o Sul do país sendo responsável por 90 % da mesma, enquanto o RS respondeu por 69 % da produção brasileira em 2020 (CONAB, 2021).

A aveia branca possui características que se adaptam bem em diferentes tipos de solo. A cultura tolera solos ácidos até o pH 4,5 e solos alcalinos com pH 8,5, porém, seu desenvolvimento ótimo se dá com pH entre 5,0 e 6,0 (Castro *et al.*, 2012). Porém, as raízes em crescimento são submetidas a diversas alterações morfológicas que influenciam sua atividade e processos de absorção

de nutrientes. Portanto, é necessário obter informações da estrutura das raízes em diferentes solos e sob várias condições, incluindo em diferentes pHs para que a arquitetura do sistema radicial seja explorada de forma eficiente (SMIT *et al.*, 2000).

2.2. Sistema radicial

O sistema radicial permite a ancoragem da planta, já que é adaptado a crescer através do solo, e tem como função principal a absorção de água e macro e micronutrientes essenciais presentes no solo. Além disso, participa de funções secundárias, como síntese de fitohormônios, formação de simbiose com outros organismos na rizosfera, atuação como órgão de estocagem, entre outras (Khan *et al.*, 2016).

As raízes finas, com diâmetro menor que 2mm, desempenham papel importante na absorção de água e de nutrientes para o crescimento e o desenvolvimento das plantas (McCormack *et al.*, 2015). As raízes com diâmetro maior que 2mm estão ligadas ao suporte e à ancoragem da planta e absorvem pequenas quantidades de água e nutrientes (Wilcox *et al.*, 2004).

A organização anatômica dos eixos da raiz varia entre as espécies de plantas, mas segue um padrão geral, conforme mostrado na Figura 1 (Lynch *et al.*, 2012).

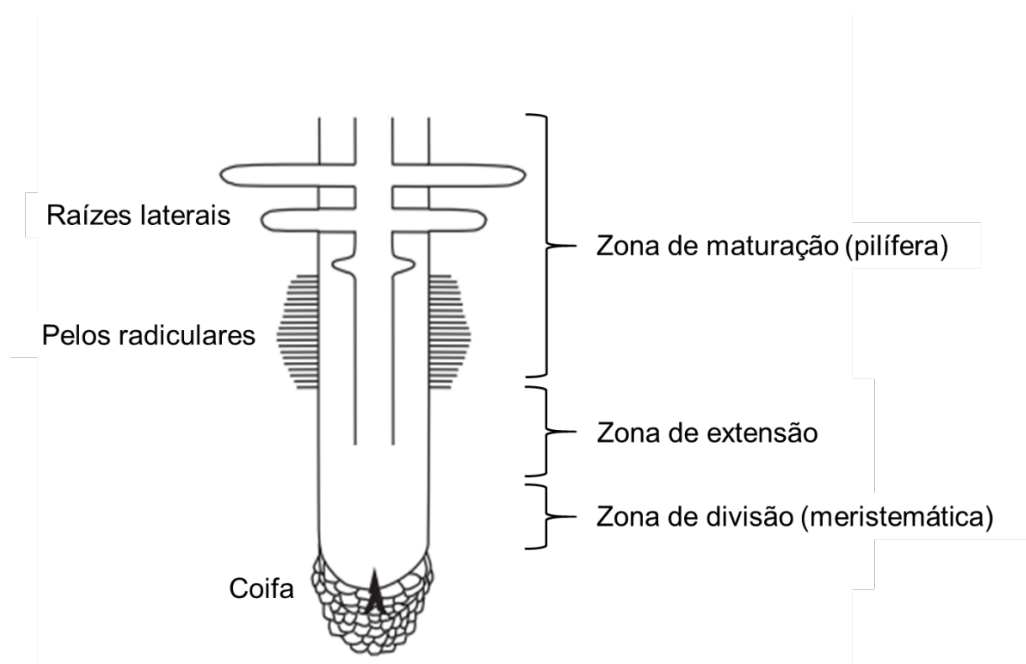


FIGURA 1. Principais características da morfologia da raiz. Lynch *et al.* (2012)

O crescimento da raiz é organizado em torno de regiões com atividade meristemática: zona de divisão (meristemática), zona de extensão e zona de maturação (Lynch *et al.*, 2012).

O crescimento primário ocorre na região apical, na zona de divisão. O meristema apical da raiz sustenta o crescimento e o desenvolvimento contínuo da raiz. Na ponta do meristema da raiz, células meristemáticas multipotentes circundam um grupo pequeno de células organizadas, chamado centro quiescente (CQ), o qual mantém as células meristemáticas fornecendo sinais não autônomos de curto alcance que inibem a diferenciação (Perilli *et al.*, 2012). A coifa é a estrutura responsável por proteger o meristema apical da raiz, sendo a primeira estrutura da planta a se deparar com as condições ambientais que mais tarde envolverá a raiz madura. Portanto, além de ter a capacidade de facilitar a penetração da raiz no solo pela produção de mucilagem, ela tem a capacidade de perceber estímulos do ambiente e desencadear diferentes tropismos na própria raiz, controlando a orientação do crescimento em direção ou para longe de diversos sinais ambientais (Kumpf & Nowack, 2015). A zona meristemática e a zona de extensão, juntas compõem uma porção crescente da raiz, assim conforme as raízes crescem, novas células são adicionadas na região de divisão e a extensão subsequente dessas células direciona a ponta da raiz para longe do caule (Dubrovsky & Laskowski, 2017). A região de extensão é seguida pela zona de maturação, onde a maioria das células dos tecidos primários completa a sua maturação. Os pelos radiciais também são produzidos nessa região, por isso esse local é chamado também de zona pilífera (Raven *et al.*, 2014). Os pelos radiciais são extensões das células da epiderme que aumentam significativamente a área da superfície radicial, proporcionando, assim, maior capacidade para absorção de íons e água do solo (Taiz & Zeiger, 2004).

É importante observar que há uma transição gradual entre uma região da raiz para a outra. As regiões não estão precisamente delimitadas. No mesmo nível da raiz, esses processos se sobrepõem não só nos diferentes tecidos, mas também nas diferentes fileiras de células de uma mesma região (Raven *et al.*, 2014).

A variação da arquitetura do sistema radicial entre diferentes espécies é comum, mas a diferença é pronunciada entre monocotiledôneas e

dicotiledôneas. Nas monocotiledôneas o desenvolvimento radicial começa com a emergência de três a seis eixos radiciais primários (ou seminais) da semente em germinação. À medida que a planta cresce, ela estende novas raízes adventícias, chamadas de raízes nodais ou da coroa. Com o passar do tempo, os eixos radiciais primários e nodais crescem e se ramificam extensamente, formando um complexo sistema radicial fasciculado (Taiz & Zeiger, 2004). Dessa forma, o sistema de raízes das monocotiledôneas geralmente têm muitas partes semelhantes, todas unidas à base do caule e não possui um eixo dominante único (Fitter, 1987).

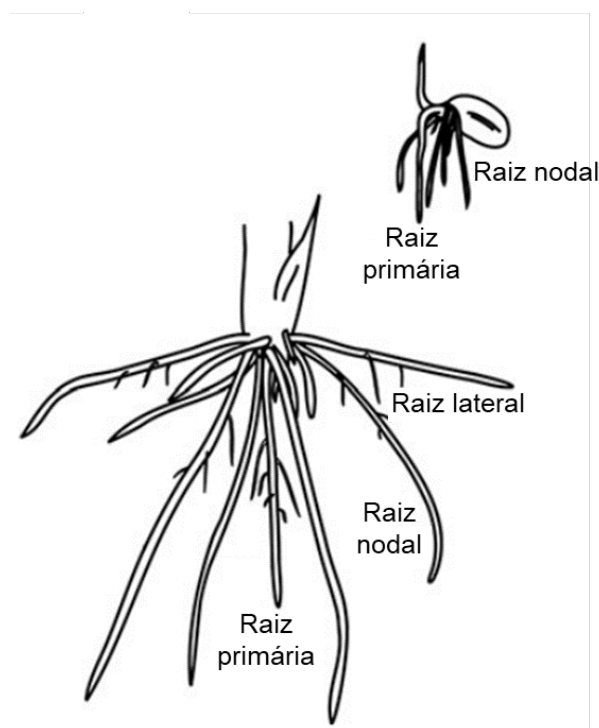


FIGURA 2. Representação esquemática da arquitetura do sistema radicial típico de monocotiledôneas, exemplificado pelo arroz, em plântulas com 7 e 14 dias após emergência (Osmont *et al.*, 2007).

A ampla variação na morfologia ou arquitetura do sistema radicial observada entre as espécies, sugere que fatores genéticos inerentes são determinantes (Osmont *et al.*, 2007). Porém, mesmo plantas geneticamente idênticas podem ter morfologias de sistema radicial muito diferentes, já que o microambiente único altera as respostas à medida que a planta cresce (Deak *et al.*, 2005). Sabendo disso, Malamy (2005) descreveu que os mecanismos que determinam a arquitetura do sistema radicial podem ser divididos em duas grandes categorias. A primeira inclui vias que são essenciais para a

organogênese e para o crescimento, as quais determinam a arquitetura característica da planta. Enquanto a segunda categoria é formada por vias que determinam como as plantas respondem a sinais externos, para modular a categoria anterior. Então, foram denominadas como vias “intrínsecas” e de “resposta”, respectivamente.

A variação genética para características de raiz, entre os genótipos de uma determinada espécie, provavelmente reflete a adaptação a diversos ambientes do solo, porque as características de raiz têm uma forte influência na aquisição de água e nutrientes (Lynch *et al.*, 2012). Por exemplo, genótipos com ângulos de crescimento de raiz mais superficial tem melhor exploração da camada superior do solo e aquisição de P, porque esse nutriente é imóvel e é encontrado principalmente nas camadas superficiais do solo, enquanto genótipos com ângulos de crescimento de raiz mais profundos tem maior exploração do subsolo e, portanto, maior aquisição de água durante a seca. Além disso, o acamamento é um fenômeno complexo resultante de fatores intrínsecos ao genótipo, a características de solo, a condições climáticas e a práticas culturais adotadas (Hawerth *et al.*, 2015). Dentre os mecanismos que interferem no acamamento está a quantidade e a distribuição das raízes, já que estão ligados a capacidade de aderir ao solo.

O padrão de arquitetura de raiz de uma planta é altamente plástico, embora seja geneticamente pré-programado, apresentando estrutura do órgão radicial muito consistente. Essa plasticidade permite que a arquitetura da raiz responda ao ambiente do solo, alterando os padrões de crescimento e ramificação, como, por exemplo, o tamanho, a forma, o número e o crescimento das raízes em direção a nutrientes, evitando condições desfavoráveis (Deak & Malamy, 2005).

A habilidade das plantas em obter água e nutrientes minerais do solo está relacionada à sua capacidade de desenvolver um extenso sistema radicial. A proliferação das mesmas, no entanto, depende das condições ambientais externas, como umidade do solo, nutrientes, temperatura, pH e comunidades microbianas (BAO *et al.*, 2014).

2.3. Efeito do pH sobre o crescimento e desenvolvimento radicial

A concentração de íons de hidrogênio (pH) é uma propriedade importante dos solos, pois interfere no crescimento das raízes das plantas e dos microrganismos do solo. Além disso, o pH do solo é muitas vezes uma propriedade altamente mutável por causa da natureza dinâmica de vários processos do solo e das interações desses processos com plantas e microrganismos (ADAMS, 1984).

A escala de pH varia de 0 a 14. A acidez ou alcalinidade de cada solução de água ou mistura de solo e água é determinada por seu conteúdo de íons hidrogênio e íons hidroxila. A solução é considerada ácida quando há mais íons hidrogênio do que íons hidroxila ($\text{pH} < 7$), já se houver mais íons hidroxila do que íons hidrogênio a solução é alcalina ($\text{pH} > 7$) e, por fim, as soluções com números iguais de íons hidrogênio e hidroxila são chamadas de neutras ($\text{pH} = 7$). Além disso, a escala de pH é baseada em logaritmos, ou seja, uma solução de pH 4 tem 10 vezes mais íons de hidrogênio do que uma com pH 5 e 100 vezes a concentração de íons de hidrogênio do que uma solução com pH 6 (Allaway, 1957).

O pH do solo é considerado a variável principal da química do solo, devido ao seu profundo impacto em inúmeras reações químicas envolvendo nutrientes essenciais para as plantas e elementos fitotóxicos. De forma direta ou indireta, o pH influencia a solubilidade desses elementos, determinando sua disponibilidade e mobilidade biológica (Penn & Camberato, 2019).

Como observado na Figura 3, em solos ácidos a disponibilidade dos principais nutrientes vegetais nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, cálcio, magnésio e molibdênio é reduzida e pode ser insuficiente. Enquanto, íons como ferro, manganês, cobre, zinco e alumínio podem ser encontrados na forma dissolvida em quantidades suficientes para se tornarem tóxicos para as plantas.

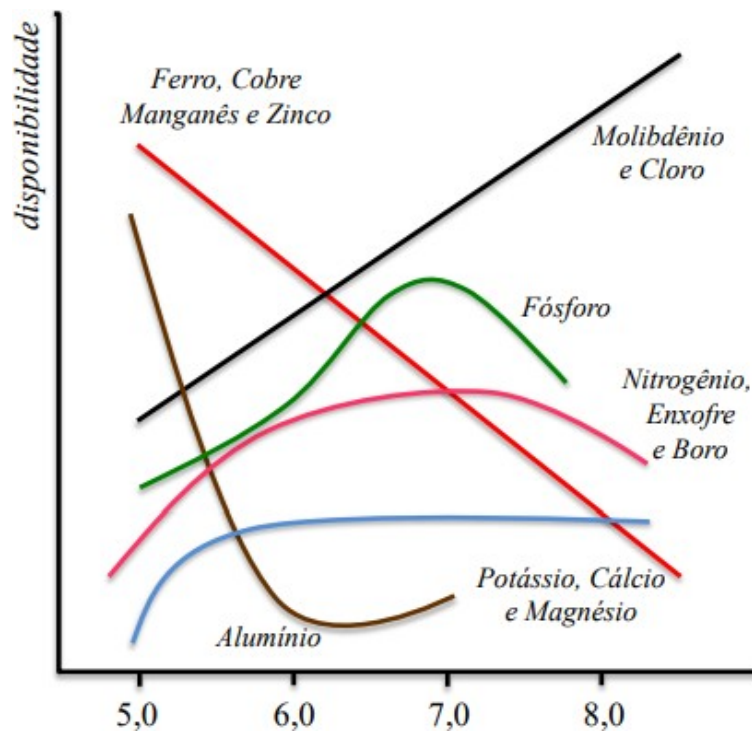


FIGURA 3. Disponibilidade dos nutrientes: Ferro, Cobre, Manganês, Zinco, Molibdênio, Cloro, Fósforo, Nitrogênio, Enxofre, Boro, Potássio, Cálcio, Magnésio e Alumínio, em diferentes pHs do solo. (Cotta,2016).

A mobilidade dos nutrientes no solo é um dos fatores mais importantes nas relações de fertilidade do solo. O termo mobilidade significa o processo geral pelo qual os íons nutrientes atingem as superfícies das raízes de absorção, tornando assim possível sua sorção na planta. Um processo correlato é o crescimento das raízes e a extensão das superfícies das raízes absorventes em áreas onde ocorrem os nutrientes (Bray, 1953).

O crescimento das raízes é geralmente favorecido em solos ligeiramente ácidos, com valores de pH entre 5,5 e 6,5. Nesse intervalo de pH, os microrganismos do solo são mais ativos e os nutrientes das plantas estão prontamente disponíveis (Ördög, 2011).

As duas toxicidades mais importantes em solos ácidos são as de alumínio (Al) e manganês (Mn). A presença do Al reduz o crescimento e o desenvolvimento das raízes e diminui a absorção de nutrientes, o que é desfavorável (Miguel *et al.*, 2010).

Em solos ácidos, além dos nutrientes poderem estar quimicamente menos disponíveis para as plantas, também podem estar em posições de difícil acesso devido ao crescimento menor das raízes nesse ambiente. O pH baixo reduz a

biomassa, e o comprimento das raízes, a formação dos pelos radiciais, entre outros (Baligar *et al.*, 1998). Quando o crescimento da raiz é restrito, as plantas são incapazes de explorar um volume de solo suficiente para compensar a disponibilidade reduzida dos elementos (Cotta, 2016).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi composto por cinco experimentos realizados na sala de crescimento do Laboratório de Biotecnologia do Departamento de Plantas de Lavoura, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), localizada no município de Porto Alegre.

3.1 Material vegetal

O material vegetal utilizado foram três cultivares de aveia branca desenvolvidas pelo Programa de Melhoramento Genético de Aveia da UFRGS. Os genótipos e suas respectivas genealogias estão descritos no Quadro 1.

Os genótipos foram escolhidos baseado em características morfofisiológicas observadas a campo, como estatura de planta, resistência ao acamamento, hábito de crescimento, ciclo, biomassa e potencial de rendimento de grãos, que podem indicar sistemas radiciais contrastantes.

QUADRO 1. Genealogia dos genótipos utilizados no estudo.

Genótipo	Genealogia
URS Altiva	UFRGS 995090-2 / URS 21
URS Corona	UFRGS 987016-1 / UFRGS 970497-1
URS Taura	UFRGS 970216-2 (F _{3:4}) / UFRGS 970461 (F _{7:8})

3.2 Preparo das sementes

Na etapa de germinação, as sementes foram selecionadas de acordo com o tamanho e seu enchimento, evitando-se semente pequenas e/ou mal enchidas, a fim de que as diferenças de reserva fossem minimizadas, para reduzir as diferenças de crescimento inicial das plântulas. Após, foram distribuídas uniformemente sobre o papel germinador umedecido com água destilada. As

sementes não receberam nenhum tratamento desinfetante e foram germinadas com a presença de casca.

Para o processo de germinação das sementes foi utilizada uma incubadora por quatro dias, mantendo-se temperatura constante de 25°C e fotoperíodo contínuo de 24 horas de luz. Durante a germinação, as sementes foram constantemente mantidas com elevada disponibilidade de umidade, pela reposição de água destilada no recipiente tipo Becker onde os rolos de papel germinador foram acondicionados. Porém, sem contato direto da água com as sementes.

3.3 Condições de crescimento

Após os quatro dias, por meio da observação do crescimento homogêneo dos coleótilos e das radículas, foram selecionadas as plântulas para serem cultivadas em sistema hidropônico, sob condições controladas de temperatura (21 °C) e fotoperíodo (16 h de luz e 8 h escuro), sob intensidade luminosa de 215 $\mu\text{mol}/\text{cm}^2$, ou seja, aproximadamente 1295×10^{17} partículas de luz (fótons) atingindo uma área de 1 cm^2 .

As plantas foram crescidas sobre uma tela plástica adaptada a tampa de um balde com capacidade para 3L. Cada tela plástica recebeu um genótipo, com 20 sementes distribuídas de forma equidistante. A solução nutritiva no interior de cada balde foi oxigenada através de um sistema de aeração para aquário, a fim de fornecer o oxigênio necessário para o desenvolvimento do sistema radicial.

Foi utilizada a solução nutritiva constituída de macronutrientes e micronutrientes essenciais, adaptada de Nava e colaboradores (2006), com a seguinte concentração de nutrientes: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ – 4 mM, $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ – 2 mM, KNO_3 – 4 mM, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 0,435 mM, KH_2PO_4 – 0,5 mM, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 2 μM , CuSO_4 – 0,3 μM , $\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$ – 0,8 μM , NaCl – 30 μM , $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ – 0,10 μM , H_3BO_3 – 10 μM , FeEDTA – 0,9 μM .

Uma solução estoque foi previamente preparada para cada substância química que compôs a solução nutritiva.

3.4 Condução dos experimentos

Um total de cinco experimentos foram conduzidos para caracterizar o crescimento e desenvolvimento do sistema radicial de aveia em solução hidropônica. Em todos os experimentos, os genótipos de aveia foram avaliados sob três pHs da solução hidropônica, sendo eles: $4,5 \pm 0,04$; $5,5 \pm 0,04$ e $6,5 \pm 0,04$. O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, em esquema fatorial, onde cada planta avaliada representou uma repetição, totalizando 10 plantas avaliadas por tratamento, dentro de bloco. Cada bloco foi alocado em uma prateleira diferente da câmara de crescimento, onde os baldes com a solução nutritiva eram mantidos. Entretanto, entre experimentos, variou-se os genótipos avaliados, o número de blocos e a presença ou ausência de tampão na solução (Quadro 2).

QUADRO 2. Resumo das diferenças na condução dos cinco experimentos.

Experimento	Genótipos	Nº de blocos	Ajuste do pH	Tampão MES
1	URS Altiva, URS Corona, URS Taura	2	A cada 2 dias	Não
2	URS Altiva, URS Corona, URS Taura	2	A cada 2 dias	Não
3	URS Altiva, URS Taura	3	Diário	Não
4	URS Altiva, URS Corona, URS Taura	2	Diário	Sim
5	URS Altiva, URS Corona, URS Taura	2	Diário	Sim

Para o ajuste do pH, quando necessário, foi adicionado hidróxido de potássio (KOH) ou ácido clorídrico (HCl), para seu aumento ou redução, respectivamente.

Inicialmente foram realizados dois experimentos, sendo cada um composto por dois blocos, com o objetivo de avaliar os três genótipos: URS Altiva, URS Corona e URS Taura, nos diferentes pHs. Os dois experimentos totalizaram quatro blocos e 360 unidades experimentais.

Nos experimentos 1 e 2, após as plantas serem transferidas para a solução hidropônica, foi realizado o ajuste do pH da solução a cada dois dias, sendo realizada a troca da solução no sétimo dia. Além disso, foi feita a troca da posição dos baldes dentro de cada bloco (prateleira) a cada cinco dias no primeiro experimento e a cada dois dias no segundo experimento, com a finalidade de reduzir as diferenças microambientais, devido às fontes de luz e de climatização da câmara de crescimento. Das 20 plantas cultivadas por balde de solução hidropônica, dentro de cada bloco e tratamento, foram coletadas 10 plantas no 15º dia para as avaliações do sistema radicial e parte aérea.

Após a análise dos dados dos dois experimentos iniciais, foi percebida a necessidade de um terceiro experimento devido à grande variação do pH no experimento anterior. Os genótipos URS Altiva e URS Taura foram testados com os mesmos pHs ($4,5 \pm 0,04$; $5,5 \pm 0,04$ e $6,5 \pm 0,04$), em três blocos, totalizando 180 unidades experimentais.

