



THAÍS MELO DA FONSECA

**RESTRIÇÃO HÍDRICA INDUZ CRESCIMENTO DE SISTEMA
RADICULAR EM MUDAS DE *Coffea arabica* L. TOLERANTES À
SECA**

**Lavras-MG
2019**

THAÍS MELO DA FONSECA

**RESTRIÇÃO HÍDRICA INDUZ CRESCIMENTO DE SISTEMA RADICULAR EM
MUDAS DE *Coffea arabica* L. TOLERANTES À SECA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori

COORIENTADORA: Dra. Vânia Aparecida Silva

**Lavras-MG
2019**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Fonseca, Thaís Melo da.

Restrição hídrica induz crescimento de sistema radicular em
mudas de *Coffea arabica* L. tolerantes à seca / Thaís Melo da
Fonseca. - 2019.

63 p. : il.

Orientador(a): Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori.

Coorientador(a): Vânia Aparecida Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Déficit hídrico. 2. Rizotron. 3. Mapeamento radicular I.
Marchiori, Paulo Eduardo Ribeiro. II. Silva, Vânia Aparecida. III.
Título.

THAÍS MELO DA FONSECA

**RESTRIÇÃO HÍDRICA INDUZ CRESCIMENTO DE SISTEMA RADICULAR EM
MUDAS DE *Coffea arabica* L. TOLERANTES À SECA**

**WATER RESTRICTION PROMOTES GROWTH OF ROOT SYSTEM OF *Coffea*
arabica L. TOLERANT TO DROUGHT**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, para obtenção do título em Mestre.

Aprovada em 30 de Setembro de 2019

Prof. Dr. Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori (UFLA)

Dra. Vânia Aparecida Silva (EPAMIG)

Dr. Erick Espinoza Núñez (Universidad Nacional Agraria La Molina)

Prof. Dr. Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori

Orientador

**LAVRAS-MG
2019**

*À minha mãe Leila por toda dedicação, apoio e incentivo.
Ao meu pai Jonas por contribuir em cada etapa e apoiar.*
DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por permitir participar de mais uma experiência acadêmica, pela oportunidade de ganhar mais sabedoria e principalmente pela realização deste trabalho.

A minha mãe, por toda dedicação e oração durante toda a minha vida acadêmica e ao meu pai por todo apoio.

A meu namorado Wander, por toda paciência, carinho e incentivo durante as horas de alegria e aflição e por ter-me apoiado em todas as decisões durante esses últimos tempos.

À Universidade Federal de Lavras - UFLA, ao Departamento de Biologia – Setor de Fisiologia Vegetal.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, pela oportunidade de realização deste curso.

Ao professor Dr. Paulo Eduardo Ribeiro Marchiori, pela orientação, amizade e apoio durante esses dois últimos anos.

A minha coorientadora Dra. Vânia Aparecida Silva, pelo incentivo, apoio e disposição em todos os momentos.

Aos meus amigos Daniele, Givanildo, Carina, Kamila pela ajuda ao longo da realização deste e de outros trabalhos.

Aos amigos da Fisiologia Antonia, Josyelem e Paulo Cássio, Layane, Anne Marcela, Wesley e Patrícia, e a turma do “Coffee do Lev” por todas as horas de trabalho, pela sincera amizade, por todos os cafezinhos momentos de descontração.

As meninas Danielle e Stefanie por toda alegria descontração e apoio e também, por terem transformado Lavras em um lugar melhor de se viver.

Aos funcionários Joel, Odorêncio e Salete pelo cuidado e carinho de sempre.

A Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) pela concessão dos materiais de estudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da EPAMIG- Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais e pela CAPES- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram, oraram e torceram para que no final tudo desse certo.

Muito obrigada!

*“O Senhor é meu pastor e nada me faltará...
Certamente bondade e misericórdia me seguirão todos
os dias de minha vida”. Sl 23:1,6*