No experimento 3, após as plantas serem transferidas para a solução hidropônica, foi realizado o ajuste diário do pH da solução, sendo realizada a troca da solução nutritiva no sétimo dia. Juntamente com o ajuste do pH foi feita a troca da posição dos baldes dentro de cada bloco (prateleira), conforme realizado nos experimentos 1 e 2. Das 20 plantas cultivadas por balde de solução hidropônica, dentro de cada bloco e tratamento, foram coletadas 10 plantas no 15º dia para as avaliações do sistema radicial e parte aérea.

Nos últimos dois experimentos, experimentos 4 e 5, foi incluído na solução nutritiva o tampão ácido 2-(N-morfolino) etanossulfônico monohidratado (MES) na concentração final de 2 mM. Foram utilizados os três genótipos: URS Altiva, URS Corona e URS Taura, nos pHs $4,5 \pm 0,04$; $5,5 \pm 0,04$ e $6,5 \pm 0,04$. Cada um desses experimentos foi composto por duas repetições (blocos), totalizando quatro repetições (blocos) e 360 unidades experimentais, quando considera-se os dois experimentos em conjunto. Após as plantas serem transferidas para a solução hidropônica, foi realizado o ajuste diário do pH da solução, sendo realizada a troca da solução no sétimo dia. Juntamente com o ajuste do pH foi feita a troca da posição dos baldes dentro de cada bloco (prateleira). Das 20 plantas cultivadas por balde de solução hidropônica, dentro de cada bloco e tratamento, foram coletadas 10 plantas no 15º dia.

3.5 Análises morfológicas

Após a coleta das plantas, as raízes foram lavadas em água corrente e separada a parte aérea, na posição da coroa. As raízes foram armazenadas em solução alcoólica 25 % até o momento da análise. A parte aérea de cada planta foi armazenada em um envelope de papel de 11,5 cm x 8 cm, identificando-se cada envelope de forma a saber a qual experimento, tratamento, bloco e planta pertencia, de modo a identificar-se a qual sistema radicial fazia par.

A imagem do sistema radicial de cada planta foi digitalizada com auxílio do scanner modelo STD4800 (EPSON), dispondo-se o sistema radicial em uma bandeja de acrílico (20 cm x 25 cm) com aproximadamente 150 mL de água destilada. A varredura do sistema radicial foi realizada em 600 dpi (*dots per inch* / pontos por polegada) e em escalas de cinza. Logo após a digitalização de cada sistema radicial, os caracteres morfológicos foram medidos pelo software WinRHIZO® Pro 2020^a (REGENT INSTRUMENTS Inc., Canada). Após a obtenção da imagem digitalizada das raízes, o sistema radicial de cada planta foi acondicionado em um envelope de papel de 11,5 cm x 8 cm, identificando-se o experimento, tratamento, bloco e planta.

Os caracteres morfológicos do sistema radicial avaliados pelo WinRHIZO® Pro 2020^a foram: comprimento total (cm), área superficial total (cm²), diâmetro médio (mm), volume total (cm³), quantidade de ápices, quantidade de forquilhas, comprimento total de raízes (cm) com diâmetro entre 0 e 0,5 mm, comprimento total de raízes (cm) com diâmetro entre 0,5 e 1 mm, comprimento total de raízes (cm) com diâmetro entre 1 e 1,5 mm. Além desses, foram determinadas a massa seca da parte aérea (g) e massa seca das raízes (g). Para essas últimas avaliações, os envelopes de papel contendo as raízes e parte aérea de cada planta foram mantidas em estufa com ar forçado, a uma temperatura de aproximadamente 65 °C, durante o período de 48 horas e posteriormente pesadas.

3.6 Análise estatística

Os dados obtidos para cada variável analisada foram avaliados quanto a normalidade dos dados e submetidos à análise de variância (ANOVA), com o auxílio do Pacote Estatístico SAS 8.0 (Statistical Analysis System). Para cada experimento, considerou-se o seguinte modelo da ANOVA:

$$Y_{ijk} = \mu + \rho_i + \gamma(\rho_i)_j + \alpha_k + \beta_l + \alpha_k * \beta_l + \varepsilon_{ijkl}$$

Onde Y_{ijkl} é uma dada variável do experimento, μ é a média geral do experimento, ρ_i é o efeito do i -ésimo bloco, $\gamma(\rho_i)_j$ é o efeito da j -ésima planta dentro i -ésimo bloco, α_k é o efeito do k -ésimo genótipo de aveia, β_l é o efeito do l -ésimo pH, $\alpha_k * \beta_l$ representa a interação entre o k -ésimo genótipo e l -ésimo pH e ε_{ijkl} representa o erro experimental.

As análises estatísticas para os resultados dos experimentos 4 e 5 foram realizadas em conjunto, como um único experimento, utilizando o mesmo modelo da análise da variância apresentado acima. Essa análise conjunta permite aumentar a robustez da análise estatística e permitir a apresentação dos resultados de forma mais concisa. A maior robustez da análise advém do fato que cada tratamento foi avaliado, na análise conjunta, em 40 unidades experimentais (plantas), distribuídas em 4 blocos, em vez de 20 unidades experimentais, na análise individual desses experimentos. O bloqueamento das unidades experimentais nos experimentos 4 e 5, permite controlar, pelo menos em parte, a contribuição de eventuais diferenças ambientais entre os experimentos para a inflação do quadrado médio do erro experimental.

A significância da variância dos fatores principais e interações foi testada, através do *Teste F*, utilizando, no Pacote Estatístico SAS 8.0 (Statistical Analysis System), dentro do procedimento (procedure) "PROC GLM", a declaração (statement) "Random" e a opção "/test", para cada modelo de análise de variância utilizado, a fim do *Teste F* utilizar o resíduo apropriado para cada causa da variação investigada.

A comparação múltipla de médias, dentro de cada fator principal da análise da variância, foi realizada através do teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, utilizando-se, dentro do procedimento "PROC GLM" do Pacote Estatístico SAS 8.0, a opção "/Duncan", na declaração "Means".

Quando, na análise da variância, a interação entre fatores principais foi significativa, a comparação de médias foi realizada duas a duas, através *Teste t* de Student, ao nível de 5 % de probabilidade, através da opção "pdiff adjust=t", na declaração "LSMeans", dentro do procedimento "PROC GLM do Pacote Estatístico SAS 8.0.

Também foi realizada a análise estatística descritiva, sendo determinadas as médias, valores máximos e mínimos, desvio padrão e coeficiente de variação

de cada variável, por pH e genótipo. As associações lineares entre as variáveis analisadas foram realizadas por regressões lineares simples, sendo confeccionados gráficos de dispersão, entre as variáveis submetidas à regressão linear simples, com auxílio do programa computacional Microsoft Office Excel 2016.

4 RESULTADOS

O presente estudo contou com duas etapas principais de investigação: i) descrição das alterações ocorridas no pH da solução nutritiva com o objetivo de ajustar a metodologia; ii) caracterização morfológica das raízes com tampão MES e com ajuste diário do pH.

4.1. Alterações ocorridas no pH da solução nutritiva

Com a finalidade de adequar a metodologia para a manutenção do pH da solução nutritiva mais próximo possível do pH alvo de cada tratamento, as alterações no pH foram medidas em cada tratamento e experimento realizado. As diferenças encontradas, relativo ao pH alvo daquele tratamento, são apresentadas nas Figuras 4, 5 e 6. Tal análise foi possível devido à anotação do pH medido imediatamente antes do ajuste da solução, realizado até a solução alcançar o pH alvo do tratamento, que foi realizado a cada dois dias ou diariamente, de acordo com o experimento.

Na Figura 4 são apresentados os valores mínimos, médias e valores máximos do pH das soluções nutritivas. Para os experimentos sem uso de tampão e ajuste do pH a cada dois dias (Figuras 4A e 4B), percebe-se que a média do pH da solução foi: em torno de 4 para o pH 4,5; entre 4,0 e 4,3, com média geral de 4,1, para o pH 5,5; e entre 5,1 e 5,8, com média geral igual a 5,5 para o pH 6,5. A média do valor mínimo de pH foi: em torno de 3,7 para o pH 4,5; também 3,7 para o pH 5,5; e 4,0 para o pH 6,5. Enquanto que a média do valor máximo de pH da solução foi: cerca de 4,3 para o pH 4,5; 4,7 para o pH 5,5; e 6,5 para o pH 6,5 (Figuras 4A e 4B).

Para o experimento sem uso de tampão e com ajuste diário do pH, apresentado na Figura 4C, observa-se média 4,5 para o pH 4,5, 5,0 para o pH 5,5 e de 6,3 para o pH 6,5, ou seja, já mais próximas do pH alvo, relativo

dois primeiros experimentos, com ajuste do pH a cada dois dias. O valor mínimo foi em torno de 3,7 para o pH 4,5, também 3,7 para o pH 5,5 e 4,3 para o pH 6,5. Indicando, que mesmo com o ajuste diário do pH os valores mínimos observados não apresentaram melhora, relativo aos experimentos com ajuste do pH a cada dois dias. Com o ajuste diário do pH houve piora na manutenção do pH alvo, conforme pode ser percebido através dos valores máximos no experimento, uma vez que se observa a média do valor máximo em 7,2 para o pH 4,5, 7,4 para o pH 5,5 e 7,7 para o pH 6,5 (Figura 4C).

Nos experimentos com uso de tampão e ajuste diário do pH, cujos resultados são apresentados na Figuras 4D e 4E, percebe-se média geral de 4,4 para o pH 4,5, 5,4 para o pH 5,5 e de 6,5 para o pH 6,5. Quanto aos valores mínimos do pH da solução, observou-se que: variaram entre 3,3 e 3,7, com média de 3,6 para o pH 4,5; variaram entre 3,9 e 5,2, com média de 4,5 para o pH 5,5; e variaram entre 6,0 e 6,3, com média de 6,2 para o pH 6,5. Quanto aos valores máximos do pH da solução encontrou-se que: variaram entre 5,5 e 5,8, com média igual a 5,6 para o pH 4,5; variaram de 6,0 a 6,3, com média de 6,1 para o pH 5,5; e variaram entre 7,1 e 7,3, com média de 7,2 para o pH 6,5 (Figura 4D e 4E).

Percebe-se que os desvios padrão variaram entre baixos a muito elevados nos experimentos sem uso de tampão (Figuras 4A, 4B e 4C). Nos experimentos sem uso de tampão e ajuste de pH a cada dois dias, os maiores desvios padrão são observados no pH 6,5, gerando coeficientes de variação entre 10 e 15 %, enquanto os desvios padrão dos tratamentos com pH 4,5 foram os mais baixos, correspondendo à coeficientes de variação entre 4 e 7 % (Figuras 4A e 4B). Já no experimento sem uso de tampão e ajuste diário do pH os desvios padrão foram elevados em todos os pHs, correspondendo a coeficientes de variação entre 24 e 28 % nos tratamentos com pH 4,5 e 5,5, e a coeficientes de variação pouco menores, entre 14 e 16 % no tratamento com pH 6,5 (Figura 4C). Enquanto que nos experimentos com uso de tampão MES e ajuste diário do pH (Figuras 4D e 4E), observa-se que os desvios padrão foram muito menores que no experimentos sem uso de tampão e também com ajuste diário do pH (Figura 4C). Porém, quando se compara os experimentos com o uso de tampão MES e ajuste diário do pH (Figuras 4D e 4E) com os experimentos sem uso de tampão e ajuste do pH a cada dois dias (Figuras 4A e 4B), verifica-

se que tratamentos com pH 4,5 apresentaram maiores desvios padrão, correspondendo a coeficientes de variação entre 12 e 14 %, com uso do tampão (Figuras 4D e 4E).

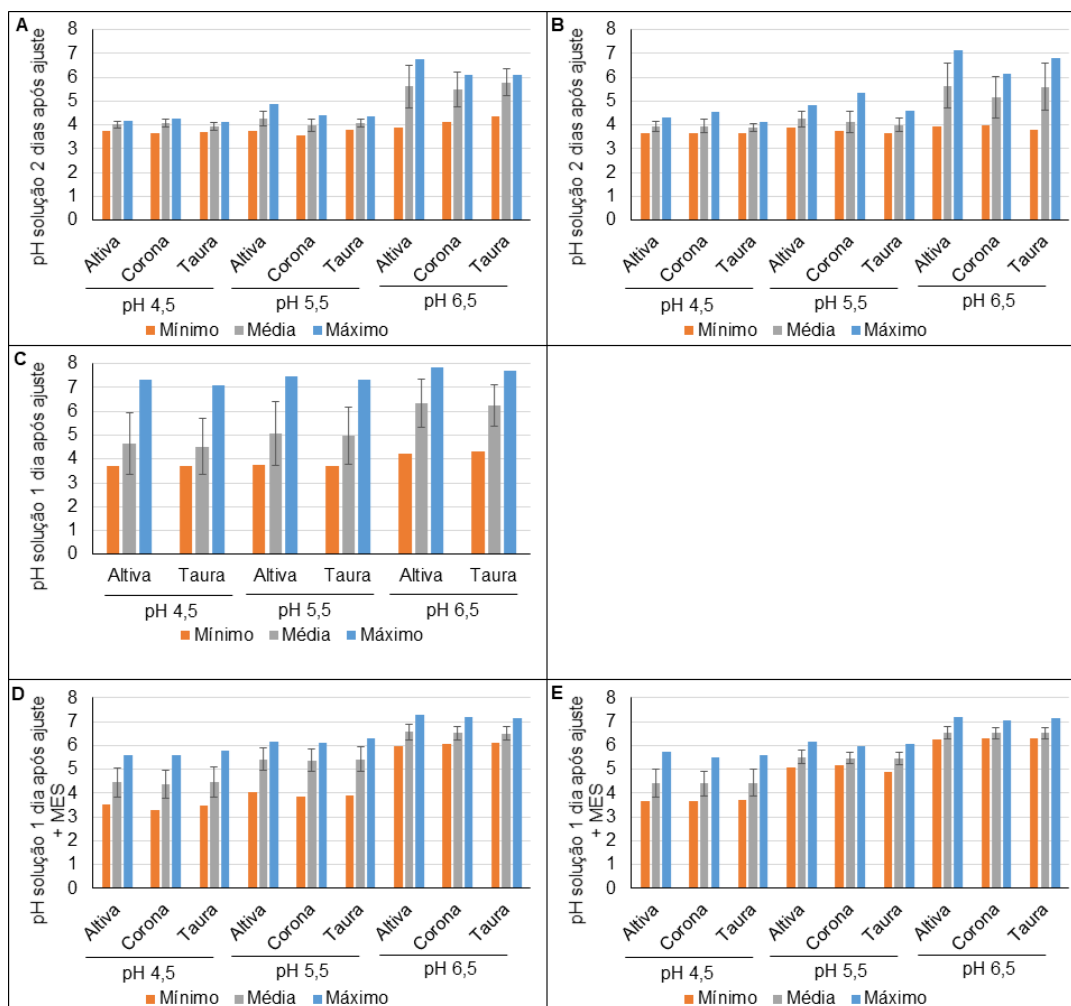


FIGURA 4. Valores mínimos, médias e valores máximos do pH da solução nutritiva onde foram avaliados os genótipos de aveia. A e B: experimentos 1 e 2, respectivamente, sem uso do tampão MES e com ajuste do pH a cada dois dias. C: experimento 3, sem uso do tampão MES e com ajuste diário do pH. D e E: experimentos 4 e 5, respectivamente, com uso do tampão MES e com ajuste diário do pH. Barras representam o desvio padrão.

Na Figura 5 são apresentadas as diferenças das médias do pH da solução nutritiva, relativa ao pH alvo daquele tratamento. Grandes diferenças são observadas nos dois experimentos sem uso de tampão e com ajuste do pH a cada dois dias, as quais foram sempre negativas, ou seja, os pH da solução foram sempre inferiores ao pH alvo, sendo que no pH 5,5 foram observadas as

maiores diferenças, seguido do pH 6,5 (Figuras 5A e 5B). Porém, quando é considerado os desvios padrão das diferenças no pH encontramos que os tratamentos com pH 6,5 resultaram nos maiores desvios padrão, que foram cerca de três vezes superiores aos encontrados nos tratamentos alvo 4,5, que, por sua vez foram similares ou um pouco superiores aos desvios padrão das diferenças de pH medidos nos tratamentos com pH alvo 5,5 nestes dois experimentos (Figuras 5A e 5B).

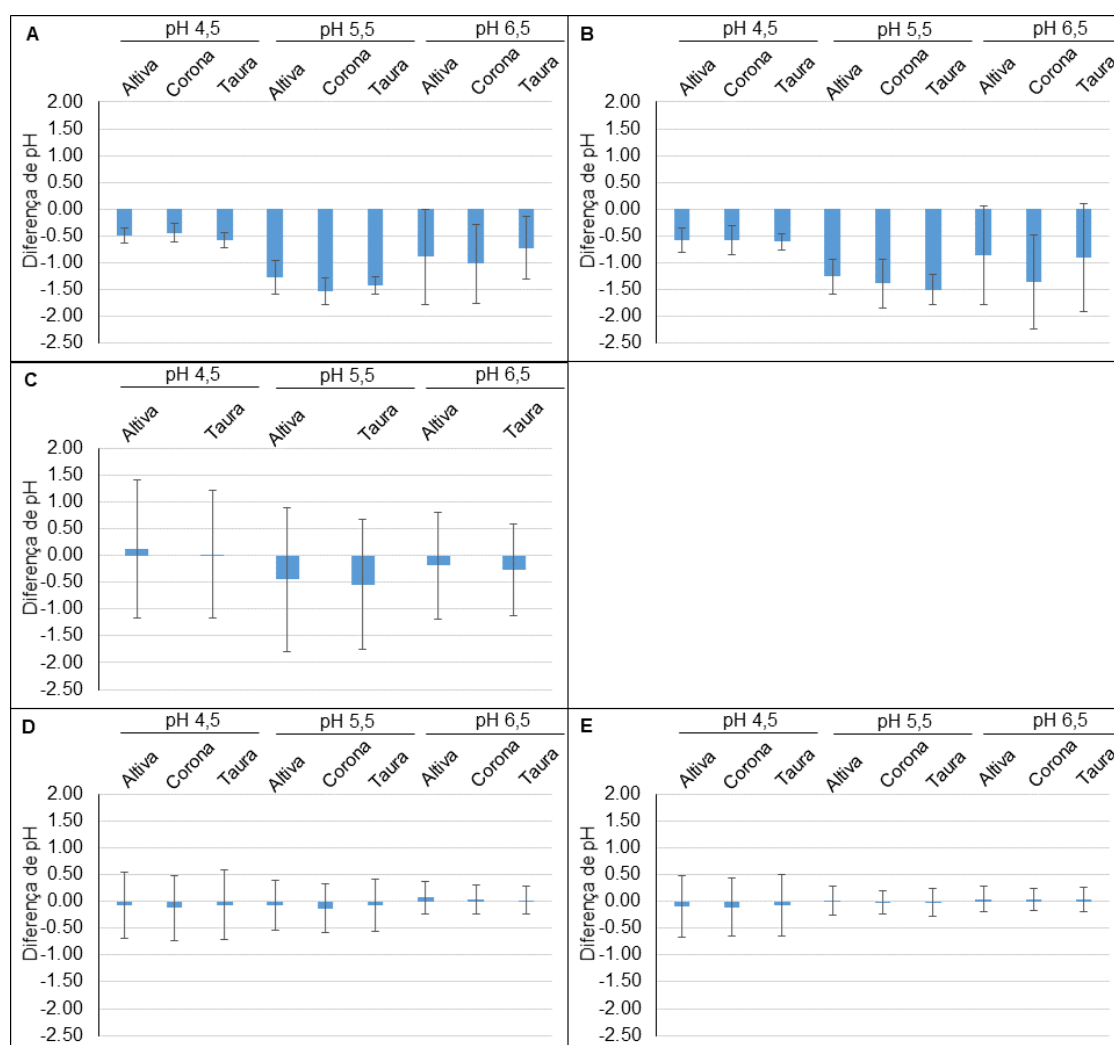


FIGURA 5. Diferenças nas médias do pH da solução nutritiva em valores absolutos, relativo ao pH alvo, onde foram avaliados os genótipos de aveia. A e B: experimentos 1 e 2, respectivamente, sem uso do tampão MES e com ajuste do pH a cada dois dias. C: experimento 3, sem uso do tampão MES e com ajuste diário do pH. D e E: experimentos 4 e 5, respectivamente, com uso do tampão MES e com ajuste diário do pH. Barras representam o desvio padrão.

No experimento sem uso de tampão e com ajuste diário do pH percebe-se que as médias das diferenças entre o pH medido antes do ajuste e o pH alvo foram bastante reduzidas (Figura 5C), relativo aos dois primeiros experimentos, também sem uso de tampão (Figuras 5A e 5B), porém com maiores desvios padrão. Nesse experimento, os desvios padrão das diferenças absolutas no pH da solução, relativo ao pH alvo, foram entre duas a cinco vezes maiores que as suas médias nos tratamentos com pH alvo 5,5 ou 6,5, enquanto no pH alvo 4,5 os desvios padrão das diferenças de pH foram entre 10 vezes (em URS Altiva) a 50 vezes (em URS Taura) maiores que a média das diferenças (Figura 5C).

Nos experimentos com uso de tampão e ajuste diário do pH verificou-se que, na média, as diferenças entre o pH medido antes do ajuste e o pH alvo foram muito pequenas, variando entre apenas 0,2 e 2,7 % do pH alvo. Essas diferenças foram sempre negativas nos pH alvo 4,5 e 5,5 (Figuras 5D e 5E), com exceção do tratamento com URS Altiva e pH 5,5 no experimento 5 (Figura 5E), enquanto as diferenças de pH foram sempre positivas nos tratamentos com pH 6,5 (Figuras 5D e 5E). Nestes dois últimos experimentos, todos os desvios padrão das diferenças do pH foram bastantes elevados, relativos as pequenas diferenças encontradas nos pH antes e após o seu ajuste. Os maiores desvios padrões foram encontrados nos tratamentos com pH alvo 4,5, para o qual o tampão não é indicado, enquanto os menores desvios padrão das diferenças de pH foram observados no pH alvo 6,5 (Figura 5D e 5E), embora o tampão seja indicado para manutenção da solução em pH 5,5. Nota-se que no experimento 4, com uso de tampão, tanto as médias das diferenças de pH, relativo ao pH alvo, quanto os desvios padrão dessas diferenças, medidas no pH alvo 5,5 (Figura 5D) foram similares àquelas observadas no pH alvo 4,5 nos dois experimentos com uso de tampão (Figuras 5D e 5E). Porém, no experimento 5 tanto as médias das diferenças de pH quanto os desvios padrão das diferenças de pH observadas no pH alvo 5,5 foram reduzidas.