RESUMO

O estresse hídrico prejudica as plantas de café em todas as fases de crescimento, destacando-se o primeiro ano após o transplântio. Identificar estratégias de tolerância à seca de genótipos de *Coffea arabica*, como o maior crescimento radicular; pode auxiliar na seleção precoce de plantas em programas de melhoramento genético do cafeeiro, antecipando o processo de seleção a partir da fase de mudas. Diante disso, este trabalho teve como objetivo testar dois materiais promissores presentes no Programa de Melhoramento Genético da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais – EPAMIG, esses foram submetidos a eventos de seca-reidratação. Testaram-se os genótipos G07 e G19, que em campo apresentaram uma maior tolerância à seca, comparados a outros genótipos altamente explorados no Brasil, o Catiguá e o Catuaí. Os quatro materiais foram transplantados em recipientes do tipo rizotrons com capacidade de 22 litros, a fim de possibilitar a avaliação e caracterização da morfologia e crescimento radicular durante os eventos de seca-reidratação. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso em esquema fatorial [4x3; quatro genótipos, três condições hídricas], considerando n=4. As três condições hídricas impostas foram: referência (sem restrição hídrica); exposição a um ciclo de restrição hídrica e posterior reidratação e exposição a dois ciclos de restrição hídrica seguidos de reidratação. Foram realizadas duas coletas destrutivas, uma em condição de estresse hídrico e outra após a reidratação. Durante o período experimental foram avaliados o potencial hídrico, teor relativo de água, trocas gasosas, parâmetros biométricos, carboidratos solúveis e insolúveis nas folhas e raízes e crescimento e morfologia do sistema radicular. Para este último parâmetro foram usadas imagens tiradas do rizotron e avaliadas com auxílio do software ArcGIS®. O estresse hídrico induziu a redução do potencial hídrico e do teor relativo de água nos quatro genótipos, assim como redução na fotossíntese, transpiração e abertura estomática. Os parâmetros biométricos foram semelhantes entre o Catiguá, G07 e G19, contudo o Catuaí apresentou alteração na produção de ramos ladrões, com a imposição dos tratamentos de restrição hídrica em comparação ao tratamento de referência. Os genótipos G07 e G19 se destacaram entre os demais com a imposição dos ciclos, apresentando maior desenvolvimento do sistema radicular e manutenção da matéria seca. Este fato sugere que a expressão precoce de características de tolerância à seca pode ser usada na seleção do melhoramento de plantas, uma vez que o maior desenvolvimento radicular é uma característica altamente desejável no melhoramento de *C. arabica*.

ABSTRACT

Drought stress damages coffee plants in all growth stages, especially just after transplantation to field. Identify strategies of drought stress tolerance in genotypes of *Coffea arabica*, may supply useful information for plant breeding selection programs, aiming to improve productivity even under repeated drought events. Considering this, the present study aimed to test two different materials from Plant Breeding Program of EPAMIG. These genotypes, G07 and G19, which had showed drought tolerance under field conditions, were tested. As a reference, we compared to other genotypes highly exploited in Brazil, namely Catiguá and Catuaí. All young plants of the four different materials were planted in rizotron, with capacity of 22L, aiming to evaluate and characterize the root morphology and growth during periods of drought and rehydration. The experimental design was randomized blocks [4x3; four genotypes and three water conditions, considering $n = 4$] regarding two samplings, resulting in 96 plants. The plants were kept under three water conditions: reference (no water restriction); subjected to a single water restriction cycle and subsequent rehydration; and two water restriction cycles followed by rehydration. For each treatment, two destructive sampling were performed: one under the stress phase and one after rehydration. During the experiment the following parameters were evaluated: water potential, relative water content, gas exchange, biometric parameters, soluble and insoluble carbohydrates in the leaves and roots, and growth and morphology of the root system. For the last parameter, images taken from rhizotron were analyzed with ArcGIS® software. Drought stress induced a reduction in water potential and relative water content for all four genotypes, as well as a reduction in photosynthesis, transpiration and stomatal conductance. Biometric parameters were similar between Catiguá, G07 and G19, however, Catuaí presented changes in the formation of new shoots at the base of the plant, comparing the treatments with water restriction to the reference treatment. Genotypes G07 and G19 showed better performance than the reference genotypes in response to the water restriction cycles, demonstrating greater root system development and dry matter maintenance. This suggests that early tolerance characteristics expression, mainly in the first year after transplantation, may be used in plant breeding selection, once a greater root development is a highly desirable trait in improvement of *Coffea arabica*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do modelo de rizotron utilizado, indicando as três áreas seccionadas no mapeamento de imagens seguido da demonstração do posicionamento e angulação (45°), estabelecidos.	25
Figura 2 - Representação dos tratamentos estabelecidos.	26
Figura 3 - Representação da curva de calibração dos sensores de umidade do solo, a saturação do solo aferida foi em 3500ml de acordo com o eixo x (volume de água).	27
Figura 4 - Valores de Temperatura (C°) máxima, mínima e a média diária no eixo primário, representadas pelas linhas contínuas em vermelho, azul e amarelo respectivamente. Umidade relativa (UR, %) no eixo secundário, representada pela preta tracejada. Os dois ciclos de restrição hídrica são indicados pelos retângulos alaranjados.	28
Figura 5 - Representação das áreas seccionadas para análise de imagem das raízes presentes nos rizotrons.	32
Figura 6 - Umidade do solo (%) durante o período experimental, os ciclos de restrição hídrica (C1 e C2) são indicados pelos retângulos alaranjados. O primeiro ciclo (C1) ocorreu partir do 20° até o 45° dia seguido de reidratação, enquanto o segundo ciclo (C2) foi realizado 75° até o 105° dia.	33
Figura 7 - Teor relativo de água (TRA). ^{7.1} TRA no primeiro ciclo de restrição hídrica - C1. ^{7.2} TRA na primeira reidratação após C1. ^{7.3} TRA no segundo ciclo de restrição hídrica- C2. ^{7.4} TRA após a segunda reidratação C2. Os valores são as médias ± desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos tratamentos. Letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, (p < 0,05).	34
Figura 8 - Condutância estomática (gs), aferida durante a restrição hídrica nos tratamentos de um ciclo de restrição hídrica- C1, e dois ciclos de restrição hídrica-C2, em relação às plantas de referência. Os valores são as médias ± desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, (p < 0,05).	37
Figura 9 - Taxa de assimilação líquida de carbono (A), aferida durante a restrição hídrica nos tratamentos de um ciclo de restrição hídrica- C1, e dois ciclos de restrição hídrica-C2, em relação às plantas de referência. Os valores são as médias ± desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, (p < 0,05).	37
Figura 10 – Taxa transpiratória (E), aferida durante a restrição hídrica nos tratamentos de um ciclo de restrição hídrica- C1, e dois ciclos de restrição hídrica-C2, em relação às plantas de referência. Os valores são as médias ± desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, (p < 0,05).	38
Figura 11 - Uso e eficiência da água (EUA), aferida durante a restrição hídrica nos tratamentos de um ciclo de restrição hídrica- C1, e de ciclos de restrição hídrica-C2, em relação às plantas de referência. Os valores são as médias ± desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, (p < 0,05).	38
Figura 12 - ^{12.1} Teor de amido em folhas coletadas em restrição hídrica, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação	

às plantas de referência. ^{12.2} Teor de amido em folhas coletas após a reidratação, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias ± desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, (p < 0,05).	39
Figura 13 – ^{13.1} Teor de sacarose em folhas coletadas em restrição hídrica, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. ^{13.2} Teor de sacarose em folhas coletas após a reidratação, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias ± desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, (p < 0,05).	40
Figura 14 – ^{14.1} Teor de açúcares redutores- AR em folhas coletadas em restrição hídrica, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. ^{14.2} Teor de açúcares redutores-AR em folhas coletas após a reidratação, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias ± desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, (p < 0,05).	40
Figura 15- ^{15.1} Teor de amido em raízes coletadas em restrição hídrica, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. ^{15.2} Teor de amido em raízes coletas após a reidratação, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias ± desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, (p < 0,05).	41
Figura 16- ^{16.1} Teor de sacarose em raízes coletadas em restrição hídrica, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. ^{16.2} Teor de sacarose em raízes coletas após a reidratação, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias ± desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, (p < 0,05).	42
Figura 17- ^{17.1} Teor de açúcares redutores- AR em raízes coletadas em restrição hídrica, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. ^{17.2} Teor de açúcares redutores-AR em raízes coletas após a reidratação, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias ± desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, (p < 0,05).	43