As diferenças médias de pH, observadas no momento do ajuste do pH da solução nutritiva, relativo ao pH alvo, assim como os desvios padrão dessas diferenças, são apresentadas em porcentagem na Figura 6, a fim de facilitar a compreensão das magnitudes das alterações observadas no pH. Nos dois experimentos sem uso do tampão MES e com ajuste do pH a cada dois dias (Figuras 6A e 6B), as diferenças encontradas no pH 5,5 variaram de 22 a 27 %,

com média de cerca de 25 %, enquanto as menores diferenças ocorreram no pH 4,5, com alterações médias em torno de 11 a 13 %. O desvio padrão das diferenças variou de 3 a 6 % no pH alvo 4,5, de 3 a 8% no pH alvo 5,5 e de 9 a 15 % no pH alvo 6,5 (Figuras 6A e 6B).

No experimento sem uso tampão e com ajuste diário de pH, apresentado na Figura 6C, já se percebe uma redução nas diferenças percentuais de pH, relativo ao pH alvo, já que o maior valor das diferenças foi em torno de 10 %, a qual ocorreu no pH 5,5. Em contrapartida, o desvio foi maior, variando de 13 a 28 % neste experimento (Figura 6C).

No primeiro experimento com uso do tampão e com ajuste diário do pH (Figura 6D) as diferenças de pH medido e do pH alvo foram pequenas, variando de 0,3 a 2,7 %. Enquanto o desvio padrão apresentou valores em torno de 14 % para o pH 4,5, 9 % para o pH 5,5 e de 4 % para o pH 6,5 (Figura 6D).

No segundo experimento com uso de tampão e com ajuste diário do pH (Figura 6E) verificaram-se diferenças entre 0,2 e 2,3 %. Neste último experimento, o desvio padrão resultou em valores de aproximadamente 12 % para o pH 4,5, 4 % para o pH 5,5 e 3,5 % para o pH 6,5. Portanto, percebe-se redução do desvio padrão das diferenças de pH para os tratamentos que utilizaram o pH 5,5 como pH alvo (Figura 6E).

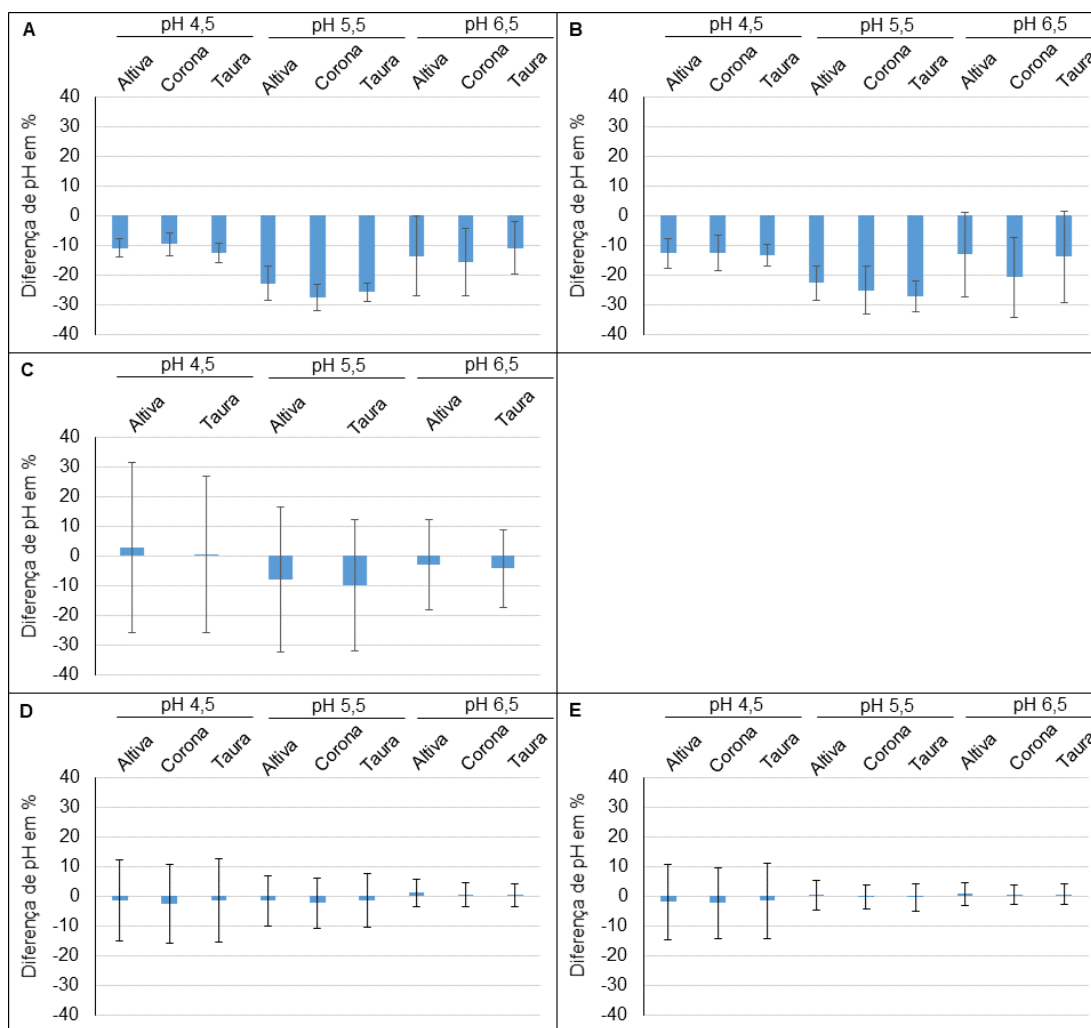


FIGURA 6. Diferença de pH da solução nutritiva, em porcentagem, relativo ao pH alvo, onde foram avaliados os genótipos de aveia. A e B: experimentos 1 e 2, respectivamente, sem uso do tampão MES e com ajuste do pH a cada dois dias. C: experimento 3, sem uso do tampão MES e com ajuste diário do pH. D e E: experimentos 4 e 5, respectivamente, com uso do tampão MES e com ajuste diário do pH. Barras representam o desvio padrão.

A fim de observar as variações de pH ocorridas na solução nutritiva durante a condução dos experimentos, as Figuras 7, 8, 9, 10 e 11 mostram o pH medido imediatamente antes e após o ajuste para o pH alvo de cada tratamento, em cada experimento realizado.

No primeiro experimento realizado sem o uso do tampão e com ajuste do pH a cada dois dias, apresentado na Figura 7, é possível observar que o pH alvo e o pH medido após dois dias do último ajuste apresentam valores distantes. No pH alvo 4,5 a maior queda no pH medido, com valor igual a 3,8 ocorreu no 11º dia, que corresponde a 4 dias após a troca da solução nutritiva no sétimo dia de

condução do experimento, com plantas com sistema radicular bem mais desenvolvido do que 4 dias após o início do experimento. No pH alvo 5,5 observou-se uma queda acentuada no pH medido no 2º, 4º, 9º, 11º e 13º dia, com valores próximos ao pH 4,0. No pH alvo 6,5, os valores entre o pH alvo e o pH medido foram mais contrastantes no 11º dia de condução do experimento, com o valor de pH igual a 4,4 (Figura 7).

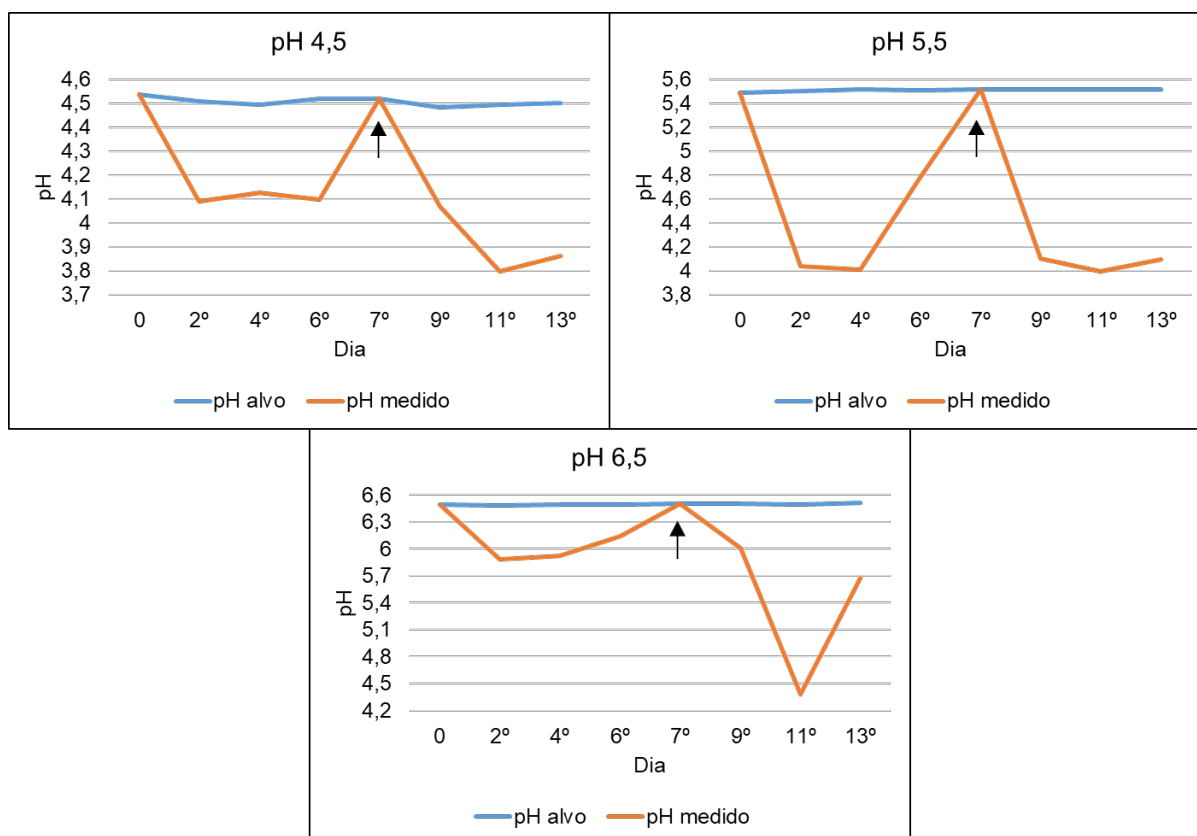


FIGURA 7. Valor do pH medido imediatamente antes e após o ajuste para o pH alvo da solução nutritiva, onde foram avaliados os genótipos de aveia, no experimento 1, sem uso do tampão MES e com ajuste do pH a cada dois dias. Seta indica troca da solução nutritiva.

No segundo experimento realizado sem o uso do tampão e com ajuste do pH a cada dois dias, apresentado na Figura 8, é possível observar que nos três pHs alvos, 4,5, 5,5 e 6,5, ocorreu queda acentuada nos pHs medidos no 4º e 11º dia, sendo que ambos correspondem à quatro dias após iniciar a utilização de solução nutritiva nova. Porém, nos tratamentos com pHs alvo 4,5 e 5,5 os pH medidos antes do ajuste no 13º dia mantinha-se distante do alvo, fato não observado no tratamento com pH alvo 6,5. Além disso, no tratamento com pH alvo 5,5 o pH da solução, medido antes do ajuste, estava cerca 1,5 abaixo do pH

alvo no nono dia de condução do experimento e mantendo-se assim até o 13º dia (Figura 8).

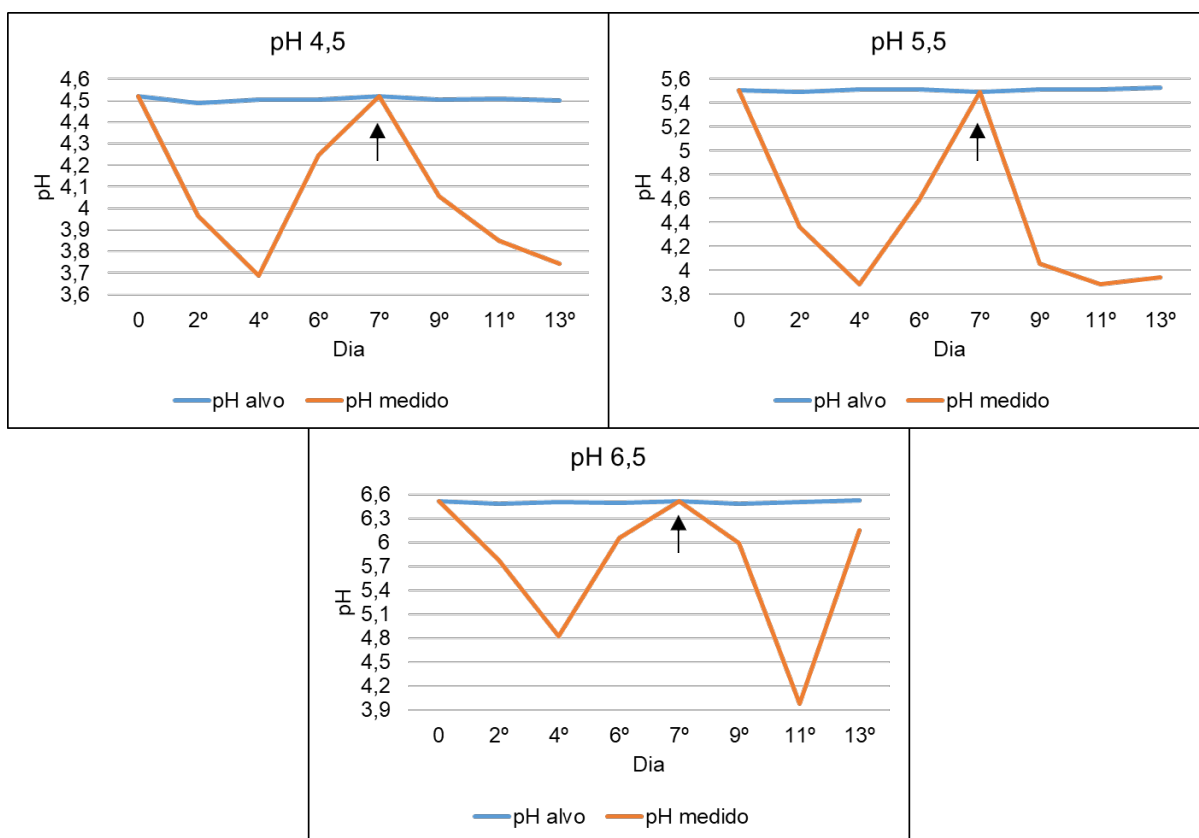


FIGURA 8. Valor do pH medido imediatamente antes e após o ajuste para o pH alvo da solução nutritiva, onde foram avaliados os genótipos de aveia, no experimento 2, sem uso do tampão MES, com ajuste do pH a cada dois dias. Seta indica troca da solução nutritiva.

Na Figura 9 é possível observar que no experimento 3, sem uso do tampão MES, os valores do pH medido um dia após o último ajuste, foram mais próximos ao pH alvo de cada tratamento, especialmente no tratamento com pH alvo 4,5. quando comparado aos experimentos 1 e 2, onde o ajuste do pH era realizado a cada dois dias. Nos tratamentos com pH alvo 5,5 foram observados os pHs mais distantes do pH alvo, com valores próximos ao pH 4,0, ao longo do experimento, enquanto no tratamento com pH alvo 6,5 as maiores diferenças foram observadas no nono e décimo dia, quando o pH da solução estava próximo a 5, ou seja, 1,5 abaixo do pH alvo. Porém, no experimento 3 foram observados pHs, um dia após ajuste, superiores ao pH alvo de cada tratamento mais próximo ao final do experimento, o que não foi observado nos experimentos 1 e 2, também sem uso do tampão MES. Esse aumento no pH, chegando a pHs

próximos ou superiores ao pH 7,0, que é o pH neutro, ocorreu entre o 11º e 12º dia de condução do experimento 3 (Figura 9).

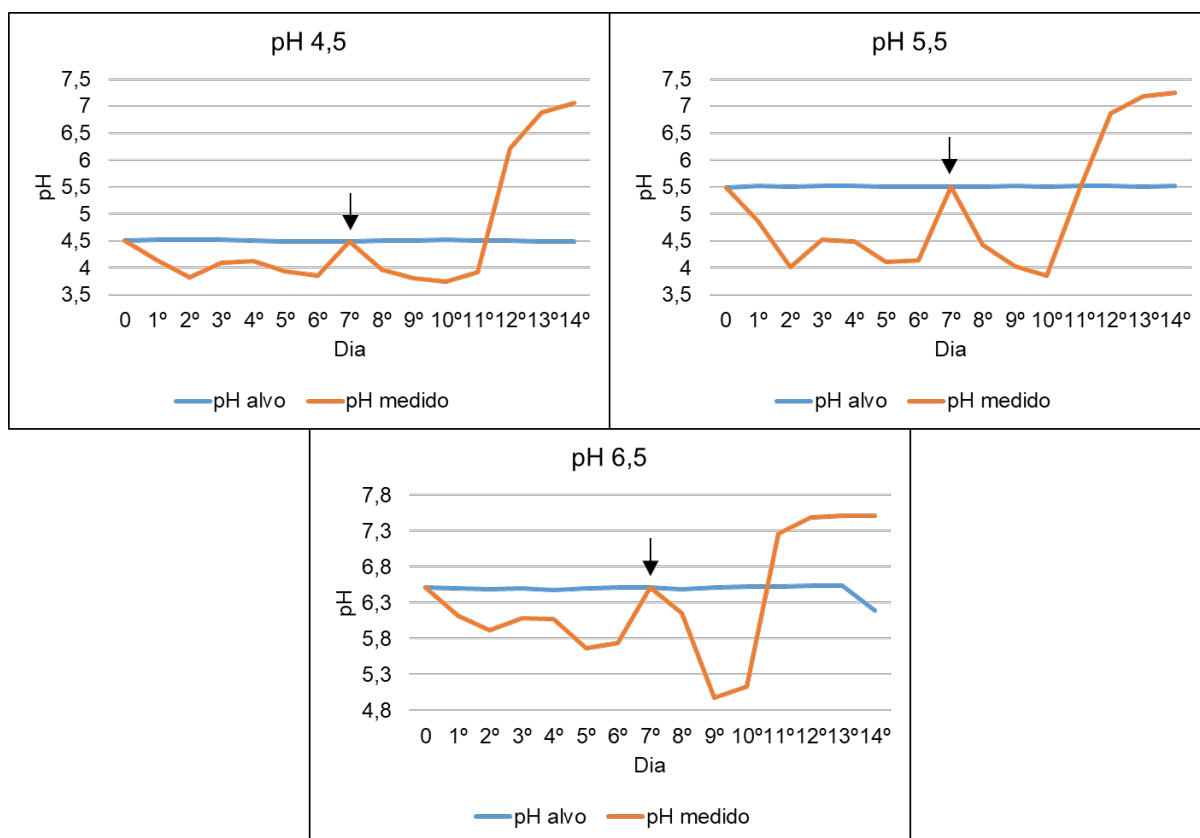


FIGURA 9. Valor do pH medido imediatamente antes e após o ajuste para o pH alvo da solução nutritiva, onde foram avaliados os genótipos de aveia, no experimento 3, sem uso do tampão MES, com ajuste diário do pH. Setas indica troca da solução nutritiva.

No experimento 4, realizado com o uso do tampão MES e ajuste diário do pH, apresentado na Figura 10, foi observado que o pH da solução manteve-se próximo ao pH alvo. Nos três tratamentos do experimento 4 o pH da solução reduziu, relativo ao pH alvo, de modo mais ou menos acentuado, entre o primeiro e o segundo dia de condução do experimento, retornando para próximo do pH alvo a partir do terceiro dia. Mantendo-se assim até próximo ao 11º dia desde o início do experimento, especialmente nos tratamentos com pH alvo 5,5 e 6,5. Assim como no experimento 3, também com ajuste diário do pH, a partir do 11º ou 12º dia de condução do experimento, o pH medido um dia após o último ajuste era superior ao pH alvo do tratamento, porém somente no tratamento com pH alvo 6,5 atingiu pH superior ao pH neutro (Figura 10).

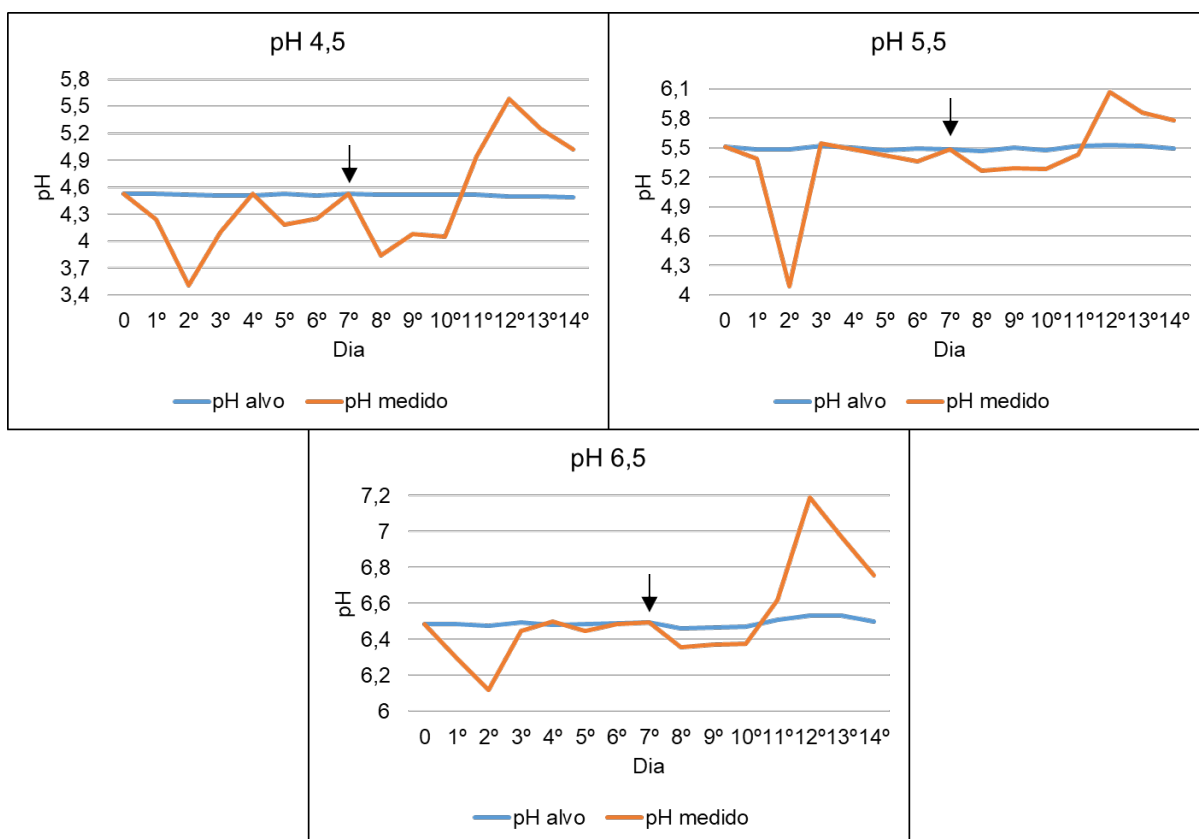


FIGURA 10. Valor do pH medido imediatamente antes e após o ajuste para o pH alvo da solução nutritiva, onde foram avaliados os genótipos de aveia, no experimento 4, realizado com uso do tampão MES e ajuste diário do pH. Seta indica troca da solução nutritiva.

No experimento 5, realizado com uso do tampão MES e ajuste diário do pH, observou-se que não houve queda acentuada do pH entre o primeiro e segundo dia (Figura 11). De modo diferente ao observado no experimento 4, nos três tratamentos, com pHs alvo 4,5, 5,5 e 6,5, ocorreu redução lenta do pH da solução até o sexto dia de condução do experimento, que correspondeu ao último dia antes da troca da solução nutritiva. Porém, essa redução do pH não foi drástica, especialmente nos pHs alvo 5,5 e 6,5, que estão dentro da faixa de pH que o tampão MES tem maior capacidade de tamponamento. Após a troca da solução nutritiva, a redução do pH foi um pouco mais pronunciada, especialmente no tratamento com pH alvo 4,5, mantendo essa tendência até o 10º ou 11º dia de condução do experimento 5. De modo similar aos experimentos 3 e 4, todos com ajuste diário de pH, sem e com uso do tampão, respectivamente, próximo ao final do experimento 5, entre o 11º e o 12º dia ou entre o 12º e 13º dia, o pH medido antes do novo ajuste do pH da solução era superior ao pH alvo de cada tratamento, demonstrando que essa tendência

mantêm-se quando as plantas tem sistema radicular mais desenvolvido, com ou sem uso do tampão, desde que o ajuste do pH seja diário (Figura 11).

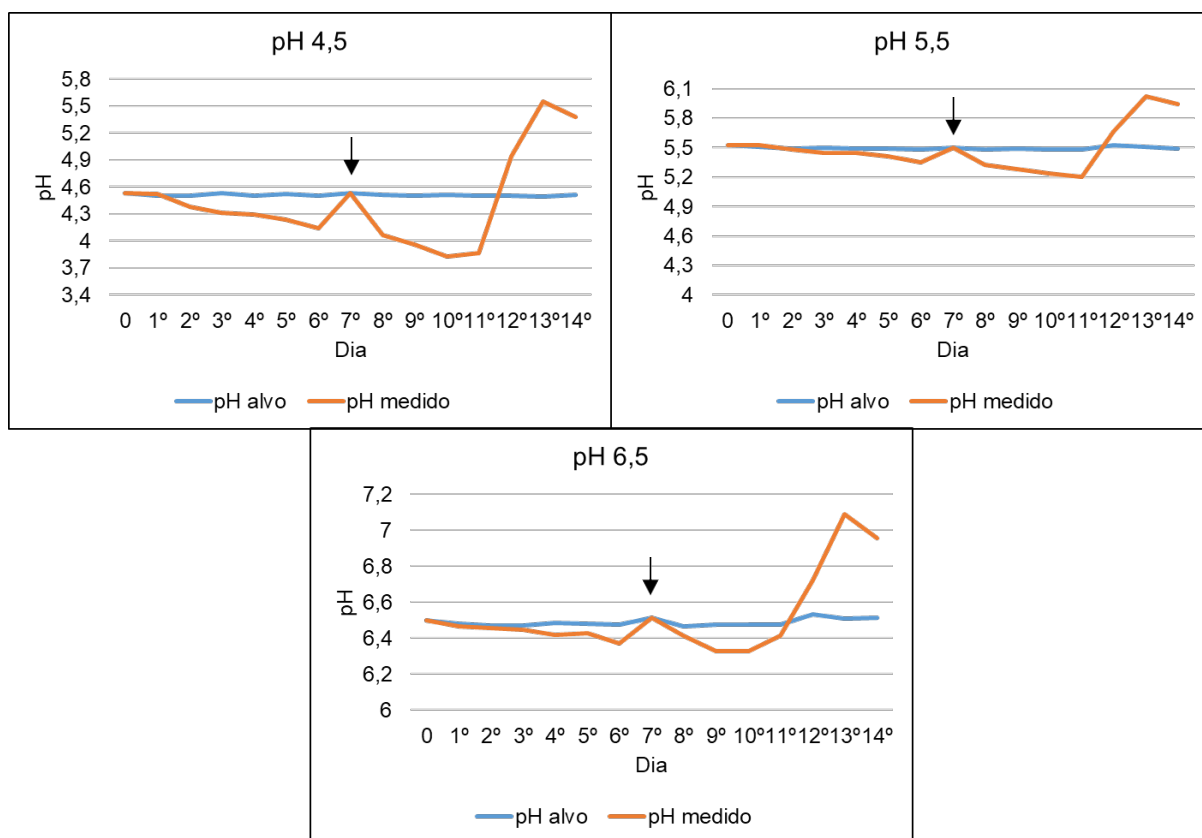


FIGURA 11. Valor do pH medido imediatamente antes e após o ajuste para o pH alvo da solução nutritiva, onde foram avaliados os genótipos de aveia, no experimento 5, realizado com uso do tampão MES e ajuste diário do pH. Seta indica troca da solução nutritiva.

4.2 Caracterização morfológica das raízes em solução nutritiva com tampão MES e com ajuste de pH diário

O tampão MES [ácido 2-(N-morfolino) etanossulfônico monohidratado] é um tampão biológico, indicado para manter o pH dentro da faixa entre 5,5 e 6,7. Portanto, é esperado que ocorra maior variação de pH para o tratamento pH 4,5, comparado aos pHs 5,5 e 6,5. Por esta razão manteve-se o ajuste diário do pH da solução nutritiva, o qual foi realizado para todos os tratamentos.

O teste *F* da análise da variância, para o caráter comprimento total de raízes, para o pH 4,5; 5,5 e 6,5 foi significativo para repetição e genótipo (Apêndices 12, 21 e 30, respectivamente). Os coeficientes de variação para comprimento de raízes (Apêndice 1) foram menores no pH 5,5, indicando possível efeito do tampão, mas ainda atingindo valor de 25 % para a cultivar URS

Corona, nesse pH. Enquanto, ainda no pH 5,5, o coeficiente de variação de URS Taura foi menor, cerca de 18 %. Já nos pHs 4,5 e 6,5 foram observados valores similares dos coeficientes de variação para comprimento de raízes, entre 20 e 28 %, com os maiores valores ocorrendo em URS Altiva (Apêndice 1).

Na comparação das médias do comprimento de raízes (Figura 12), verificou-se menor comprimento de raízes no genótipo URS Corona nos três pHs testados. URS Altiva e URS Taura não diferiram entre si nos pHs 4,5 e 6,5, porém no pH 5,5 a URS Taura resultou em um comprimento de raízes menor que URS Altiva e maior do que a URS Corona.

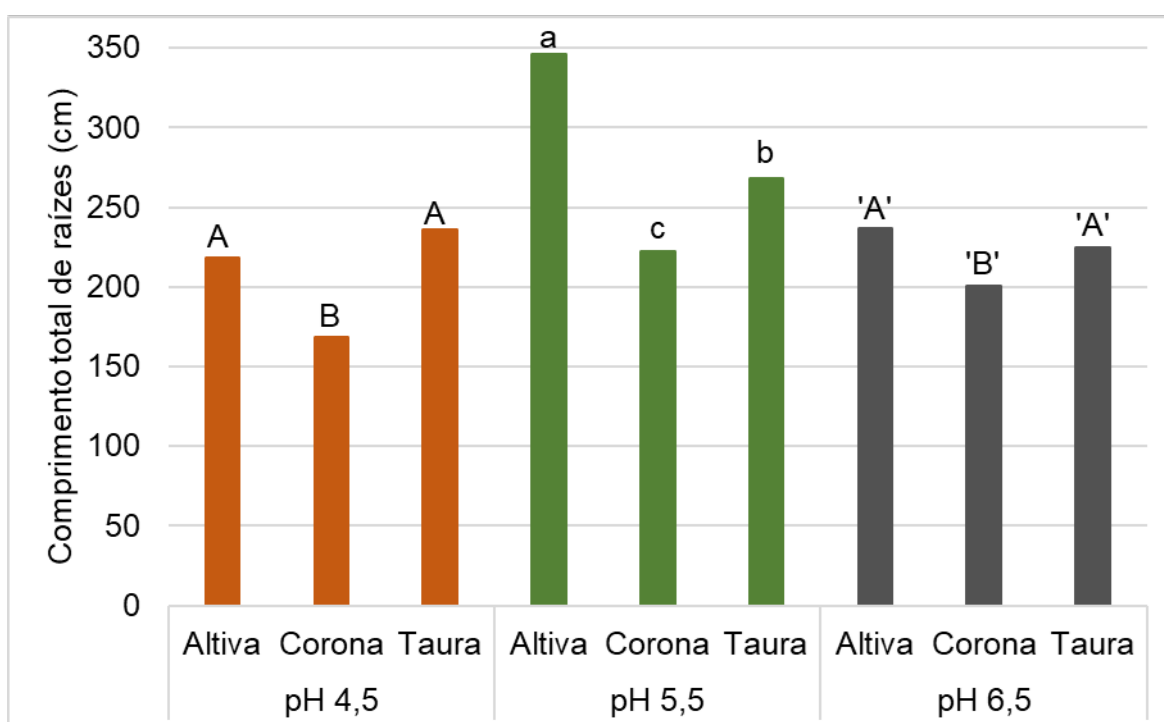


FIGURA 12. Comprimento total de raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH.

Assim como para comprimento de raízes, a análise de variância da área total de raízes revelou diferenças significativas entre repetições e genótipos (Apêndice 13, 22 e 31). Os coeficientes de variação para o caráter área total de raízes foi similar ao observado para o comprimento de raízes, variando entre 17 e 24 % (Apêndice 2). Observou-se a menor média de área total de raízes no genótipo URS Corona nos três pHs testados, porém no pH 6,5 a URS Corona

não diferiu da URS Taura (Figura 13). A URS Altiva e URS Taura não diferiram nos pHs 4,5 e 6,5. Já no pH 5,5 a URS Altiva apresentou maior área média de raízes, comparada as outras duas cultivares (Figura 13).

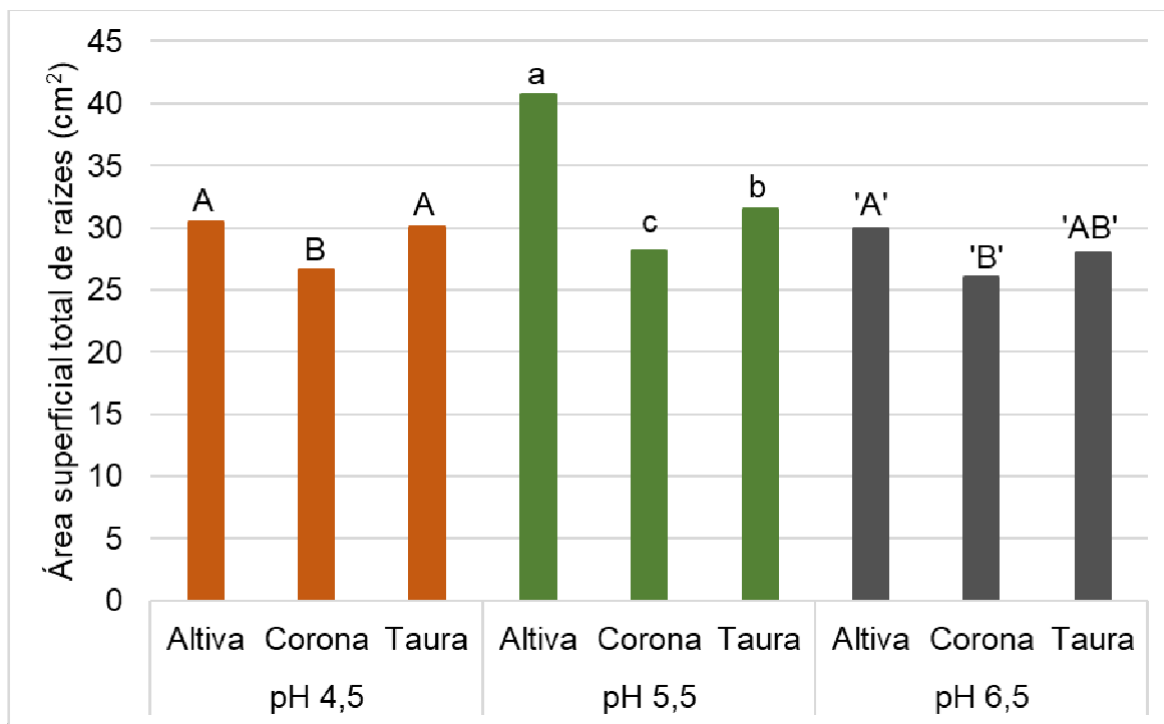


FIGURA 13. Área de raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH.

Para o caráter diâmetro médio de raízes, a análise da variância revelou diferenças significativas entre as médias das repetições e dos genótipos (Apêndice 14, 23 e 32). Esse caráter também apresentou maior estabilidade fenotípica, com coeficientes de variação relativamente baixos, entre 6 e 11 % (Apêndice 3).

A cultivar URS Corona apresentou maior diâmetro médio nos três pHs testados, embora no pH 6,5 não tenha diferido de URS Altiva. No pH 4,5 URS Taura resultou no menor diâmetro médio de raízes, enquanto nos pHs 5,5 e 6,5 não diferiu de URS Altiva (Figura 14).

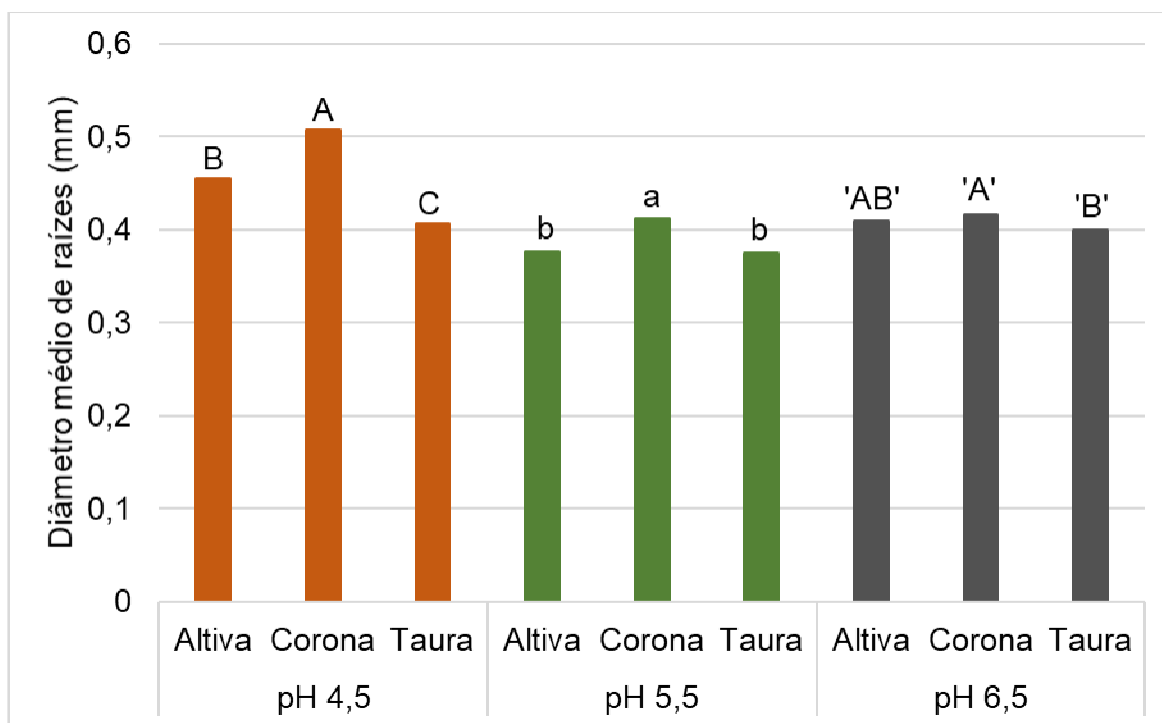


FIGURA 14. Diâmetro médio de raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH.

Quanto ao volume de raízes, a análise da variância mostrou diferenças significativas entre as médias dos genótipos sob os pHs 4,5 e 5,5 (Apêndices 15 e 24). Somente sob o pH 6,5 houve diferença significativa entre as médias dos genótipos e das repetições (Apêndice 33). Assim como para comprimento e área de raízes, os coeficientes de variação para o caráter volume de raízes foram elevados, variando entre 17 e 26 % (Apêndice 4). A cultivar URS Altiva sempre apresentou o maior volume de raízes, independente do pH, porém não diferiu de URS Corona sob pH 4,5 e de URS Taura sob o pH 6,5. URS Taura apresentou o menor volume de raízes sob os pHs 4,5 e 5,5. Já URS Corona teve volume de raízes inferior sob os pHs 5,5 e 6,5, sendo que sob o pH mais elevado não diferiu de URS Taura (Figura 15).

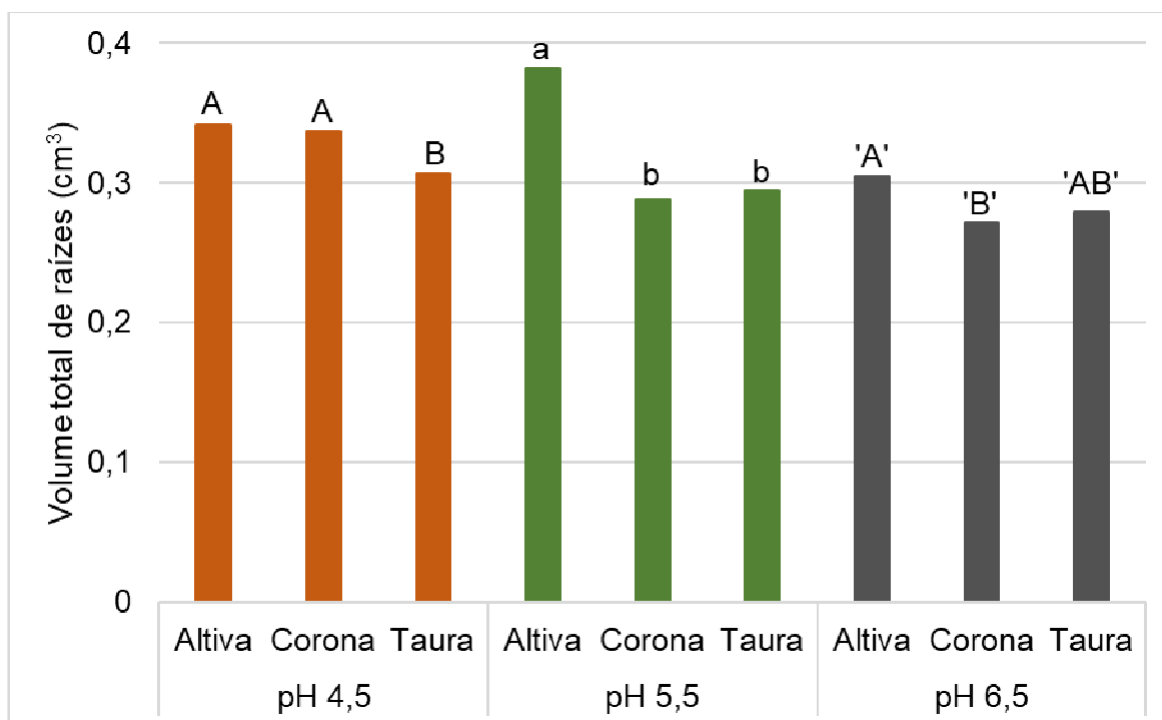


FIGURA 15. Volume de raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH.

A análise de variância para o caráter número de ápices radiciais revelou que as diferenças entre repetições e genótipos foram significativas (Apêndices 16, 25 e 34). Os coeficientes de variação para esse caráter, na maioria, foram superiores aos observados nos demais caracteres descritos até aqui, e foram similares entre os tratamentos, variando entre 22 e 36 % nos três pHs testados (Apêndice 5).

Na comparação do número de ápices radiciais (Figura 16) o genótipo URS Altiva mostrou média superior nos três pHs testados. Para esse genótipo, o pH 5,5 proporcionou média cerca de 50% superior ao observado nos demais pHs. Sob qualquer pH avaliado, URS Corona foi inferior em comparação com os outros genótipos, quanto ao número de ápices radiciais, enquanto URS Taura foi intermediário entre URS Altiva e URS Corona (Figura 16).