Figura 18 - Volume final de raiz após a imposição dos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias ± desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).	49
Figura 19 - Área final do sistema radicular, presente nas três regiões seccionadas (5-20cm, 36-20cm, 36-52cm) após a imposição dos tratamentos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias ± desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença cada tratamento dentro da mesma área de secção no perfil do solo. Letras minúsculas indicam a comparação entre as três áreas seccionadas dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).	50
Figura 20 - Área total do sistema radicular, após a imposição dos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias ± desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).	52
Figura 21 - Catiguá MG3 nas três condições hídricas impostas: Referência, um ciclo de restrição hídrica- C1 e dois ciclos de restrição hídrica - C2.....	52
Figura 22 - Catuaí 144- nas três condições hídricas impostas: Referência, um ciclo de restrição hídrica- C1 e dois ciclos de restrição hídrica - C2.....	53
Figura 23 - G07 nas três condições hídricas impostas: Referência, um ciclo de restrição hídrica- C1 e dois ciclos de restrição hídrica - C2.....	53
Figura 24 - G19 nas três condições hídricas impostas: Referência, um ciclo de restrição hídrica- C1 e dois ciclos de restrição hídrica - C2.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise química do substrato utilizado durante o experimento (mistura de areia e solo na proporção 1:1)	24
Tabela 2 - Potencial hídrico na antemanhã Ψ_{am} (MPa) e meio-dia $\Psi_{12:00}$ (Mpa). Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas na mesma linha indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos. Letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).	36
Tabela 3 – Biometria final nos tratamentos impostos (C1 e C2) em relação às plantas de referência. Os valores são médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas na mesma linha indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).	45
Tabela 4 - Partição de Biomassa nos tratamentos impostos (C1 e C2) em relação às plantas de referência, nas coletas realizadas em restrição hídrica e após a reidratação. Os valores são médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas na mesma linha indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).	47
Tabela 5 - Biomassa total e Razão raiz/Parte aérea nos tratamentos impostos (C1 e C2) em relação às plantas de referência, nas coletas realizadas em restrição hídrica e após a reidratação. Os valores são médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas na mesma linha indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Influência da restrição hídrica em café	18
2.2	Influência da seca na produção de açúcares solúveis e insolúveis	19
2.3	Sistema radicular do cafeeiro	20
2.4	Mapeamento de raízes de café Arábica	21
2.5	Melhoramento e características dos materiais estudados.....	22
2.5.1	<i>Genótipo Catiguá MG3</i>	22
2.5.2	<i>Cultivar Catuaí Vermelho 144</i>	23
2.5.3	<i>Genótipo 07</i>	23
2.5.4	<i>Genótipo 19</i>	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1	Delineamento experimental	25
3.2	Determinação da umidade do solo, e estabelecimento das restrições hídricas	27
3.3	Conteúdo relativo de água (CRA).....	28
3.4	Potencial hídrico	29
3.5	Trocas gasosas.....	29
3.6	Eficiência e uso da água (EUA)	30
3.7	Determinação da concentração de carboidratos.....	30
3.8	Análises biométricas e parâmetros agrônômicos.....	31
3.9	Metodologia de determinação de matéria seca	31
3.10	Mapeamento de raízes.....	32
3.11	Análises estatísticas	32
4	RESULTADOS	32
4.1	Potencial hídrico	35
4.2	Trocas gasosas.....	36
4.3	Carboidratos em folha	39
4.4	Carboidratos em raiz	41
4.5	Análises biometrias.....	44
4.6	Matéria seca	46
4.7	Matéria seca total.....	48
4.8	Volume final de raiz	48

4.9	Crescimento de raízes sob ciclos de redução hídrica	49
5	DISCUSSÃO.....	55

1.1 INTRODUÇÃO

O interesse mundial pela produção do *Coffea arabica* aumentou significativamente nos últimos anos, devido à busca por uma bebida suave e de maior padrão gustativo (MARTINS, 2019). A produção do café arábica alcançou 104 milhões de sacas em 2018/19, com superávit de 2,3 milhões de sacas em relação ao ano anterior (EMBRAPA, 2019). Contudo, por ser uma espécie perene, vivenciam em campo variações ambientais limitantes para seu desenvolvimento, principalmente nas novas regiões de expansão cafeeira, onde o déficit hídrico associado a elevadas temperaturas são fatores ambientais, presentes durante boa parte do ano agrícola (DAMATTA & RAMALHO, 2006; DAMATTA, 2019).

Entre os fatores ambientais que reduzem o potencial produtivo e o desenvolvimento da planta em campo, destacam-se episódios de seca. Estes, quando presentes em momentos de maior susceptibilidade, como o primeiro ano após o transplante podem causar danos irreversíveis, como a senescência antecipada (MENEZES-SILVA, 2017; MARTINS, 2019). As plantas, expostas a períodos de restrição hídrica, apresentam como primeira resposta, a redução estomática, fato que visa ao controle do status-hídrico, e à manutenção da integridade e à homeostase celular. A redução estomática, como consequência direta, induz a diminuição das trocas gasosas, levando ao menor influxo de CO₂ para dentro dos cloroplastos. Esse fato resulta na redução da produção de carboidratos por meio dos substratos advindos da fotossíntese e afeta a capacidade de gerar hexoses para a manutenção e para formação de novos tecidos (EPRON & DREYER, 1993; FLEXAS, 2004; MENEZES-SILVA, 2014).