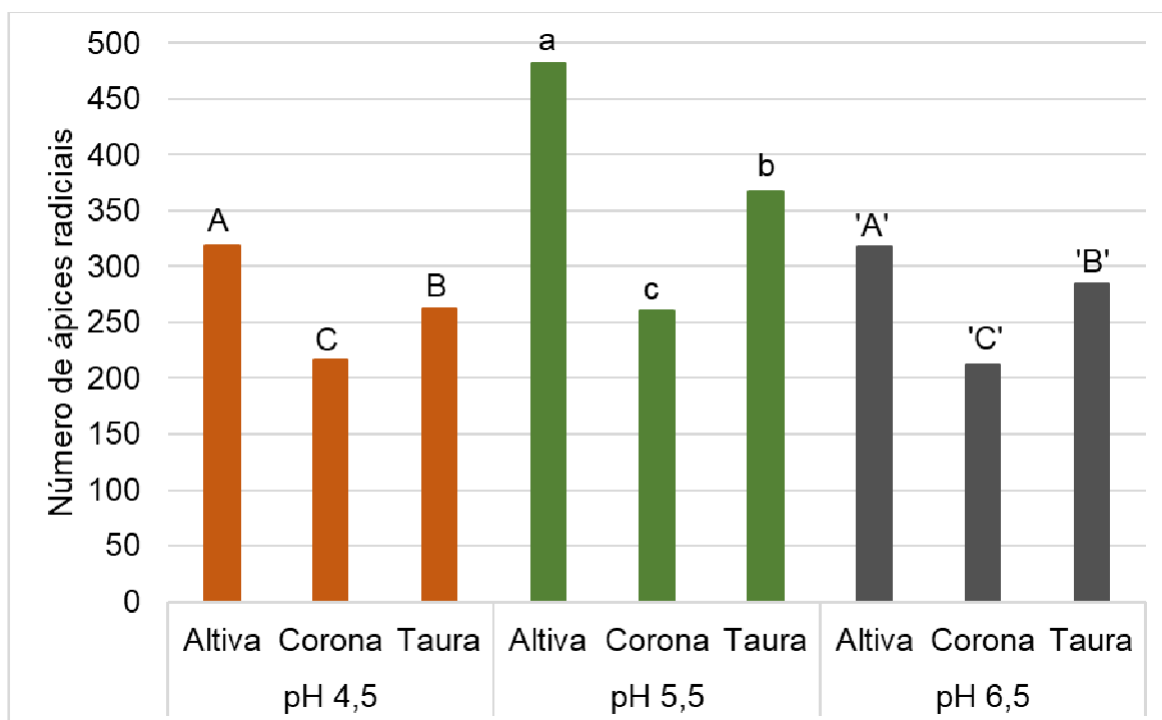


FIGURA 16. Número de ápices radiciais em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH.

Para o caráter número de forquilhas radiciais, a análise de variância mostrou significância para genótipo (Apêndice 17, 26 e 35). Coeficientes de variação foram ainda mais elevados do que observado para número de ápices radiciais, com valores entre 23 e 45 % (Apêndice 6).

Assim como para número de ápices radiciais, o maior número de forquilhas do sistema radicular, média de cerca de 2250 forquilhas, foi observado no genótipo URS Altiva sob pH 5,5, enquanto nos pHs 4,5 e 6,5 URS Altiva teve médias de cerca de 1300 e 1500 forquilhas, respectivamente (Figura 17). O pH 5,5 foi o único que conseguiu diferenciar as médias dos três genótipos, sendo que URS Taura foi intermediária com cerca de 1650 forquilhas e URS Corona foi inferior com média de cerca de 1330 forquilhas radiciais. Sob os pH 4,5 e 6,5 os genótipos URS Altiva e URS Taura foram similares entre si e superiores à URS Corona, porém no pH 6,5, URS Corona e URS Taura não diferiram significativamente quanto ao número de forquilhas (Figura 17).

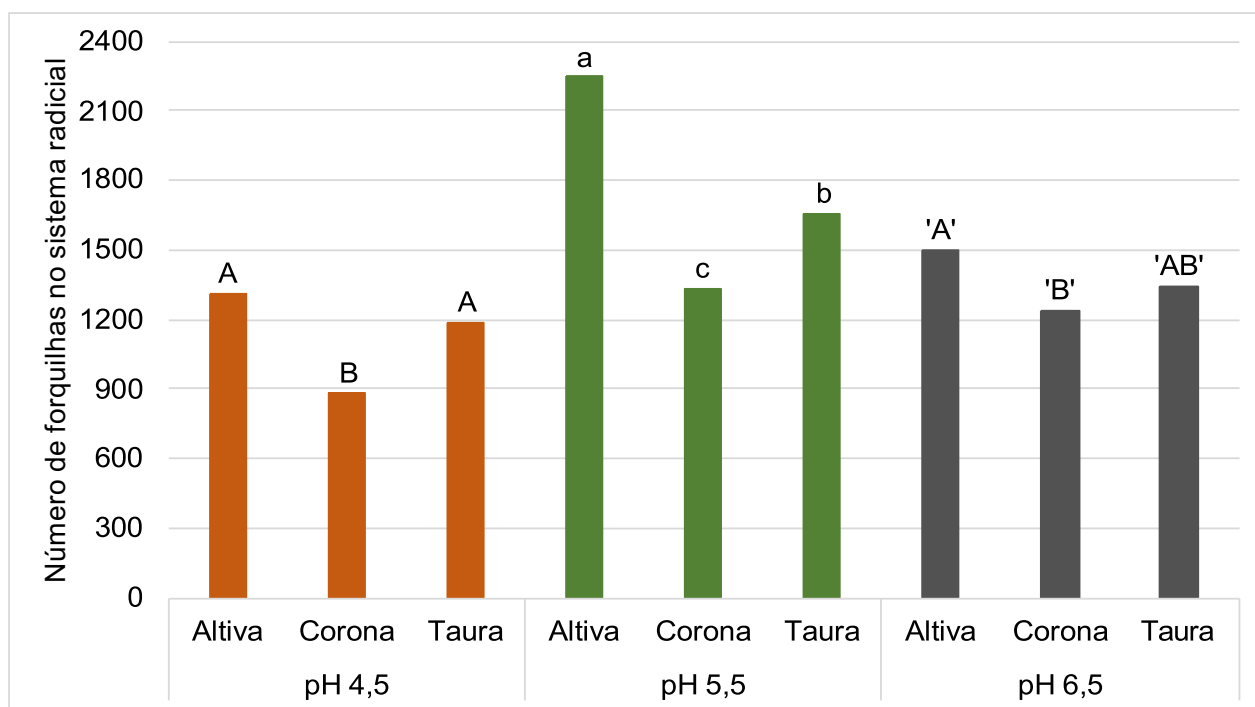


FIGURA 17. Número de forquilhas radiciais em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH.

Para o caráter comprimento de raízes com diâmetro entre 0 e 0,5mm, ou seja, as de menor diâmetro, a análise de variância foi significativa para repetição e genótipo (Apêndice 18, 27 e 36). Os coeficientes de variação foram elevados, entre 19 e 33 %, tendendo a mais elevados no pH mais ácido (Apêndice 7).

É possível observar na Figura 18 que, dentro do genótipo URS Altiva, o pH 5,5 apresentou média do comprimento de raízes finas muito superior à média dos pHs 4,5 e 6,5, enquanto as médias dos pHs extremos não diferiram entre si (teste de comparação de médias dentro de genótipo não foi apresentado). O comprimento total de raízes finas de URS Altiva no pH 5,5 foi superior em cerca de 55 e 75 % superior ao observado nos pHs 6,5, e 4,5, respectivamente. URS Corona mostrou média do comprimento total de raízes de diâmetro fino inferior quando testada nos três pHs. No pH 4,5 a URS Taura apresentou média superior, quanto ao comprimento total de raízes finas, seguido por URS Altiva. Enquanto no pH 6,5 URS Altiva e URS Taura não diferiram entre si (Figura 18).

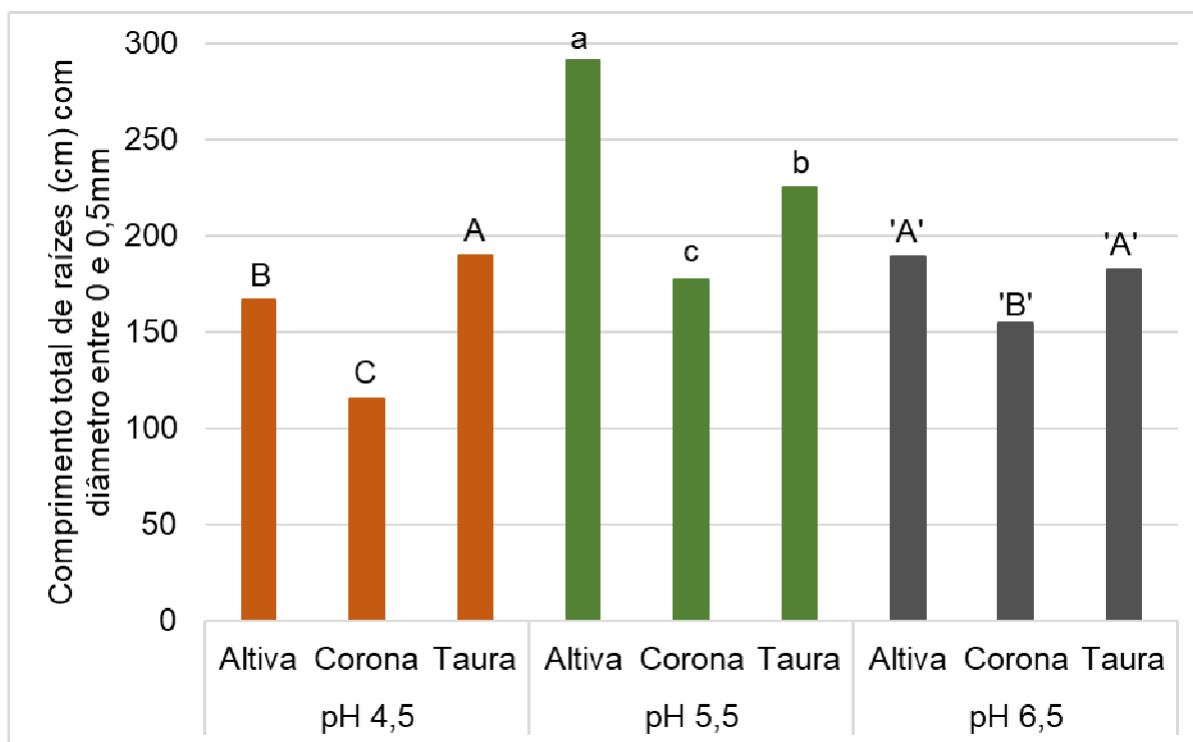


FIGURA 18. Comprimento total de raízes com diâmetro entre 0 e 0,5mm em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH.

A análise de variância para o comprimento de raízes com diâmetro intermediário, ou seja, entre 0,5 e 1,0 mm, mostrou diferenças significativas entre genótipos nos tratamentos com pH 4,5 e 5,5, sem haver diferenças entre repetições (Apêndices 19 e 28), enquanto sob pH 6,5 houve diferença significativa apenas entre as repetições (Apêndice 37). Os coeficientes de variação foram elevados e variaram entre 19 e 30 % (Apêndice 8).

Quanto ao comprimento total de raízes de diâmetro intermediário, dentro do pH 4,5, verifica-se que a cultivar URS Corona obteve média superior, cerca de 42 cm, porém sem diferir de URS Altiva, com média de 38 cm, enquanto URS Taura teve a menor média com 37cm, também sem diferir de URS Altiva (Figura 19). Sob pH 5,5 URS Altiva foi superior quanto ao comprimento de raízes de diâmetro intermediário, com média de cerca de 41 cm, enquanto os dois outros genótipos foram inferiores, sem diferir entre si, com médias próximas a 33 cm. No tratamento com pH 6,5 as médias desse caráter foram similares entre os genótipos, entre 33 e 36 cm, sem haver diferenças significativas (Figura 19).

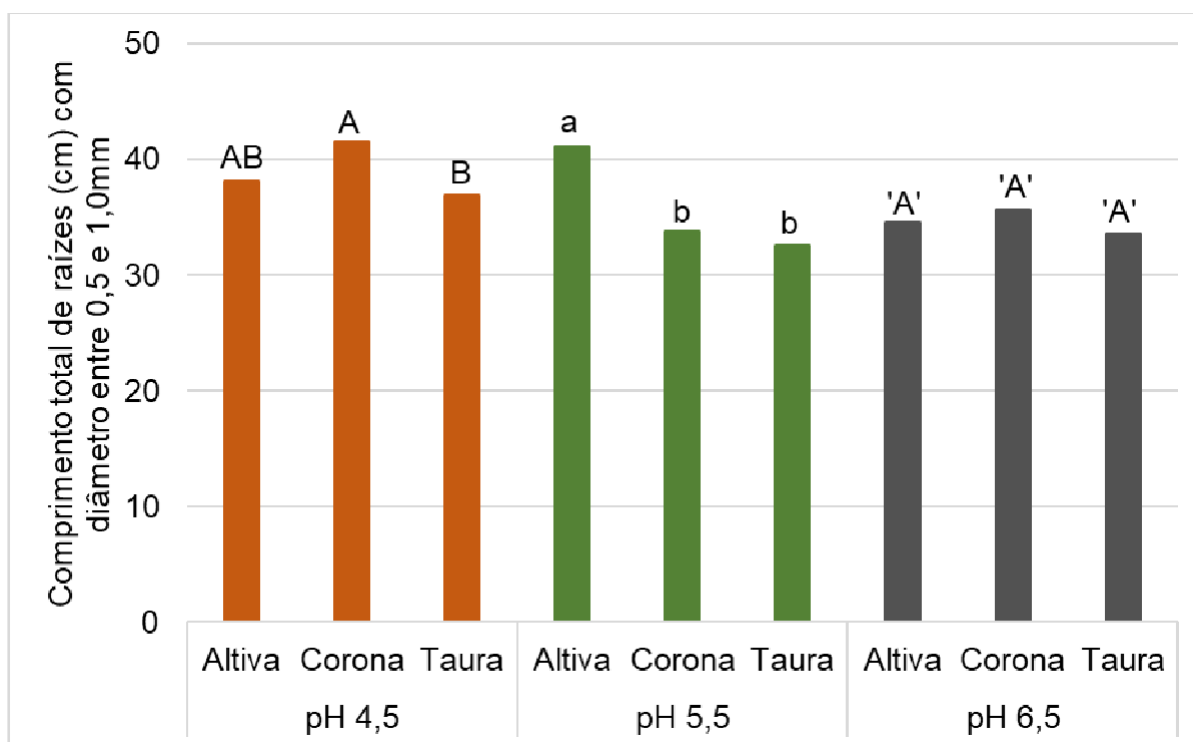


FIGURA 19. Comprimento total de raízes com diâmetro entre 0,5 e 1,0mm em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos, dentro de cada pH.

A análise da variância do caráter comprimento de raízes com diâmetro entre 1,0 e 1,5 mm, ou seja, as raízes de maior calibre, determinou que as diferenças entre as médias dos genótipos foram significativas, sem haver interação significativa entre pH e genótipos e sem diferenças entre as médias sob diferentes pHs (Apêndice 39). Esse caráter apresentou os coeficientes de variação bastante elevados, com valores entre 32 e 47 % (Apêndice 9). Entre os genótipos, a cultivar URS Altiva resultou no maior comprimento de raízes com diâmetro entre 1,0 e 1,5 mm, enquanto URS Corona teve média intermediária e URS Taura resultou na menor média. Entre pHs, na média dos genótipos, o comprimento médio de raízes de maior calibre foi de cerca de 8 cm (Figura 20)

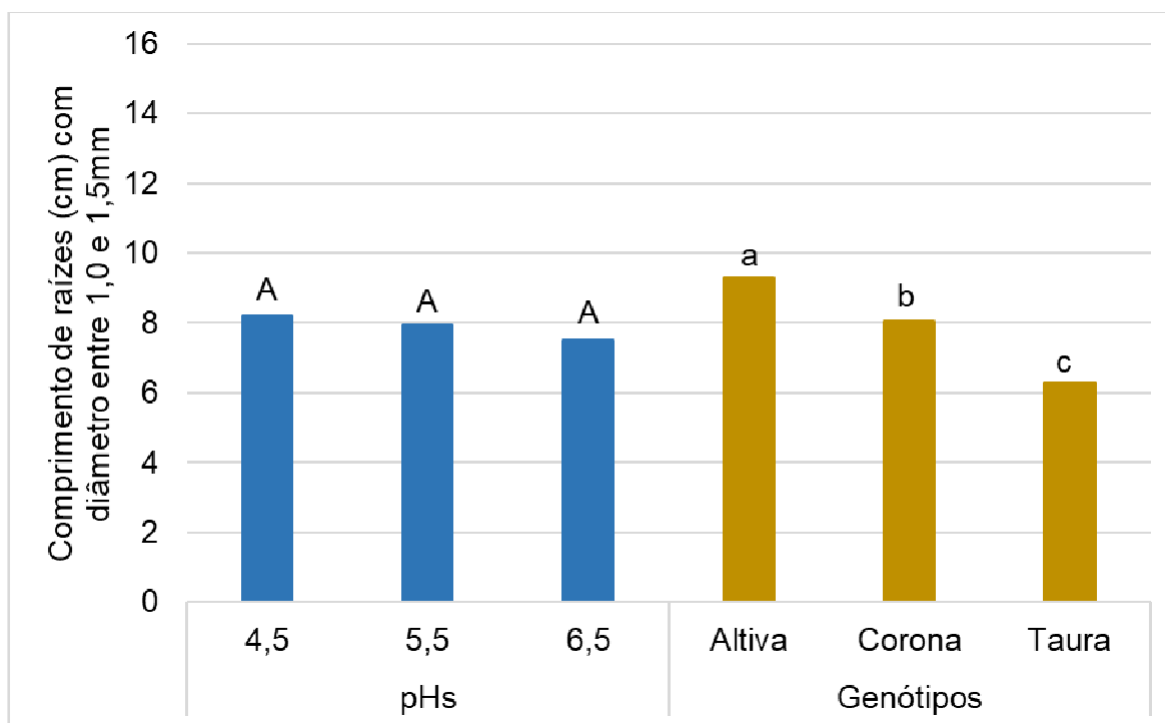


FIGURA 20. Comprimento de raízes com diâmetro entre 1,0 e 1,5mm em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, dentro de pH e de genótipo.

Para o caráter massa seca de raízes, a análise da variância mostrou diferenças significativas entre as médias de genótipos e repetições sob pHs 4,5 e 6,5 (Apêndices 20 e 38), enquanto sob pH 5,5 apenas as diferenças entre as médias de genótipos foram significativas (Apêndice 29). Os coeficientes de variação variaram de 17 % a 29 % (Apêndice 10). Dentro de cada pH, ao comparar as médias de massa seca de raízes, verifica-se que no pH 4,5 a maior massa de raízes foi observada em URS Altiva, enquanto URS Corona e URS Taura não diferiram entre si (Figura 20). Já dentro do pH 5,5 URS Altiva e URS Corona tiveram médias similares entre si e foram superiores à URS Taura. Dentro do pH 6,5 a URS Altiva obteve novamente a maior média de massa seca de raízes maior, mas não diferiu da URS Taura, já a URS Corona apresentou a menor média desse caráter, também sem diferir estatisticamente da URS Taura (Figura 20).

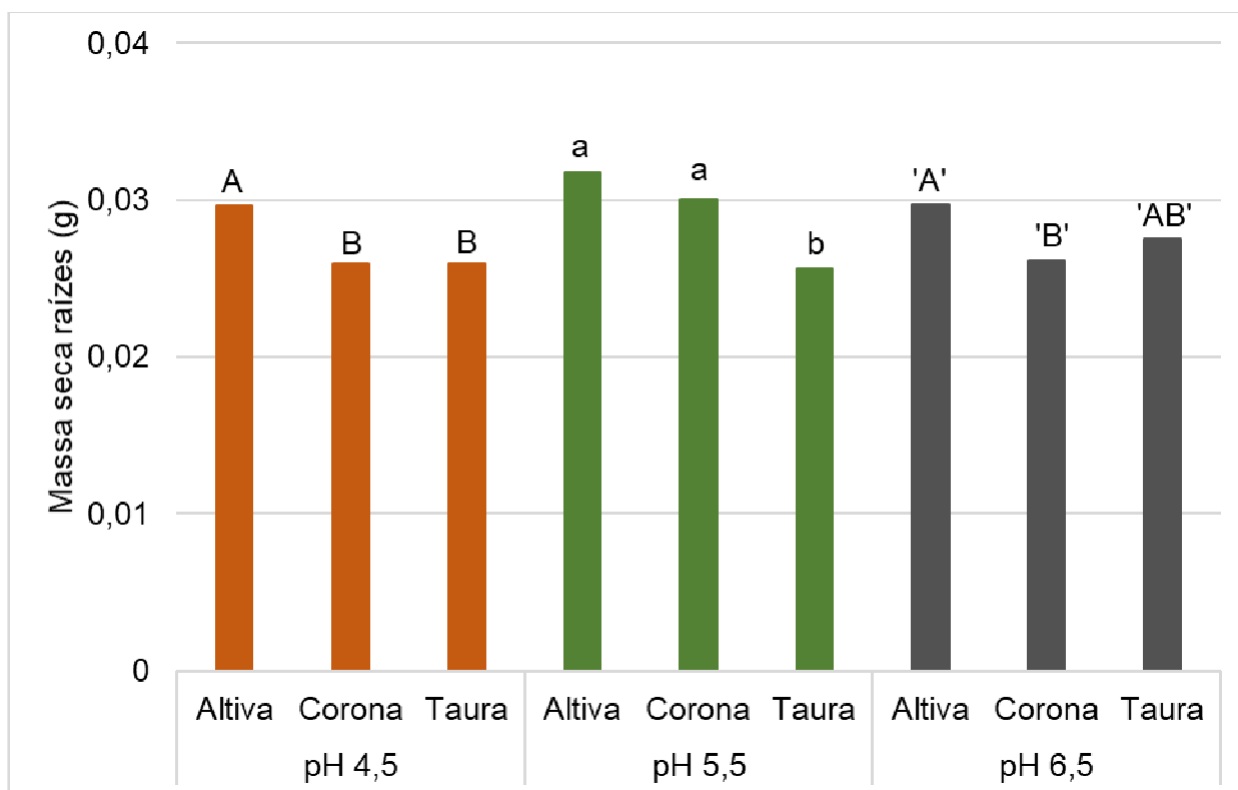


FIGURA 21. Massa seca raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, entre os genótipos dentro de cada pH.

Para o caráter massa seca da parte aérea verificou-se significância para a variância das médias de genótipos e repetições, sem haver significância para a variância das médias de diferentes pHs ou para a variância da interação entre genótipos e pHs (Apêndice 40). Já os coeficientes de variação desse caráter foram moderados a elevados, com valores entre 14 e 28 % (Apêndice 11). Entre os genótipos, URS Taura teve média superior para o caráter massa seca da parte aérea, enquanto URS Altiva e URS Corona foram inferiores e não diferiram entre si (Figura 22).