Contudo, plantas tolerantes à seca quando expostas a ciclos de restrição hídrica podem apresentar alterações nos padrões de partição de fotoassimilados, enviando-os para a formação de novos tecidos adaptados a condição restritiva. Esses novos tecidos podem expor características morfológicas marcantes como o maior desenvolvimento do sistema radicular. Raízes maiores e mais profundas são evidenciadas em muitas espécies, inclusive em mudas de *Coffea canephora* e em alguns genótipos tolerantes de *Coffea arabica* (PEREIRA, 2018). Uma maior proporção de tecido radicular é considerada uma forte característica fenotípica e morfológica no melhoramento de plantas de *C. arabica*, especialmente em materiais tolerantes à seca (DAMATTA & RAMALHO, 2006; PEREIRA, 2018). O sistema radicular mais desenvolvido pode interferir na interceptação de água em perfis mais profundos do solo e servir também como fonte de reserva temporária de amido (DAMATTA, 2007; MELO, 2008

No entanto, as respostas do sistema radicular das plantas de *C. arabica* a ciclos de restrição hídrica ainda é pouco explorada; e os estudos morfológicos presentes se dão em plantas adultas já estabelecidas e influenciadas por variáveis em campo, necessitando uma ampliação de conhecimento a respeito do desenvolvimento das raízes de *C. arabica* (PEREIRA, 2018).

Uma alternativa para o acompanhamento do desenvolvimento de raízes em plantas jovens é o cultivo em rizotrons, pois esses recipientes possuem uma janela de vidro que possibilita a visualização do sistema radicular, sem interferência direta na rizosfera. O transplântio de mudas de cafeeiro para rizotrons também auxilia na resolução de um problema que afeta muitos trabalhos, o volume de solo limitado que influi no acúmulo de raízes nos vasos. As plantas cultivadas em rizotrons apresentam crescimento do sistema radicular de modo rente ao vidro, direcionadas a um perfil de solo de maior profundidade, minimizando o acúmulo e sobreposição de raízes, fato que pode alterar as relações fonte-dreno, mascarando as respostas obtidas na parte aérea (POORTER, 2011).

As janelas de vidro dos rizotrons possibilitam a obtenção de imagens adequadas para muitos softwares utilizados na agricultura como o arcGIS®. Essas imagens podem ser georreferenciadas, aferindo-se à área ocupada por raízes e arquitetura da distribuição no solo. A observação e o mapeamento do crescimento inicial das raízes de *C. arabica* podem auxiliar na antecipação da seleção de plantas; pois o processo poderá ocorrer na fase inicial, enquanto as plantas ainda são consideradas mudas. A eficácia do processo poderá ser testada a partir do isolamento dessa característica morfológica em questão, e conseqüentemente, na contabilização da influência da morfologia de raiz.

Estudos que avaliam o crescimento do sistema radicular, em meio ao perfil de solo, mostram-se altamente eficazes e auxiliam a caracterização de muitas espécies tolerantes, podendo ser utilizado como ferramenta para acelerar a seleção de espécies perenes como o *C. arabica* (MARCOS, 2018). Diante disso, esse trabalho teve como objetivo central estudar o desenvolvimento inicial radicular de *C. arabica*, através do mapeamento de imagens. Foram selecionadas mudas em fase de transplântio de quatro materiais: os dois primeiros são genótipos em fase de melhoramento do Programa de Melhoramento Genético da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais – EPAMIG - (G07, G19) que, em campo, apresentam alta tolerância à seca e mostram um desenvolvimento de raízes visualmente elevadas. Os outros dois genótipos foram utilizados como referência, pois foram amplamente estudados e são muito utilizados em plantios comerciais (Catuaí Vermelho 144 e o Catiguá MG3).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Influência da restrição hídrica em café

O café foi introduzido no Brasil em 1727, desde então, tem sido uma das culturas de maior aporte econômico no país, pois o seu cultivo correlaciona o desenvolvimento da indústria e do campo (FRAGA, 1963; MELO, 2008). A produção mundial é baseada em duas espécies pertencentes ao gênero *Coffea*, o *C. arabica* L. (café Arábica) e o *C. canephora* (café Robusta). Contudo a produção do café Arábica se destaca, alcançando 80% de todo produto consumido no mundo (DAMATTA, 2019). Estima-se que, somente no Brasil, a safra de 2018/19 atinja 62 milhões de sacas, e que a movimentação de toda cadeia produtiva no mundo renda cerca de 173 bilhões de dólares ao ano (IOC, 2014; CONAB, 2019; MARTINS, 2019).

A maior concentração de cultivo do cafeeiro está localizada na zona intertropical, que se estende de latitude de 25° N no Havá a 24° S no Brasil. Essa região é marcada por irregularidade de distribuição de chuvas, luz e temperatura entre as estações do ano, fato que afeta diretamente na produção cafeeira (DAMATTA, 2018). Dentre os fatores ambientais abióticos e bióticos, o déficit-hídrico é o maior limitante do crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas no mundo (LICHTENTHALER, 1998; MENEZES-SILVA 2017).