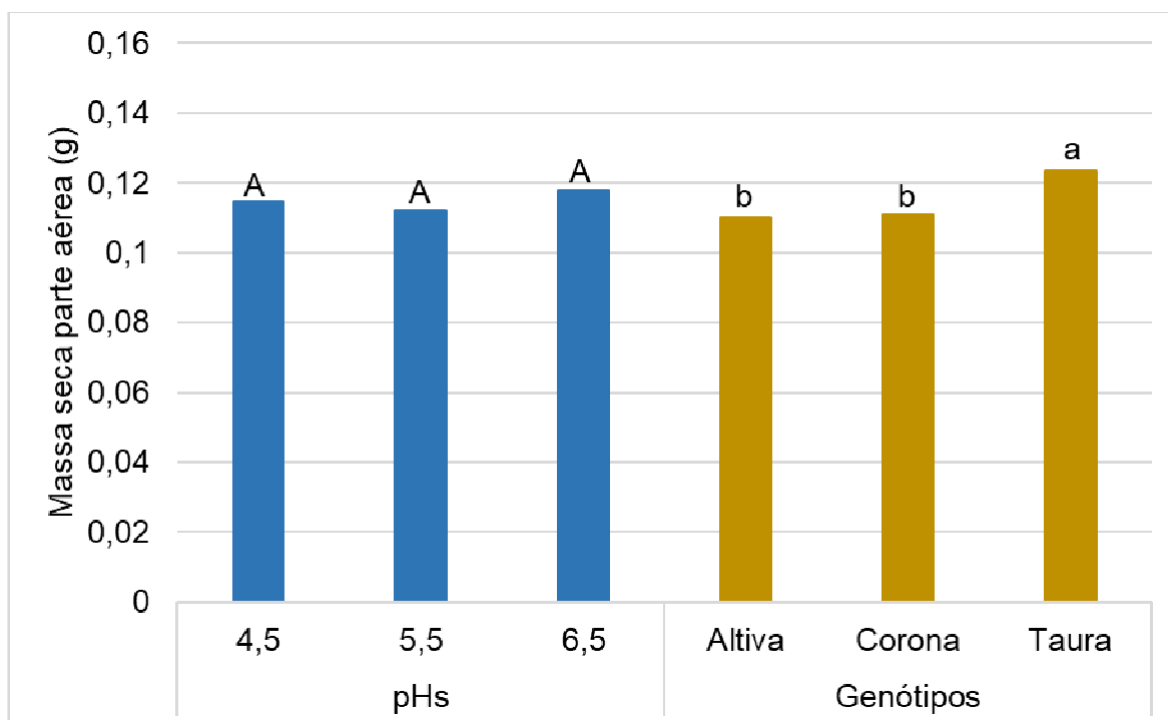


FIGURA 22. Massa seca parte aérea em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva com uso de tampão MES e ajuste diário do pH. As letras diferentes acima das barras indicam as diferenças significativas pelo teste de Duncan, ao nível de 5 % de probabilidade, dentro de pH e de genótipo.

4.3 Associação entre os caracteres morfológicos radiciais

Com o objetivo de compreender as relações entre as características que formam a morfologia das raízes, foram realizadas análises de regressão linear simples entre todas as variáveis analisadas, sendo apresentadas somente aquelas que tiveram associação mais expressiva.

Nas Figuras 23 e 24 estão apresentadas as associações entre as variáveis morfológicas avaliadas nos três genótipos de aveia sob três pHs, com o uso do tampão MES e ajuste diário do pH, sendo em azul o pH 4,5; laranja o pH 5,5 e em cinza o pH 6,5. Para análise foram utilizados os dados de todas as plantas avaliadas e não das médias.

Na Figura 23 é possível observar as associações lineares do comprimento total de raízes com outros três caracteres. O comprimento total de raízes foi positivamente associado, e em grau elevado, com a área superficial de raízes, sendo que os maiores graus de associação entre esses dois caracteres foram obtidos sob pHs 5,5 e 6,5, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,91 e 0,90, respectivamente, enquanto a associação sob pH 4,5 teve R^2 de 0,83 (Figura

23A). Já o maior nível de associação linear encontrada foi entre o comprimento total de raízes e o comprimento de raízes com diâmetro entre 0 e 0,5 mm, independente do pH da solução nutritiva, com R^2 entre 0,97 e 0,99 (Figura 23B), indicando que o sistema radicial é formado basicamente por raízes de diâmetro mais fino. Enquanto que a associação linear do comprimento total de raízes com o número de forquilhas do sistema radicial foi de grau elevado sob pHs 5,5 e 4,5, embora menor que as relatadas acima, com R^2 de 0,74 e 0,71, respectivamente, porém verificou-se redução da associação sob pH 6,5, com R^2 igual a 0,56 (Figura 23C).

Entre as associações lineares envolvendo o comprimento total de raízes, e que foram apresentadas nesta dissertação, o menor grau de associação foi verificado com o número de ápices radiciais (Figura 24A). Novamente o maior grau de associação, entre esses dois caracteres, ocorreu sob pH 5,5, com R^2 de 0,63. Porém, a menor associação, R^2 igual a 0,29, foi observada sob pH 4,5. Enquanto a associação desses dois caracteres sob pH 6,5 teve R^2 de 0,61, portanto similar ao observado sob pH 5,5 (Figura 24A).

Como esperado, o número de forquilhas foi associado positivamente com o número de ápices radiciais, porém em grau relativamente baixo sob pHs 4,5 e 6,5, com R^2 de 0,29 e 0,40, respectivamente. Apenas sob pH 5,5 a associação entre esses dois caracteres foi um pouco mais elevada, com R^2 de 0,63 (Figura 24B). A área superficial de raízes se associou positivamente, e em grau elevado ao número de forquilhas no sistema radicial, no pH 5,5, com R^2 de 0,78. Porém, no pH 4,5 e 6,5 o grau de associação foi mais baixo, R^2 de 0,62 e 0,57 respectivamente (Figura 24C).

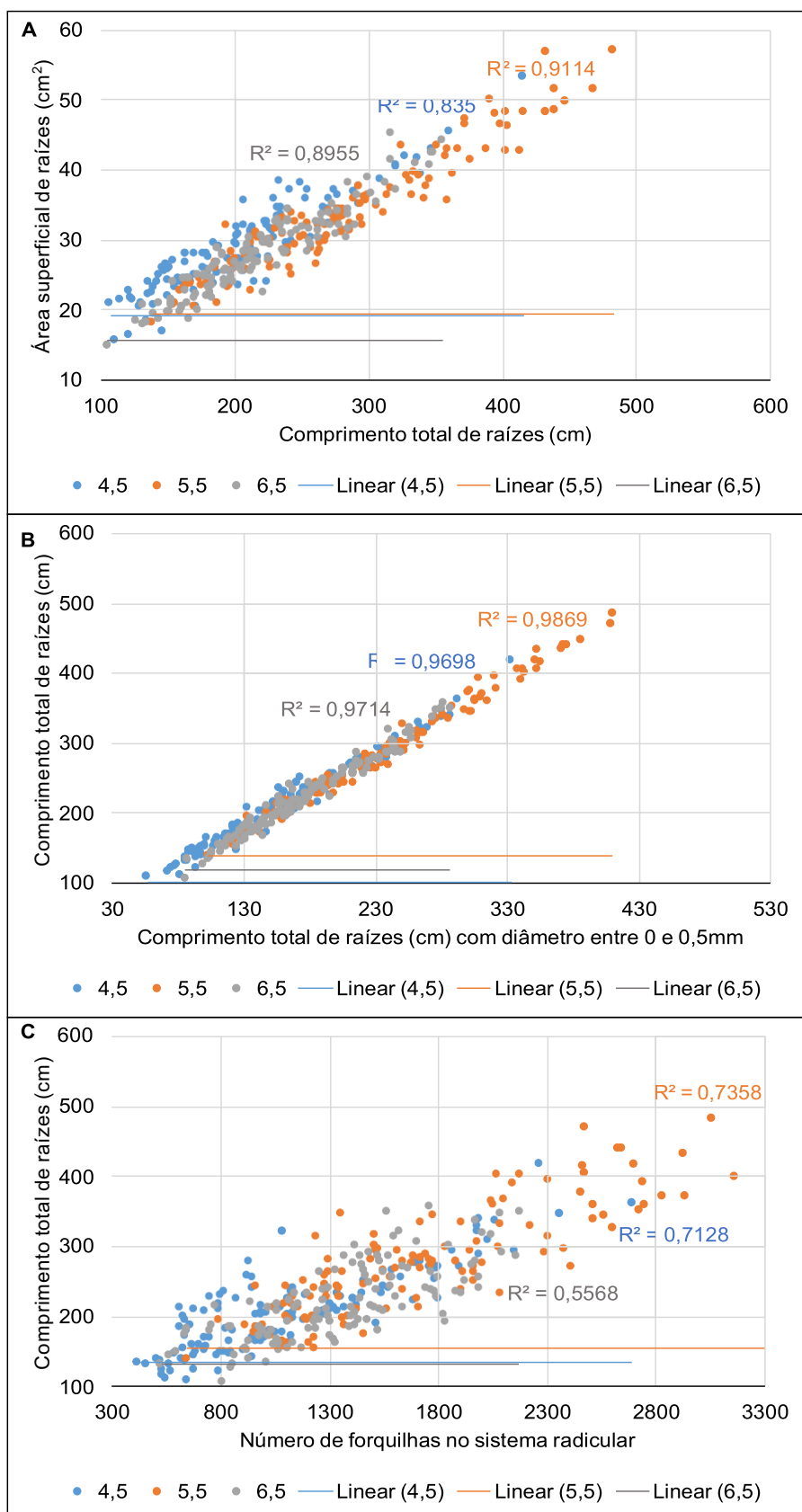


FIGURA 23. Associação entre as variáveis morfológicas do sistema radicular, envolvendo os genótipos de aveia branca URS Altiva, URS Corona e URS Taura, submetidos aos pHs 4,5, 5,5 e 6,5, em solução nutritiva, com o uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

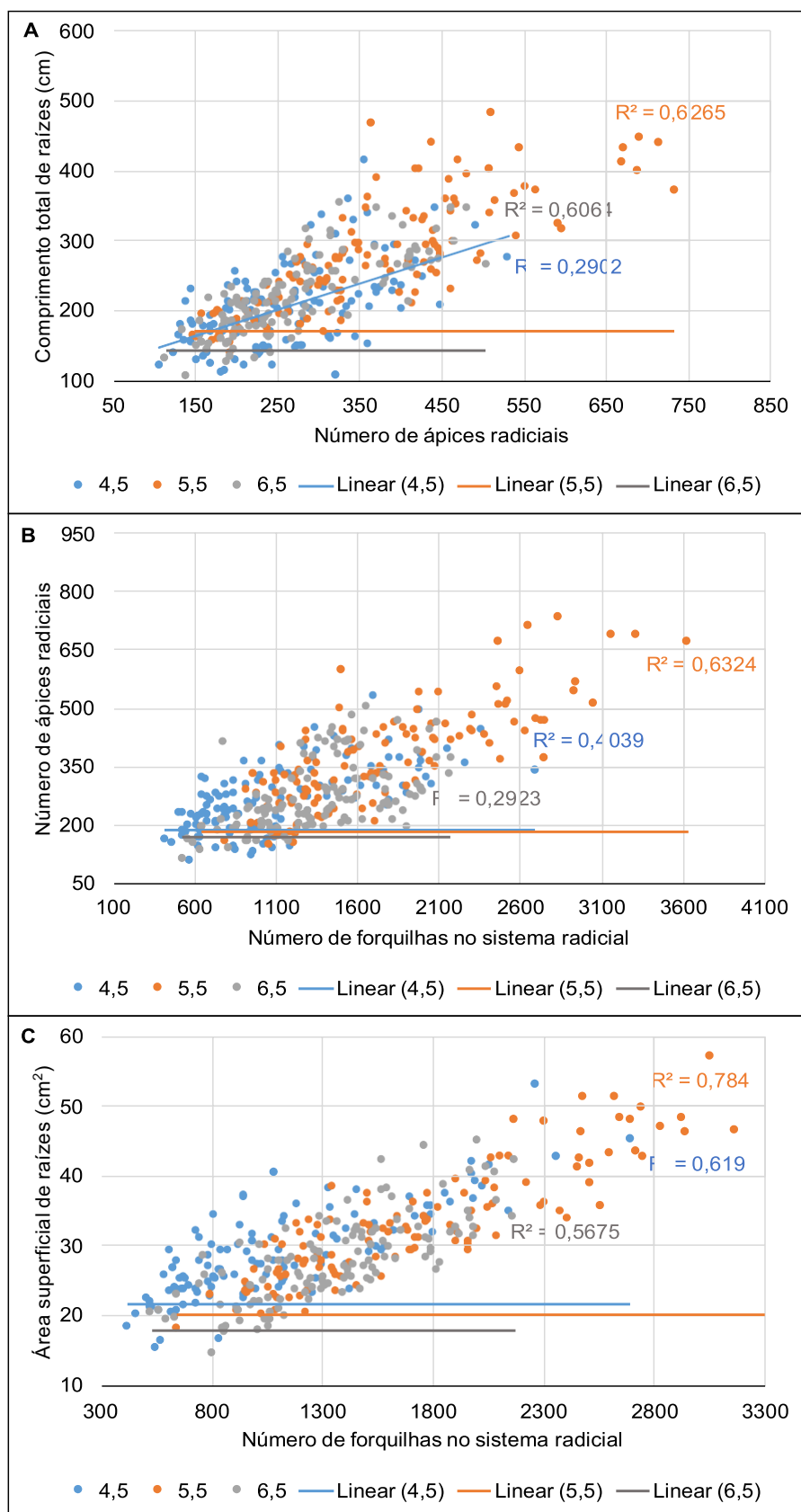


FIGURA 24. Associação entre as variáveis morfológicas do sistema radicial, envolvendo os genótipos de aveia branca URS Altiva, URS Corona e URS Taura, submetidos aos pHs 4,5, 5,5 e 6,5, em solução nutritiva, com o uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

5 DISCUSSÃO

A aveia branca, apesar de ter papel muito importante na alimentação humana e animal, na conservação de solos, como cobertura verde, além de outros usos, como na indústria de cosméticos e medicamentos, ainda carece de estudos sobre sua morfologia, anatomia e desenvolvimento. Informações detalhadas sobre os genótipos de aveia branca são indispensáveis para melhor compreender o seu crescimento e desenvolvimento, assim como contribuir para exploração comercial mais eficiente dessa espécie. Na aveia, assim como em outros cereais, o sistema radicial é muito pouco estudado, porém merece maior atenção, para que possamos compreender melhor como essa cultura é capaz de explorar os recursos do solo, assim como se adaptar a diferentes condições do mesmo. O pH do solo destaca-se por ser um fator que interfere em vários processos do crescimento e desenvolvimento das raízes, principalmente por alterar a disponibilidade de nutrientes. Desta forma, melhor compreender como as raízes de aveia crescem e se desenvolvem sob diferentes pHs, assim como investigar diferenças que possam haver entre genótipos, deverá contribuir ao conhecimento geral que se acumula sobre a espécie *Avena sativa* e, possivelmente, auxiliar em decisões sobre manejo e melhoramento genético da espécie.

A avaliação do pH em solução nutritiva, realizada nesta dissertação, foi eficiente para conhecer a morfologia das raízes dos genótipos de aveia estudados, porém houve grande dificuldade em manter estável o pH alvo desejado em cada tratamento, devido à rápida modificação que o pH da solução nutritiva hidropônica sofria. Essa modificação ocorre naturalmente através da acidificação ou alcalinização da rizosfera, que é diretamente influenciada pelo processo de absorção de íons pelas raízes e ocorrem mediante absorção

desigual de nutrientes catiônicos (NH_4^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , Na^+) em relação aos aniônicos (NO_3^- , Cl^- , SO_4^- , H_2PO_4^-), quando expressos em equivalências de cargas (Haynes, 1990). Isto ocorre porque o influxo de íons de diferentes cargas nas células da raiz promove a necessidade do efluxo de H^+ ou OH^- na rizosfera, para que seja compensado o desbalanço cátion-ânion ocorrido na planta (Hinsinger *et al.*, 2003).

Com o ajuste do pH a cada dois dias e sem o uso do tampão MES a variação do pH da solução nutritiva foi alta, as médias de pH obtidas foram bem abaixo do valor de pH desejado e resultou em um desvio padrão elevado (Figuras 4 e 5). O ajuste diário do pH e sem o uso do MES reduziu a variação observada, com médias de pH mais próximas aos valores desejados. Porém, o desvio padrão continuou alto, variando de 13 a 28 % (Figura 6).

Em razão da elevada variação do pH da solução hidropônica, decidiu-se acrescentar o tampão MES na solução, pois é um reagente utilizado para manter o pH estável em determinado valor, em procedimentos nas áreas da biologia e bioquímica. O controle do pH da solução hidropônica com o auxílio do tampão e com o ajuste diário foi melhorado, sendo que as médias observadas foram próximas aos valores desejados e o desvio padrão reduziu em comparação aos resultados anteriores (Figuras 4 a 11). Embora, sob o uso do tampão e ajuste diário do pH, os valores do pH se afastassem mais do pH alvo, com tendência à neutralidade, à medida que as plantas se desenvolviam e a biomassa de raízes se tornava mais significativa dentro dos baldes com solução hidropônica (Figuras 10 e 11), fato também observado sem uso do tampão MES (Figura 9). Já era esperado que no pH alvo 4,5, com o uso do tampão MES, a variação diária do pH da solução fosse maior que nos pH alvo 5,5 e 6,5, pois a indicação do tampão é para a faixa de pH entre 5,5 e 6,7 (Figuras 10 e 11). Porém, no tratamento com pH alvo 5,5 houve maior variação do pH da solução hidropônica do que no tratamento com pH alvo 6,5, com o uso do tampão MES (Figuras 6D e 6E).

É importante ressaltar que houve diferenças na capacidade de manter o pH, próximo ao pH alvo, nos dois experimentos em que o tampão MES foi usado, os experimentos 4 e 5, sendo que no experimento 4 (Figura 10) as variações do pH, ao longo do experimento, foram muito maiores do que no experimento 5 (Figura 11). Essas diferenças entre os experimentos 4 e 5 foram refletidas nas diferenças observadas na variância de repetições (blocos), dentro dos diferentes

pHs alvo, para a maioria dos caracteres avaliados, quando a análise conjunta dos dois experimentos foi realizada (Apêndices 12 a 40). É possível que a presença de patógenos de sementes durante o cultivo das plantas tenha contribuído para essas alterações no pH ao longo dos experimentos e entre experimentos, uma vez que não houve desinfecção das sementes utilizadas. Também é possível que a proliferação de algas na solução hidropônica tenha contribuído para as diferenças observadas.

No sul do Brasil, o patógeno mais comum em sementes de aveia é *Pyrenophora chaetomioides* (Bocchese *et al.*, 2006), seguido de *Fusarium* spp. (Dresch, 2005). Enquanto, entre os patógenos mais comuns encontrados em cultivos hidropônicos estão: *Fusarium* spp., *Phytophthora* spp. e *Pythium* spp., sendo os dois últimos mais problemáticos, devido as condições aquáticas serem muito favoráveis para o seu desenvolvimento (Stouvenakers *et al.*, 2019). O pH é um dos parâmetros mais importantes que afetam a produção do esporângio, germinação e crescimento do micélio de *Phytophthora* spp. (Kong *et al.*, 2009). O trabalho realizado por Gillespie *et al.* (2020) mostrou que a produção do oósporo de *Pythium aphanidermatum* foi confirmada apenas para as plantas inoculadas em solução com pH 5,5. Esse resultado pode ser ampliado para outras espécies de *Pythium* e outros oomicetos patogênicos, já que esse valor de pH favorece a infecção e pode também alterar a quimiotaxia do zoósporo, através do aumento da motilidade e sua duração.

O uso do tampão MES e o ajuste diário do pH melhorou a qualidade dos dados e permitiu encontrar diferenças significativas entre genótipos, dentro de cada pH testado. Ainda assim, foi possível verificar que, para a maioria dos caracteres avaliados, as diferenças entre os genótipos tenderam a ser mantidas dentro de cada pH, mesmo quando a interação entre pH e genótipo foi significativa, que ocorreu para a grande maioria dos caracteres avaliados. Como explicado por Wang *et al.* (2021), os genótipos podem diferir em suas respostas a ambientes específicos, ou seja, mostrar interação genótipo-ambiente, sendo que essas respostas são denominadas "plasticidade fenotípica". A plasticidade fenotípica envolve a alteração da arquitetura do sistema radicial, fisiologia vegetal e expressão gênica, permitindo que as plantas otimizem as raízes para a absorção de água e nutrientes e se adaptem ao estresse edáfico.

Embora a interação entre pH da solução e genótipo tenha sido significativa para a maioria dos caracteres estudados, foi possível verificar que URS Altiva é o genótipo que apresenta o maior sistema radicular. Embora URS Altiva nem sempre difira de URS Taura ou URS Corona, dependendo do caráter avaliado e do pH utilizado na solução hidropônica. Nos três pHs avaliados, o genótipo URS Altiva apresentou médias superiores para as características comprimento total de raízes (Figura 12), área de raízes (Figura 13), volume de raízes (Figura 15), número de ápices radiciais (Figura 16), número de forquilhas (Figura 17), comprimento de raízes com diâmetros entre 0,5 e 1 mm (Figura 19) e entre 1,0 e 1,5 (Figura 20), massa seca de raízes (Figura 21). Para o caráter comprimento de raízes com diâmetro fino, entre 0 e 0,5 mm, URS Altiva não teve média superior apenas no pH 4,5 (Figura 18). Já para o diâmetro médio de raízes URS Altiva teve média superior apenas sob pH 6,5 (Figura 14). Entre todos os caracteres avaliados URS Altiva não foi superior apenas para massa seca da parte aérea (Figura 22), caráter que, obviamente, não faz parte do sistema radicular e demonstra que há independência, pelo menos inicial, entre o crescimento da parte aérea e o crescimento do sistema radicular. Porém, é importante ressaltar que URS Altiva é um genótipo super precoce, de desenvolvimento inicial muito rápido (Arenhardt, 2019), de estatura elevada e alta biomassa da parte aérea, enquanto URS Taura é um genótipo de baixa estatura, também com elevada biomassa de tecidos vegetativos da parte aérea, ou seja, sem a presença dos grãos, em fase de maturação (Nava *et al.*, 2016; Musa, 2019). Portanto, ao mesmo tempo que pode haver algum nível de independência entre o potencial de crescimento do sistema radicular e da parte aérea, também é esperado que algum nível de alometria seja mantido entre sistema radicular e parte aérea, como indicado por URS Altiva, que mostrou possuir o maior sistema radicular em plantas jovens e possuir maior estatura e maior biomassa de tecidos vegetativos da parte aérea quando na fase adulta, comparado à URS Taura e URS Corona.