Com previsões atuais que sinalizam o aquecimento global nas próximas décadas, o aumento dos períodos de seca, certamente acompanhará esse fenômeno, e faz com que sejam necessárias adaptações ao cultivo agrícola. Uma vez que está prevista a elevação populacional para ~9,7 bilhões de pessoas em 2050, concomitantemente, o consumo do café se elevará, isso faz com que alternativas para a redução da irrigação seja cada vez mais necessária (IPCC, 2014; DAMATTA, 2018).

Em anos em que a safra passa por períodos prolongados de estiagem há registros de diminuições acentuadas no rendimento, que pode chegar a 80%, em regiões marginais sem irrigação no estado de Minas Gerais, Brasil (DAMATTA & RAMALHO, 2006). A baixa disponibilidade hídrica no solo é limitante ao crescimento e manutenção das plantas. Sabe-se que o cultivo tradicional, sem uso de irrigação para maioria das espécies perenes, passa por ciclos de restrição hídrica em meio às estações chuvosas, os chamados veranicos. Contudo essas etapas têm aumentado à repetição/frequência e a duração ao longo do verão, assim como foi observado no Brasil e nas demais regiões tropicais em 2014 (MARTINS, 2019). A aclimação das plantas às variáveis hídricas necessita de uma série de características fisiológicas, e conhecê-las assim como caracterizá-las pode auxiliar em ganhos finais de biomassa (MARCOS, 2018).

O estresse hídrico pode prejudicar as plantas de café em todas as fases fenológicas, contudo, as fases mais susceptíveis são aquelas em que há um desequilíbrio entre a distribuição de carboidratos de tecidos-fonte (em sua maioria folhas completamente expandidas) e tecidos-dreno (folhas jovens, frutos e tecidos em formação) (DAMATTA, 2018). Esse desequilíbrio ocorre devido à redução na condutância estomática, que limita a entrada de CO₂ nas células, fato que proporciona a redução do carbono advindo da fotossíntese, que prioritariamente seria translocado aos tecidos em formação. Isso faz com que a planta utilize todo carbono armazenado para sua sobrevivência. Sob essas condições, são induzidas características fenotípicas pronunciadas, como a queda de folhas, morte de galhos e ponteiros, má formação de folhas e frutos jovens e em períodos de estresse severo redução do sistema radicular nas plantas mais sensíveis.

A imposição de ciclos de seca em plantas jovens favorece a eficiência no uso da água, que no geral é baixa para o cafeeiro, devido às altas taxa de transpiração. As plantas submetidas a episódios de restrição hídrica apresentam maior eficiência no uso da água, economizando até 50% do volume necessário para sobrevivência e produção, em comparação a plantas irrigadas (TESFAYE, 2013).

2.2 Influência da seca na produção de açúcares solúveis e insolúveis

O déficit-hídrico pode causar vários efeitos no metabolismo da planta. A primeira resposta é o controle da transpiração, por meio da redução na condutância estomática, que a curto-prazo influencia diretamente o potencial hídrico e o transporte de solutos. Sob condições mais severas, a redução da condutância estomática (gs) restringe diretamente a difusão do CO₂ para o mesófilo foliar, o que conduz ao desequilíbrio entre as relações fotoquímicas e bioquímicas da fotossíntese (ALVES, 2011; DAMATTA, 2018; ANDRADE, 2019).

Sob condições ambientais favoráveis a planta realiza a fotossíntese acumulando carboidratos não estruturais, sendo os mais comuns os açúcares solúveis redutores e não-redutores, além de amido. Entre os açúcares solúveis redutores se destacam a glicose e a frutose e os não-redutores a sacarose. Durante o processo fotossintético uma parte dos carboidratos produzidos é armazenada de modo temporário na própria folha na forma de amido, e será utilizada no período noturno, uma vez que, a energia advinda da fotossíntese nesse momento está reduzida. Esses carboidratos em condições ambientais adequadas são

rapidamente consumidos. Em contrapartida, em condição de estresse há uma alteração nos padrões fonte-dreno para a utilização desses açúcares (TAIZ, 2017).

Os carboidratos solúveis (frutose, glicose) são utilizados na regulação osmótica, enquanto a sacarose é utilizada como sinalizadora para alterações na expressão gênica de proteínas para adaptações fisiológicas. Os insolúveis (amido) presentes nos tecidos de reserva são quebrados em açúcares menores para a manutenção do metabolismo (TAIZ, 2017).

2.3 Sistema radicular do cafeeiro

O sistema radicular do cafeeiro é considerado altamente moldável ao ambiente, a idade da planta, ao perfil de solo, bem como, as estações do ano. A introdução do déficit hídrico em mudas pode influenciar o fenótipo das raízes em sua fase adulta. Uma vez que os meses de seca induzem o crescimento de raízes em perfis mais profundos, chegando a alcançar 0,70 metros, ao mesmo tempo, em que é decrescido o desenvolvimento da parte aérea (HUXLEY, 1974; DAMATTA, 2007). Em contrapartida estresses hídricos muito severos, em que as plantas apresentam potencial hídrico menores que -3,0 MPa na antemã apresentaram reduções significativas do volume radicular, indicando uma possível remobilização de carboidratos para a biossíntese de tecidos (DAMATTA, 2019).

A preparação tradicional das mudas de café consiste em fornecer água e sombra em casas de vegetação. Contudo, esse processo em conjunto com as características genéticas do cafeeiro, ocasiona a produção de mudas extremamente sensíveis à exposição de irradiação solar direta e à seca após o transplante para condições de campo (DAMATTA, 2018). A produção de mudas expostas diretamente à luz solar vem se mostrando bem sucedidas, em comparação a homólogos cultivados à sombra, pois essas plantas apresentam um desempenho superior, com menor dano fotooxidativo. Em contrapartida, a produção de mudas que são expostas a períodos de estresse hídrico ainda é baixa, contudo alguns grupos de pesquisa sugerem que a simulação de ciclos restrição hídrica, antes de transplantá-las, aumenta a sobrevivência inicial em campo ao induzir ao aumento da produção de raízes (DAMATTA, 2018; MENEZES-SILVA 2017; MARTINS, 2019). De acordo com DaMatta (2018), essas plantas de café podem desenvolver em meio a repetição desses eventos de seca, características que as permitam ter uma aclimação diferenciada, potencializando mecanismos de defesa.

Sabe-se que o *C. canephora* é altamente relatado pela literatura por apresentar maior tolerância à seca. Em experimentos realizados em campo com o *C. arabica* cv. Catuaí enxertado em Apoatã (*C. canephora*) foi observado aumentos consideráveis na razão raiz e

parte aérea (FAHL, 1998). Além de apresentarem taxas de trocas gasosas três vezes superiores, comparadas as plantas não enxertadas, durante a estação de seca no sudeste do Brasil, conferindo ao tratamento enxertado características de tolerância à seca, ao aprofundar-se mais no solo (DAMATTA & RAMALHO 2006).

A expressão de características funcionais das plantas é vista como vantagem para a sobrevivência e manutenção da produção, em condições ambientais adversas (MARCHIORI, 2014). Um maior desenvolvimento de raízes em cultivares tolerantes de *C. arabica* pode vir a demonstrar que essa mudança de caractere morfológico é desencadeada por influência climática como a seca (DAMATTA, 2007).

2.4 Mapeamento de raízes de café Arábica

Os primeiros registros de estudos do sistema radicular foram realizados pelo ecologista JE Weaver (1919) e se baseavam principalmente em escavar o solo para ter acesso às raízes e medir manualmente seu peso, comprimento e replicar por meio de desenhos. Os esboços e traços manuais das raízes ainda são úteis, mas esses métodos consomem muito tempo e são subjetivos (DOWNIE, 2015). Atualmente os estudos envolvendo análises de crescimento e desenvolvimento do sistema radicular envolve outras técnicas de imagem, como câmeras fotográficas e scanners (DANNOURA, 2012; ADU, 2014; DOWNIE, 2015). Esses equipamentos facilitam a quantificação em função da maior facilidade na aquisição de imagem associada ao baixo custo. Sistemas de análises de imagem digitalizados oferecem maior fidedignidade ao estudo do sistema radicular.

As imagens em 2D são adequadas para a contabilização de raízes que crescem no solo com sistemas de rizotron (GASCH, 2011). Para o uso dessa técnica pode-se utilizar os sistemas de cultivo de plantas em recipientes do tipo rizotron, no qual é possível visualizar o crescimento e desenvolvimento temporal do sistema radicular, de modo não destrutivo. Portanto, a vantagem do sistema de rizotron é que as raízes podem ser fotografadas ao longo do tempo sem perturbação da rizosfera sendo úteis para a avaliação da dinâmica do crescimento em muitas culturas perenes (KUCHENBUCH & INGRAM 2002; DONG, 2003; NAGEL, 2012).

A partir de fotografias retiradas em janelas dos rizotrons foi proposta análise com o uso de sistemas de informações geográficas, visando quantificar as modificações morfológicas no GIS (Sistema de Informação Geográfica). O GIS é amplamente utilizado dentro da agricultura e demais ciências da terra em uma variedade de situações, incluindo

abordagens ecológicas como ferramenta de planejamento, gerenciamento e análises de dados (GASCH, 2011; MALCZEWSKI 2014). Esse tipo de tecnologia visa à identificação de padrões espaciais, através de fotografias, de acordo com requisitos e preferências específicas. Utilizar o arcGIS® como ferramenta dentro da produção de café, especificamente para observar e mapear o crescimento radicular poderá evidenciar o crescimento de genótipos tolerantes ao estresse hídrico.