O genótipo URS Corona apresentou valores menores do que URS Altiva e URS Taura na maioria das características, independente do pH, mas apresentou o maior diâmetro médio de raízes no pH 4,5 (Figura 14), característica que não é vantajosa, uma vez que são as raízes mais finas que são as principais responsáveis pela absorção de água e nutrientes.

Dentro do pH 4,5 houve aumento no diâmetro médio das raízes (Figura 14) e no volume de raízes (Figura 15), especialmente em URS Corona, e redução das demais características, comparado aos demais pHs da solução hidropônica. Sob pH 4,5 somente URS Altiva se destacou quanto ao número de ápices radiciais (Figura 16) e massa seca de raízes (Figura 21), enquanto foi superior sem diferir de URS Taura para comprimento total de raízes (Figura 12), área total de raízes (Figura 13) e número de forquilhas (Figura 17). Ainda no pH 4,5 URS Taura foi destacada quanto ao comprimento de raízes finas, o que pode contribuir para ser uma das cultivares de maior rendimento de grãos disponíveis no mercado brasileiro e com o índice de colheita mais elevado entre as cultivares de aveia desenvolvidas pela UFRGS (Musa, 2019). Enquanto URS Altiva e URS Corona respondem ao pH mais ácido da solução desenvolvendo mais raízes de diâmetro intermediário, entre 0,5 e 1 mm, em comparação com URS Taura (Figura 19).

Teoricamente, qualquer pH inferior a 7,0 é ácido. Entretanto, na agricultura solos com pH menor que 5,5 são geralmente considerados ácidos porque é o ponto no qual começa a limitar o crescimento e produção em algumas espécies cultiváveis (Cotta, 2016). Nesta dissertação, o pH baixo (4,5), ou seja, o excesso de íons hidrogênio (H^+) reduziu o alongamento e desenvolvimento das raízes. Embora para vários caracteres, como comprimento total de raízes, comprimento de raízes de diâmetro fino e intermediário, número de forquilhas, número de pontas de raízes não tenha ocorrido diferenças estatísticas entre o pH mais ácido (4,5) e menos ácido (6,5) em uma ou mais cultivares (análises não apresentadas), fato que não era esperado.

De acordo com Pessarakli (2019), as condições de pH mais ácido, como 4,5 por exemplo, interfere no processo de absorção pelas raízes e pode existir uma competição entre o H^+ e os outros cátions, pelos mesmos sítios dos carreadores da membrana plasmática, o que resultará na diminuição da absorção de cátions; além desse processo, a disponibilidade de nutrientes é reduzida com o pH baixo, o que diminui a concentração de cada elemento na solução do solo e, portanto, ocorre menor absorção de nutrientes. Kang *et al.* (2013) através de um estudo em plântulas de *Arabidopsis thaliana*, avaliadas no 14º dia, observaram a maior redução de crescimento no pH ácido 4,0. Também um estudo de Haling *et al.* (2011) com as gramíneas perenes *Dactylis glomerata*,

Microlaena stipoides, *Phalaris aquatica* e *Thinopyrum ponticum*, comparando solos ácidos não corrigidos (pH 3,9) e corrigidos com calcário (pH 5,2), mostrou que o comprimento total da raiz de todas as espécies estudadas foi restringido significativamente no pH mais baixo do solo (não corrigido), em relação ao solo corrigido com calcário. Fato associado com raízes seminais mais curtas e, especialmente, raízes laterais.

Os resultados observados indicam que URS Altiva e URS Taura, são os genótipos com maior potencial para explorar o solo, devido a maior capacidade de desenvolver raízes de calibre mais fino, sendo que URS Taura é superior para esse caráter sob o pH mais ácido (Figura 18). Além desses dois genótipos apresentar o maior comprimento total de raízes (Figura 12) e maior área superficial total de raízes (Figura 13). Esse maior potencial de explorar o solo, de URS Altiva e URS Taura, é reforçado pelas relações entre os caracteres estudados, sendo que o comprimento total de raízes é quase que totalmente dependente do comprimento total de raízes de diâmetro fino (Figura 23B) e a área superficial de raízes é altamente dependente do comprimento total de raízes (Figura 23A). Enquanto URS Corona parece ter menor capacidade de explorar o solo, pelo menos em plantas jovens, uma vez que teve média inferior para o comprimento total de raízes finas, independente do pH (Figura 18), e sob o pH mais ácido é o genótipo com maior comprimento total de raízes intermediárias, embora sem diferir de URS Altiva (Figura 19).

Caso as diferenças entre as cultivares estudadas, com maior crescimento inicial do sistema radicial de URS Altiva e URS Taura em comparação à URS Corona, se mantenham ao longo do desenvolvimento dos genótipos sob condições de campo, encontra-se mais uma possível explicação para as diferenças entre essas cultivares quanto sua resistência ao acamamento. Em estudo realizado por Argenta *et al.* (2022) foi encontrado que a maior resistência ao acamamento de URS Taura e URS Altiva é devida, pelo menos em parte, devido a maior diâmetro, maior número de camadas de células no parênquima subdérmico e maior deposição de celulose neste tecido. Ainda, foi encontrado que URS Taura, o genótipo de maior resistência ao acamamento possui deposição de lignina no anel do esclerênquima. Argenta *et al.* (2022) estudaram somente características do colmo para procurar entender as diferenças entre genótipos resistentes e suscetíveis e não incluíram URS Corona entre os

genótipos suscetíveis ao acamamento. É possível que o maior tamanho do sistema radicular de URS Altiva e URS Taura, em comparação à URS Corona, contribua para sua maior resistência ao acamamento, caso essas diferenças sejam mantidas ao longo do desenvolvimento dos genótipos.

De modo geral, o pH 5,5 foi aquele que permitiu o maior crescimento do sistema radicular e permitiu a melhor diferenciação entre genótipos. Como por exemplo para o comprimento total (Figura 12) e a área superficial de raízes (Figura 13), onde sob pH 5,5 URS Altiva foi superior, URS Taura foi intermediária e URS Corona foi inferior. Enquanto sob pHs 4,5 e 6,5 não foram observadas diferenças entre URS Altiva e URS Taura. Já URS Corona mantinha-se inferior para esses dois caracteres sob os dois pHs extremos, embora não diferisse de URS Taura sob pH 6,5 para o caráter área superficial de raízes (Figuras 12 e 13). Foi interessante encontrar a tendência de maior crescimento do sistema radicular, uma vez que pH na faixa de 5,5 a 6,5 disponibiliza o máximo de alguns macronutrientes e não-limita outros micronutrientes (Cotta, 2016). Desta forma, não se esperava que, dentro dos genótipos, houvesse maior comprimento total de raízes e maior número de pontas de raízes sob pH 5,5, enquanto as médias de comprimento total de raízes de URS Altiva e URS Taura não foram diferentes sob pHs 4,5 e 6,5, assim como as médias de número de pontas de raízes não foram diferentes entre os pHs extremos nos três genótipos estudados (análises não apresentadas).

As condições em solução hidropônica não conseguem mimetizar as condições de solo, tanto pela falta da microbiota presente no solo, como pela composição química, como por exemplo a ausência de alumínio (Al^{3+}) trocável na solução hidropônica. Caires *et al.* (2006) estudando o crescimento de raízes de trigo através de análise de correlação entre as características de crescimento radicular do trigo e os atributos químicos do solo, mostraram que o crescimento radicular foi favorecido principalmente pelo aumento do pH e do teor de Ca^{2+} trocável e, como consequência, pela redução do teor de Al^{3+} trocável e da saturação por Al^{3+} .

O comprimento de raízes com diâmetro mais grosso, entre 1 e 1,5 mm (Figura 20), e a massa seca da parte aérea (Figura 22) não apresentaram diferenças entre os pHs, nem interação entre o pH da solução e os genótipos (Apêndices 39 e 40). Entre os genótipos, a URS Altiva apresentou o maior

comprimento de raízes com diâmetro entre 1 e 1,5mm, enquanto URS Taura teve o menor comprimento desse tipo de raízes (Figura 20), indo ao encontro da tendência de URS Taura emitir raízes mais finas, especialmente sob os pHs mais extremos avaliados (Figura 19). Uma possível explicação para a falta de diferença entre os pHs da solução para o caráter comprimento de raízes de diâmetro entre 1 e 1,5 mm seja o fato que essas raízes contribuem pouco para o comprimento total do sistema radicial, conforme demonstrado pela forte associação entre comprimento total de raízes e comprimento de raízes de diâmetro fino (Figura 23B), enquanto a associação com raízes de diâmetro mais grosso foi muito fraca, com R^2 em torno de 0,06 (análise não apresentada).

Conforme escrito acima, a associação linear mais forte foi entre o comprimento total e o comprimento de raízes com diâmetro entre 0 e 0,5 mm, com R^2 em torno ou acima de 0,97 (Figura 23B), o que é explicado tanto pelo maior crescimento dessas raízes finas como pelo desenvolvimento de maior número dessas raízes, conforme demonstrado pela associação positiva entre comprimento total de raízes e número de forquilhas do sistema radicular, que foi mais forte, com R^2 acima de 0,70, sob pHs 5,5 e 6,5 (Figura 23C). Assim como, quanto maior o comprimento total maior será a área superficial, especialmente sob pHs menos ácidos, 5,5 e 6,5, que mostraram forte associação linear entre esses dois caracteres, com R^2 em torno de 0,90 (Figura 23A). Associações entre comprimento total de raízes e número de ápices radiciais (Figura 24A), número de ápices radiciais e número de forquilhas no sistema radicial (Figura 24B) e área superficial de raízes e número de forquilhas (Figura 24C) mostraram ser mais fortes no pH 5,5 comparado aos demais pHs testados, apresentando para as duas primeiras associações R^2 0,63, e para a última associação R^2 0,78. Essas associações tomadas em conjunto indicam que sob condições de pH mais favorável à disponibilidade de nutrientes haverá maior crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, com maior número e comprimento de raízes de diâmetro mais fino, que tem maior capacidade de absorver água e nutrientes. Ainda, de modo geral, os resultados indicam que o pH 5,5 foi tão ou mais favorável que o pH 6,5, mais próximo à neutralidade, embora não seja possível afirmar que essa tendência seja repetida sob condições de solo, uma vez que com pH mais próximo à neutralidade é esperado maior disponibilidade de nutrientes (Figura 3).

Os resultados obtidos nesta dissertação, tomados em conjunto, indicam que o estudo do sistema radicular, sob condições hidropônicas, merece atenção quanto à manutenção do pH mais próximo possível do nível desejado e pré-estabelecido como pH alvo, sendo indispensável o uso de tampão e ajuste diário do pH, especialmente à medida que as plantas adquirem maior biomassa, ou seja, crescem e se desenvolvem. Guardando as limitações que o estudo em condições de hidroponia traz, por não haver teste em condições de solo, é possível afirmar que a manutenção do pH em valores próximos ou pouco acima de 5,5 devem contribuir para melhor desenvolvimento da cultura da aveia em condições de lavoura e contribuir para alcançar maior potencial de rendimento de grãos. Ainda, foi possível observar que há diferenças entre os genótipos quanto ao seu potencial genético de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular. Assim como, há diferenças entre os genótipos quanto a capacidade de crescer e desenvolver o sistema radicular sob condições de pH menos favorável, em especial sob condições de pH mais ácido.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Houve grande dificuldade em manter ajustado o valor desejado do pH da solução nutritiva nos experimentos sem uso do tampão MES, tanto com ajuste do pH a cada dois dias como com o ajuste diário do pH.

A inclusão do tampão MES na solução hidropônica propiciou ajuste mais eficiente do pH, acarretando em avaliação mais eficiente das características morfológicas do sistema radicular. Embora ainda tenham ocorrido alterações diárias do pH, que tenderam a ser maiores quanto mais desenvolvidas estão as plantas, apresentando maior biomassa de raízes e parte aérea. Estes resultados apontam que estudos do sistema radicular de aveia, sob condições hidropônicas, por períodos mais longos que o realizado nesta dissertação devem enfrentar dificuldades ainda maiores para a manutenção do pH da solução.

O pH 5,5 da solução hidropônica foi aquele que melhor distinguiu os genótipos quanto aos caracteres estudados, tendendo a melhor favorecer o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, mesmo em comparação ao pH 6,5, que é aquele onde há maior disponibilidade teórica de nutrientes para as plantas.

O pH 4,5 da solução hidropônica resultou na redução do crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, em especial com menor comprimento total de raízes de diâmetro mais fino, entre 0 e 0,5 mm, que são as principais responsáveis pelo comprimento total do sistema radicular. Desta forma, o pH 4,5 contribui para o comprimento de raízes de diâmetro intermediário, entre 0,5 e 1 mm, favorecendo o aumento do diâmetro médio de raízes, em comparação aos pHs menos ácidos.

O genótipo URS Altiva foi aquele com maior tamanho do sistema radicular, principalmente em pH 5,5, condição sob a qual apresentou maior comprimento total de raízes, maior área superficial de raízes, maior volume total de raízes,

maior número de ápices radiciais, maior número de forquilhas do sistema radicial, maior comprimento de raízes com diâmetros entre 0 e 0,5 mm e entre 0,5 e 1,0 mm, massa seca de raízes, enquanto também teve maior comprimento de raízes de diâmetro mais grosso, entre 1 e 1,5 mm, independente do pH da solução hidropônica. Enquanto sob pHs 4,5 ou 6,5 URS Altiva ainda foi superior para a maioria das características avaliadas, embora sem diferir de URS Taura ou de URS Corona na maioria delas. Desta forma, URS Altiva foi o genótipo mais sensível a alteração do pH ótimo para o desenvolvimento do sistema radicial, que foi o pH 5,5.

As cultivares URS Corona e URS Taura apresentaram maior variabilidade fenotípica, mostrando resposta mais variável de acordo com o pH da solução nutritiva. Mesmo assim, URS Corona foi o genótipo com menor crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, para a maioria dos caracteres avaliados, nos três pHs da solução nutritiva. URS Corona também apresentou o desenvolvimento de raízes de maior diâmetro, na comparação com as outras duas cultivares, que é uma característica indesejável, uma vez que as raízes mais finas têm melhor capacidade de absorver água e nutrientes.

URS Taura, em pH 5,5 tendeu a mostrar médias intermediárias entre URS Altiva e URS Corona, para a maioria dos caracteres estudados. Enquanto sob condições de pH mais ácido (4,5) e menos ácido (6,5) URS Taura apresentou desenvolvimento do sistema radicular similar ao de URS Altiva, para a maioria das características avaliadas, e manteve-se superior à URS Corona. URS Taura sob condições de pH mais ácido foi superior as outras duas cultivares quanto ao comprimento total de raízes de menor diâmetro, ou seja, entre 0 e 0,5 mm, mostrando vantagem nestas condições, por apresentar maior potencial de explorar o solo sob condições mais desfavoráveis de pH, caso esses resultados reflitam o crescimento de raízes sob condições de solo.

O fato de URS Altiva ter sistema radicular maior, em plantas jovens, indica que deve haver algum nível de alometria entre o sistema radicular jovem e o potencial de crescimento da parte aérea da planta adulta, uma vez que URS Altiva é o genótipo com maior estatura e maior biomassa de palha na maturação, entre os três estudados. Por outro lado, URS Taura teve crescimento e desenvolvimento do sistema radicular de plantas jovens superior ao de URS Corona, mesmo sendo o genótipo de mais baixa estatura dos três estudados,

além de não diferir de URS Altiva, para a maioria dos caracteres, sob pH 4,5 ou 6,5, indicando também que a alometria sozinha, entre sistema radicular e parte aérea, não é capaz de explicar o tamanho potencial do sistema radicular de plantas jovens de aveia. O que é corroborado com o fato que a maior massa seca da parte aérea, sob condições de hidroponia, foi alcançada por URS Taura, independente do pH da solução.

As associações lineares mostraram que o comprimento total de raízes é quase que completamente formado por raízes com diâmetro entre 0 e 0,5 mm. Assim como o comprimento total de raízes e o número de forquilhas do sistema radicial irão determinar a área superficial total de raízes. Desta forma, genótipos que conseguem desenvolver maior número e maior comprimento de raízes de menor diâmetro, como URS Altiva e URS Taura, deverão ter vantagens quanto à capacidade de explorar o volume do solo, para absorção de água e nutrientes.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, F. Crop response to lime in the southern United States. *In*: ADAMS, F. (ed.). **Soil acidity and liming**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1984. v. 12, cap. 5, p. 211–265. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronmonogr12.2ed.c5>. Acesso em: 20 jul. 2021.
- ALLAWAY, W. H. pH, soil acidity and plant growth. *In*: UNITED STATES. Department of Agriculture. **Yearbook of agriculture**. Washington, D.C.: U. S. Department of Agriculture, 1957. p. 67–71. Disponível em: <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND43894850/PDF>. Acesso em: 25 jul. 2021.
- ANSARI, N.; THOMAS, H. A study of homoeologous relationships in the cultivated oat *Avena sativa* ($2n=6x=42$). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 66, p. 303–305, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00251164>. Acesso em: 16 jul. 2021.
- ARENHARDT, E. G. **Florescimento em aveia (*Avena sativa* L.)**: resposta a soma térmica, fotoperíodo, vernalização e suas interações. 2019. 226 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- ARGENTA, J. *et al.* Morphological, anatomical, and chemical characteristics associated with lodging resistance in *Avena sativa*. **Euphytica**, Dordrecht, v. 218, [art.] 22, [p. 1-13], 2022.
- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; ELRASHIDI, M. A. Toxicity and nutrient constraints on root growth. **HortScience**, Alexandria, VA, v. 33, p. 960–965, 1998.
- BAO, Y. *et al.* Plant roots use a patterning mechanism to position lateral root branches toward available water. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, DC, v. 111, n. 25, p. 9319–9324, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1400966111>. Acesso em: 05 ago. 2021.
- BARBIERI, R. L. Aveia. *In*: BARBIERI, R. L.; STUMPF, E. R. T. (org.). **Origem e evolução de plantas cultivadas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 209–218.
- BARBOSA NETO, J. F. *et al.* Progresso genético no melhoramento da aveia-branca no Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 8, p. 1605–1612, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2000000800013>. Acesso em: 10 ago. 2021.
- BOCCHESI, C. A. *et al.* Processo de infecção e formação de mancha em grãos de aveia branca com níveis diferenciados de resistência para *Pyrenophora chaetomioides*. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 31, n. 3, p. 284-290, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-41582006000300007>. Acesso em: 7 jul. 2021.

- BRAY, R. H. A nutrient mobility concept of soil-plant relationships. **Soil Science**, New Brunswick, v. 78, n. 1, p. 9–22, 1953. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/00010694-196302000-00006>. Acesso em: 27 jul. 2021.
- CAIRES, E. F. *et al.* Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 5, p. 502–509, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000500013>. Acesso em: 29 jun. 2021.
- CASTRO, G. S. A.; COSTA, C. H. M.; FERRARI NETO, J. Ecofisiologia da Aveia Branca. **Scientia Agraria Paranaensis**, Acrelândia, v. 11, n. 3, p. 1–15, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v11n3p1-15>. Acesso em: 19 jun. 2021.
- CHEN, Q.; ARMSTRONG, K. Genomic in situ hybridization in *Avena sativa*. **Genome**, Ottawa, n. 37, p. 607–612, 1994.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Safra 2020/21: quarto levantamento. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Grãos**, Brasília, DF, v. 8, n. 4, p. jan. 2021. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 16 jan. 2021.
- COTTA, S. R. O solo como ambiente para a vida microbiana. *In*: CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. (org.). **Microbiologia do solo**. 2. ed. Piracicaba: ESALQ, 2016. v. 1, p. 23–35. Disponível em: <https://doi.org/10.3738/1982.2278.1700>. Acesso em: 16 mar. 2021.
- DEAK, K. I.; MALAMY, J. Osmotic regulation of root system architecture. **The Plant Journal**, Oxford, v. 43, n. 1, p. 17–28, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2005.02425.x>. Acesso em: 18 abr. 2021.
- DE MORI, C.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. **Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da aveia**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012. 26 p. (Embrapa Trigo, Documentos Online, 136). Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do136.htm. Acesso em: 15 jul. 2021.
- DRESCH, L. F. **Avaliação de danos e controle de giberela em diferentes genótipos de aveia**. 2005. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- DUBROVSKY, J. G.; LASKOWSKI, M. Lateral root initiation. *In*: THOMAS, B.; MURRAY, B. G.; MURPHY, D. J. (org.). **Encyclopedia of applied plant sciences**. 2nd. ed. Amsterdam: Elsevier, 2017. v. 1, p. 256–264. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00126-X>. Acesso em: 9 maio 2021.
- FITTER, A. H. An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems. **New Phytologist**, Oxford, v. 106, p. 61–77, 1987. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1987.tb04683.x>. Acesso em: 16 jun. 2021.
- GILLESPIE, D. P.; KUBOTA, C.; MILLER, S. A. Effects of low pH of hydroponic nutrient solution on plant growth, nutrient uptake, and root rot disease incidence of Basil (*Ocimum basilicum* L.). **HortScience**, Alexandria, VA, v. 55, n. 8, p. 1251–1258, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14986-20>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- HALING, R. E. *et al.* Effect of soil acidity, soil strength and macropores on root growth and morphology of perennial grass species differing in acid-soil resistance. **Plant, Cell and Environment**, Hoboken, v. 34, n. 3, p. 444–456, 2011. Disponível em:

<https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02254.x>. Acesso em: 19 jun. 2021.

HAWERROTH, M. C. *et al.* Redução do acamamento em aveia-branca com uso do regulador de crescimento etil-trinexapac. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 50, n. 2, p. 115-125, 2015.

HAYNES, R. J. Active ion uptake and maintenance of cation-anion balance: a critical examination of their role in regulating rhizosphere pH. **Plant and Soil**, The Hague, v. 126, n. 2, p. 247–264, 1990. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00012828>. Acesso em: 10 jul. 2021.

HINSINGER, P. *et al.* Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. **Plant and Soil**, The Hague, v. 248, n. 1/2, p. 43–59, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1022371130939>. Acesso em: 1º ago. 2021.

KANG, T. T. *et al.* The effect of various pH levels on the root growth of *Arabidopsis thaliana* seedlings. **Expedition**, Philadelphia, v. 2, [p. 1-15], 2013. Disponível em: <http://ojs.library.ubc.ca/index.php/expedition/article/view/184145>. Acesso em: 22 jun. 2021.

KHAN, M. A.; GEMENET, D. C.; VILLORDON, A. Root system architecture and abiotic stress tolerance: Current knowledge in root and tuber crops. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 7, [art.] 1587, [p. 1–13], 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01584>. Acesso em: 23 abr. 2021.

KONG, P. *et al.* Zoospore tolerance to pH stress and its implications for *Phytophthora* species in aquatic ecosystems. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, DC, v. 75, n. 13, p. 4307–4314, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/AEM.00119-09>. Acesso em: 9 mar. 2021.

KUMPF, R. P.; NOWACK, M. K. The root cap: a short story of life and death. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 66, n. 19, p. 5651–5662, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erv295>. Acesso em: 17 jul. 2021.

LOSKUTOV, I. G. On evolutionary pathways of *Avena* species. **Genetic Resources and Crop Evolution**, Amsterdam, v. 55, n. 2, p. 211–220, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10722-007-9229-2>. Acesso em: 08 mar. 2021.

LOSKUTOV, I. G.; RINES, H. W. *Avena*. In: KOLE, C. (org.). **Wild crop relatives: genomic and breeding resources - cereals**. New York: Springer, 2011. p. 109–184. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14228-4>. Acesso em: 26 jul. 2021.

LYNCH, J.; MARSCHNER, P.; RENGEL, Z. Effect of internal and external factors on root growth and development. In: MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. New York: Elsevier, 2012. p. 331–346. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00013-3>. Acesso em: 8 jul. 2021.

MALAMY, J. E. Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. **Plant, Cell and Environment**, Hoboken, v. 28, n. 1, p. 67–77, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01306.x>. Acesso em: 28 jun. 2021.

MCCORMACK, M. L. *et al.* Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. **New Phytologist**, Oxford, v. 207, n. 3, p. 505-518, 2015.

MIGUEL, P. S. B. *et al.* Efeitos tóxicos do alumínio no crescimento das plantas: mecanismos de tolerância, sintomas, efeitos fisiológicos, bioquímicos e controles genéticos. **CES Revista**, Juiz de Fora, v. 24, n. 1, p. 13–29, 2010.

MUSA, F. A. **Formação e partição de biomassa aparente, e determinação dos componentes do rendimento de grãos em aveia branca**. 2019. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

NAVA, I. C. *et al.* Inheritance of aluminum tolerance and its effects on grain yield and grain quality in oats (*Avena sativa* L.). **Euphytica**, Dordrecht, v. 148, n. 3, p. 353-358, 2006.

NAVA, I. C.; PACHECO, M. T.; FEDERIZZI, L. C. URS Altiva – a new oat cultivar with high agronomic performance. **g anCrop Breeding Applied Biotechnology**, Viçosa, MG, v. 16, p. 254-260, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1984-70332016v16n3c39>. Acesso em: 17 jun. 2021.

ÖRDÖG, V. Water and nutrients in plants. *In*: ÖRDÖG, V. **Plant Physiology**. Sopron: Debreceni Egyetem, 2011. p. 2–32. *E-book*. Disponível em: www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo/Plant-Physiology-by-Vince-Ordog.pdf. Acesso em: 27 jun. 2021.

OSMONT, K. S.; SIBOUT, R.; HARDTKE, C. S. Hidden branches: developments in root system architecture. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 58, p. 93–113, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.58.032806.104006>. Acesso em: 5 ago. 2021.

PENN, C. J.; CAMBERATO, J. J. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. **Agriculture**, Basel, v. 9, n. 6, [art.] 120, [p. 1–18], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>. Acesso em: 13 maio 2021.

PERILLI, S.; DI MAMBRO, R.; SABATINI, S. Growth and development of the root apical meristem. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 15, n. 1, p. 17–23, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2011.10.006>. Acesso em: 8 mar. 2021.

PESSARAKLI, M.; SZABOLCS, I. S. Soil salinity and sodicity as particular plant/crop stress factors. *In*: PESSARAKLI, M. **Handbook of plant and crop stress**. Boca Raton: CRC, 2019. p. 974.

RAJHATHY, T.; MORRISON, J. W. Genome homology in the genus *Avena*. **Canadian Journal of Genetics and Cytology**, Ottawa, n. 3, p. 278–285, 1960.

RAJHATHY, Tibor. Evidence and an hypothesis for the origin of the C genome of hexaploid *Avena*. **Canadian Journal of Genetics and Cytology**, Ottawa, v. 8, n. 4, p. 774–779, 1966. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/q66-092>. Acesso em: 9 maio 2021.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. Raiz - Estrutura e desenvolvimento. *In*: RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia vegetal**. 8. ed. Campo Grande: Guanabara Koogan, 2014. p. 558–578.

SMIT, A. L. *et al.* Root characteristics: why and what to measure. *In*: SMIT, A. L. *et al.* (org.). **Root methods, a handbook**. New York: Springer, 2000. v. 160, p. 2–32.

Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0168-9452\(00\)00440-4](https://doi.org/10.1016/s0168-9452(00)00440-4). Acesso em: 16 jun. 2021.

STOUVENAKERS, G. *et al.* Plant pathogens and control strategies in aquaponics. *In*: GODDEK, S. *et al.* (org.). **Aquaponics food production systems**. Gembloux: Springer, 2019. p. 353–378. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6>. Acesso em: 18 abr. 2021.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Nutrição mineral. *In*: TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. p. 95–112.

TAVARES, M. J. C. M. S.; ZANETTINI, M. H. B.; CARVALHO, F. I. F. Origem e evolução do gênero *Avena*: suas implicações no melhoramento genético. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 28, n. 4, p. 499–507, 1993.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **World agricultural production**. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 2021. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/>. Acesso em: 20 jan. 2021.

WANG, J. *et al.* Phenotyping and validation of root morphological traits in barley (*Hordeum vulgare* L.). **Agronomy**, Basel, v. 11, n. 8, [art.] 1583, [p. 1-15], 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11081583>. Acesso em: 17 jun. 2021.

WILCOX, C. S. *et al.* Fine root growth dynamics of four Mojave Desert shrubs as related to soil moisture and microsite. **Journal of Arid Environments**, London, v. 56, n.1, p. 129-148, 2004.

ZHOU, X.; JELLEN, E. N.; MURPHY, J. P. Progenitor germplasm of domesticated hexaploid oat. **Crop Science**, Madison, v. 39, n. 4, p. 1208–1214, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X003900040042x>. Acesso em: 8 mar. 2021.

8 APÊNDICES

APÊNDICE 1. Média, desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.) do comprimento de raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

pH	Genótipo	Média (cm)	Desvio padrão (cm)	C.V. (%)
4,5	Altiva	218,09	60,78	27,87
	Corona	168,45	33,24	19,73
	Taura	236,03	58,36	24,73
5,5	Altiva	346,30	76,45	22,08
	Corona	221,94	56,38	25,40
	Taura	268,13	47,15	17,59
6,5	Altiva	236,47	64,68	27,35
	Corona	200,31	43,11	21,52
	Taura	224,73	49,86	22,18

APÊNDICE 2. Média, desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.) da área de raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

pH	Genótipo	Média (cm²)	Desvio padrão (cm²)	C.V. (%)
4,5	Altiva	30,44	6,47	21,25
	Corona	26,61	4,58	17,19
	Taura	30,07	7,29	24,25
5,5	Altiva	40,67	8,59	21,13
	Corona	28,17	5,04	17,88
	Taura	31,47	5,17	16,42
6,5	Altiva	30,00	7,01	23,36
	Corona	26,04	5,55	21,30
	Taura	27,98	5,45	19,47

APÊNDICE 3. Média, desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.) do diâmetro médio de raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

pH	Genótipo	Média (mm)	Desvio padrão (mm)	C.V. (%)
4,5	Altiva	0,45	0,05	11,17
	Corona	0,51	0,04	8,82
	Taura	0,41	0,03	8,38
5,5	Altiva	0,38	0,02	6,39
	Corona	0,41	0,05	11,45
	Taura	0,38	0,02	6,35
6,5	Altiva	0,41	0,03	7,68
	Corona	0,42	0,04	8,96
	Taura	0,40	0,03	7,99

APÊNDICE 4. Média, desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.) do volume de raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

pH	Genótipo	Média (cm³)	Desvio padrão (cm³)	C.V. (%)
4,5	Altiva	0,34	0,06	18,06
	Corona	0,34	0,06	18,15
	Taura	0,31	0,08	26,11
5,5	Altiva	0,38	0,08	22,16
	Corona	0,29	0,05	18,28
	Taura	0,30	0,05	17,40
6,5	Altiva	0,30	0,06	20,66
	Corona	0,27	0,07	24,51
	Taura	0,28	0,06	19,99

APÊNDICE 5. Média, desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.) do número médio de ápices em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

pH	Genótipo	Média	Desvio padrão	C.V. (%)
4.5	Altiva	318,58	76,41	23,99
	Corona	216,28	77,02	35,61
	Taura	262,90	69,77	26,54
5.5	Altiva	481,73	113,47	23,55
	Corona	259,83	87,11	33,52
	Taura	367,25	79,83	21,74
6.5	Altiva	317,58	97,69	30,76
	Corona	212,60	49,54	23,30
	Taura	284,68	75,80	26,63

APÊNDICE 6. Média, desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.) do número de forquilhas radiciais em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

pH	Genótipo	Média	Desvio padrão	C.V. (%)
4.5	Altiva	1308,73	525,31	40,14
	Corona	880,30	237,19	26,94
	Taura	1182,55	535,58	45,29
5.5	Altiva	2248,40	627,97	27,93
	Corona	1332,23	309,42	23,23
	Taura	1654,80	460,78	27,85
6.5	Altiva	1501,65	358,94	23,90
	Corona	1240,25	356,90	28,78
	Taura	1336,38	398,04	29,79

APÊNDICE 7. Média, desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.) do comprimento de raízes (cm) com diâmetro entre 0 e 0,5 mm em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no primeiro experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

pH	Genótipo	Média (mm)	Desvio padrão (cm)	C.V. (%)
4,5	Altiva	166,89	54,87	32,88
	Corona	115,62	27,11	23,44
	Taura	190,22	50,78	26,70
5,5	Altiva	291,12	67,50	23,19
	Corona	177,42	53,97	30,42
	Taura	225,56	43,01	19,07
6,5	Altiva	189,45	55,35	29,22
	Corona	154,34	36,17	23,43
	Taura	182,66	44,12	24,15

APÊNDICE 8. Média, desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.) do comprimento de raízes com diâmetro entre 0,5 e 1,0 mm em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

pH	Genótipo	Média (cm)	Desvio padrão (cm)	C.V. (%)
4,5	Altiva	38,18	7,68	20,11
	Corona	41,55	8,06	19,39
	Taura	36,93	9,35	25,33
5,5	Altiva	41,16	10,19	24,75
	Corona	33,76	6,47	19,17
	Taura	32,56	6,87	21,10
6,5	Altiva	34,60	9,74	28,15
	Corona	35,66	10,59	29,69
	Taura	33,62	8,13	24,17

APÊNDICE 9. Média, desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.) do comprimento de raízes (cm) com diâmetro entre 1,0 e 1,5 mm em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

pH	Genótipo	Média (cm)	Desvio padrão (cm)	C.V. (%)
4.5	Altiva	9,68	3,73	38,51
	Corona	8,48	2,93	34,60
	Taura	6,46	3,03	46,85
5.5	Altiva	9,20	3,47	37,69
	Corona	7,95	3,04	38,24
	Taura	6,65	2,15	32,39
6.5	Altiva	9,08	3,22	35,51
	Corona	7,68	3,29	42,86
	Taura	5,79	2,09	36,13

APÊNDICE 10. Média, desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.) da massa seca média raízes em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

pH	Genótipo	Média (g)	Desvio padrão (g)	C.V. (%)
4,5	Altiva	0,0297	0,0071	24,09
	Corona	0,0260	0,0063	24,15
	Taura	0,0260	0,0062	23,71
5,5	Altiva	0,0318	0,0066	20,73
	Corona	0,0300	0,0050	16,77
	Taura	0,0257	0,0047	18,21
6,5	Altiva	0,0297	0,0064	21,67
	Corona	0,0261	0,0075	28,68
	Taura	0,0275	0,0057	20,62

APÊNDICE 11. Média, desvio padrão e coeficiente de variação (C.V.) da massa seca média parte aérea em três pHs e três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

pH	Genótipo	Média (g)	Desvio padrão (g)	C.V. (%)
4.5	Altiva	0,1154	0,0296	25,69
	Corona	0,1101	0,0171	15,56
	Taura	0,1179	0,0231	19,57
5.5	Altiva	0,1032	0,0293	28,39
	Corona	0,1077	0,0179	16,62
	Taura	0,1250	0,0181	14,51
6.5	Altiva	0,1121	0,0251	22,39
	Corona	0,1145	0,0259	22,62
	Taura	0,1274	0,0219	17,17

APÊNDICE 12. Análise da variância do comprimento total de raízes no pH 4,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	27195	13,53	<0,0001**
Planta (Bloco)	36	2010,03	0,94	0,5655 ^{ns}
Genótipo	2	49018	23,02	<0,0001**
Erro	78	2128,93		
Total	119			

APÊNDICE 13. Análise da variância da área de raízes no pH 4,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	167,55	4,71	0,0071**
Planta (Bloco)	36	35,60	1,01	0,4654 ^{ns}
Genótipo	2	178,08	5,08	0,0085**
Erro	78	35,08		
Total	119			

APÊNDICE 14. Análise da variância do diâmetro médio de raízes no pH 4,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	0,035	54,56	<0,0001**
Planta (Bloco)	36	0,0006	0,56	0,9724 ^{ns}
Genótipo	2	0,099	84,51	<0,0001**
Erro	78	0,001		
Total	119			

APÊNDICE 15. Análise da variância do volume de raízes no pH 4,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	0,0077	1,68	0,1882 ^{ns}
Planta (Bloco)	36	0,0045	1,00	0,4815 ^{ns}
Genótipo	2	0,0143	3,14	0,0489*
Erro	78	0,0045		
Total	119			

APÊNDICE 16. Análise da variância do número de ápices radiciais no pH 4,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	10445	2,28	0,0962 ^{ns}
Planta (Bloco)	36	4585,89	0,79	0,7803 ^{ns}
Genótipo	2	104926	18,09	<0,0001**
Erro	78	5800,68		
Total	119			

APÊNDICE 17. Análise da variância do número de forquilhas radiciais no pH 4,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	3948179	49,32	<0,0001**
Planta (Bloco)	36	80054	0,66	0,9132 ^{ns}
Genótipo	2	1938821	16,06	<0,0001**
Erro	78	120722		
Total	119			

APÊNDICE 18. Análise da variância do comprimento de raízes com diâmetro entre 0 e 0,5 mm no pH 4,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no primeiro experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	26120	18,04	<0,0001**
Planta (Bloco)	36	1447,92	0,97	0,5250 ^{ns}
Genótipo	2	58252	39,12	<0,0001**
Erro	78	1489,10		
Total	119			

APÊNDICE 19. Análise da variância do comprimento de raízes com diâmetro entre 0,5 e 1,0 mm no pH 4,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pHs.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	59,81	0,90	0,4522 ^{ns}
Planta (Bloco)	36	66,68	0,92	0,6020 ^{ns}
Genótipo	2	229,00	3,16	0,0481*
Erro	78	72,55		
Total	119			

APÊNDICE 20. Análise da variância da massa seca raízes no pH 4,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	0,00026	8,41	0,0002**
Planta (Bloco)	36	0,00003	0,81	0,7486 ^{ns}
Genótipo	2	0,00018	4,60	0,0129*
Erro	78	0,00003		
Total	119			

APÊNDICE 21. Análise da variância do comprimento total de raízes no pH 5,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	17768	11,21	<0,0001**
Planta (Bloco)	36	1584,72	0,38	0,9992 ^{ns}
Genótipo	2	158055	37,56	<0,0001**
Erro	78	4208,02		
Total	119			

APÊNDICE 22. Análise da variância da área de raízes no pH 5,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	114,38	4,41	0,0097**
Planta (Bloco)	36	25,95	0,56	0,9730 ^{ns}
Genótipo	2	1677,51	36,00	<0,0001**
Erro	78	46,59		
Total	119			

APÊNDICE 23. Análise da variância do diâmetro médio de raízes no pH 5,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	0,0071	10,75	<0,0001**
Planta (Bloco)	36	0,0006	0,60	0,9531 ^{ns}
Genótipo	2	0,0181	16,44	<0,0001**
Erro	78	0,0011		
Total	119			

APÊNDICE 24. Análise da variância do volume de raízes no pH 5,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	0,0061	1,74	0,1768 ^{ns}
Planta (Bloco)	36	0,0035	0,80	0,7667 ^{ns}
Genótipo	2	0,1075	24,36	<0,0001**
Erro	78	0,0044		
Total	119			

APÊNDICE 25. Análise da variância do número de ápices radiciais no pH 5,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	55671	16,31	<0,0001**
Planta (Bloco)	36	3411,98	0,35	0,9996 ^{ns}
Genótipo	2	492562	50,77	<0,0001**
Erro	78	9701,55		
Total	119			

APÊNDICE 26. Análise da variância do número de forquilhas radiciais no pH 5,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	1767783	12,39	<0,0001**
Planta (Bloco)	36	142625	0,66	0,9186 ^{ns}
Genótipo	2	8638615	39,74	<0,0001**
Erro	78	217387		
Total	119			

APÊNDICE 27. Análise da variância do comprimento de raízes com diâmetro entre 0 e 0,5 mm no pH 5,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no primeiro experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	16046	12,57	<0,0001**
Planta (Bloco)	36	1276,39	0,37	0,9993 ^{ns}
Genótipo	2	130279	37,73	<0,0001**
Erro	78	3453,09		
Total	119			

APÊNDICE 28. Análise da variância do comprimento de raízes com diâmetro entre 0,5 e 1,0 mm no pH 5,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pHs.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	93,73	2,21	0,1042 ^{ns}
Planta (Bloco)	36	42,49	0,58	0,9636 ^{ns}
Genótipo	2	866,43	11,84	<0,0001**
Erro	78	73,18		
Total	119			

APÊNDICE 29. Análise da variância da massa seca raízes no pH 5,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	0,000009	0,29	0,8288 ^{ns}
Planta (Bloco)	36	0,000030	1,00	0,4836 ^{ns}
Genótipo	2	0,000397	12,91	<0,0001 ^{**}
Erro	78	0,000030		
Total	119			

APÊNDICE 30. Análise da variância do comprimento total de raízes no pH 6,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	39326	26,27	<0,0001 ^{**}
Planta (Bloco)	36	1497,17	0,73	0,8545 ^{ns}
Genótipo	2	13609	6,61	0,0022 ^{**}
Erro	78	2059,85		
Total	119			

APÊNDICE 31. Análise da variância da área de raízes no pH 6,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	380,53	17,56	<0,0001 ^{**}
Planta (Bloco)	36	21,67	0,72	0,8625 ^{ns}
Genótipo	2	156,79	5,20	0,0076 ^{**}
Erro	78	30,13		
Total	119			

APÊNDICE 32. Análise da variância do diâmetro médio de raízes no pH 6,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	0,015	28,92	<0,0001 ^{**}
Planta (Bloco)	36	0,0005	0,60	0,9540 ^{ns}
Genótipo	2	0,0028	3,31	0,0417 [*]
Erro	78	0,0008		
Total	119			

APÊNDICE 33. Análise da variância do volume de raízes no pH 6,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	0,0302	12,57	<0,0001**
Planta (Bloco)	36	0,0024	0,69	0,8882 ^{ns}
Genótipo	2	0,0119	3,45	0,0366*
Erro	78	0,0034		
Total	119			

APÊNDICE 34. Análise da variância do número de ápices radiciais no pH 6,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	76529	41,96	<0,0001**
Planta (Bloco)	36	1823,82	0,36	0,9995 ^{ns}
Genótipo	2	115313	22,67	<0,0001**
Erro	78	5086,15		
Total	119			

APÊNDICE 35. Análise da variância do número de forquilhas radiciais no pH 6,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	310697	2,69	0,0607 ^{ns}
Planta (Bloco)	36	115496	0,81	0,7513 ^{ns}
Genótipo	2	699239	4,92	0,0097**
Erro	78	142071		
Total	119			

APÊNDICE 36. Análise da variância do comprimento de raízes com diâmetro entre 0 e 0,5 mm no pH 6,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no primeiro experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	28625	25,57	<0,0001**
Planta (Bloco)	36	1119,49	0,73	0,8553 ^{ns}
Genótipo	2	13873	9,00	0,0003**
Erro	78	1541,71		
Total	119			

APÊNDICE 37. Análise da variância do comprimento de raízes com diâmetro entre 0,5 e 1,0 mm no pH 6,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pHs.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	965,32	19,82	<0,0001**
Planta (Bloco)	36	48,70	0,63	0,9347 ^{ns}
Genótipo	2	41,61	0,54	0,5842 ^{ns}
Erro	78	76,90		
Total	119			

APÊNDICE 38. Análise da variância da massa seca raízes no pH 6,5 em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	0,00017	4,40	0,0098**
Planta (Bloco)	36	0,00003	1,01	0,4786 ^{ns}
Genótipo	2	0,00013	3,36	0,0398*
Erro	78	0,00003		
Total	119			

APÊNDICE 39. Análise da variância do comprimento de raízes com diâmetro entre 1,0 e 1,5 mm nos três pHs testados em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	10,38	1,47	0,2381 ^{ns}
Planta (Bloco)	36	7,04	0,74	0,8584 ^{ns}
pH	2	14,40	6,70	0,0529 ^{ns}
Genótipo	2	275,06	127,92	0,0002**
pH*Genótipo	4	2,15	0,23	0,9232 ^{ns}
Erro	312	9,48		
Total	359			

APÊNDICE 40. Análise da variância da massa seca parte aérea nos três pHs testados em três genótipos de aveia, em solução nutritiva, no experimento com uso de tampão MES e ajuste diário do pH.

Causas de variação	GL	QM	Valor F	Pr>F
Bloco	3	0,0081	32,04	<0,0001**
Planta (Bloco)	36	0,0002	0,49	0,9945 ^{ns}
pH	2	0,0011	1,13	0,4077 ^{ns}
Genótipo	2	0,0067	6,96	0,0499*
pH*Genótipo	4	0,0010	1,87	0,1148 ^{ns}
Erro	312	0,0005		
Total	359			