2.5 Melhoramento e características dos materiais estudados

A triagem realizada pelos programas de melhoramento de plantas é uma estratégia fundamental para produção de novas cultivares/genótipos com tolerância ao estresse abiótico associado a produtividades aceitáveis. Existem características fenotípicas desejáveis, buscadas pelos programas de melhoramento para tolerância à seca para plantas de café Arabica. Entre elas, se destacam plantas de café com copas reduzidas em tamanho, densas em folhagem, visando à redução das taxas transpiratórias, fato que auxiliará no uso e eficiência da água (DAMATTA, 2018). Outra característica desejável é a formação e manutenção de sistema radicular mais profundo, pois assim elevaria a capacidade de explorar volumes maiores de solo, atingindo recursos hídricos que outras plantas com raízes mais superficiais não poderiam.

Ao se estabelecer padrões morfofisiológicos advindos de genótipos tolerantes à seca, a seleção e o melhoramento de novos materiais poderão ser mais rápidos e efetivos, dentro da atual demanda. O uso de tecnologias para estabelecimento de padrões espaciais do sistema radicular pode auxiliar amplamente nas novas pesquisas, uma vez que equipamentos de análises radicular em meio ao solo, ainda são pouco difundidos nos meios de pesquisa. Diante disso este estudo utilizou quatro genótipos de cafeeiros Arábica, sendo dois em estágio avançado no Programa de Melhoramento Genético da EPAMIG: genótipos 07 e 19, além das variedades Catiguá e Catuaí, utilizados como genótipos de referência.

2.5.1 Genótipo Catiguá MG3

O genótipo Catiguá MG3 é proveniente do cruzamento entre o Catuaí Amarelo IAC 86 e o Híbrido de Timor (UFV 440-10) lançado em 1980 pela EPAMIG com participação da Universidade Federal de Viçosa. Atualmente está implantado em maior proporção no Estado

de Minas Gerais onde se concentra em regiões de vales como o Vale do Jequitinhonha e Rio Doce.

É um material de porte baixo com ramos plagiotrópicos possuindo internódios reduzidos e muitas ramificações secundárias. Esse genótipo apresenta uma boa produção frutos avermelhados e grãos menores e um sistema radicular um pouco mais aprofundado em campo, contudo em campo apresenta menor tolerância à seca. O Catiguá se destaca por proporcionar uma bebida de alta qualidade, com a produção grãos gourmets (EPAMIG 2019).

2.5.2 *Cultivar Catuaí Vermelho 144*

Esse material é proveniente do cruzamento do Caturra IAC amarelo 476-11 x Mundo novo IAC 374-19, duas cultivares consagradas nas regiões produtoras de café Arábica do Sudeste brasileiro, desenvolvida pelo Instituto Agrônômico (IAC, Campinas/SP). É uma cultivar altamente explorada em fazendas onde o intuito é a produção do grão gourmet, apresentando peneira média (IAC 2018).

São plantas de porte baixo que atingem em média 2-2,4 m de altura, contudo em regiões cafeeiras como Patrocínio/MG foram aferidos valores superiores. Apresentem sistema radicular reduzido. Em condições de sequeiro apresenta uma produtividade média de 25-45 sacas, enquanto irrigada de 40-60 sacas/ha. (AGUIAR, 2004; EPAMIG 2019).

2.5.3 *Genótipo 07*

O genótipo 07 é um material presente no melhoramento da EPAMIG que, em campo destacou-se por apresentar maior volume e área radicular, quando comparado ao sistema irrigado e a demais materiais. Esse genótipo apresentou também alta produtividade em condições de seca severa com maior qualidade de grãos (conforme a classificação de peneira), demonstrando potencialidade para desenvolvimento de materiais tolerantes ao déficit hídrico (ANDRADE, 2019; PEREIRA, 2018).

2.5.4 *Genótipo 19*

O genótipo 19 é o segundo material presente também no melhoramento da EPAMIG. Em campo destacou-se por apresentar em condição de sequeiro maior produção de raízes em meio ao perfil do solo e por manter uma boa produtividade com alto rendimento de grãos em

meio à restrição hídrica (quando comparado ao sistema irrigado), caracterizando-o como um material promissor a tolerância à seca (PEREIRA, 2018; ANDRADE, 2019;).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Esse trabalho foi conduzido em Lavras (21° 14' 45" Sul, 44° 59' 59" W, 920m de altitude) em Minas Gerais com classificação climática do tipo Cwb (KÖPPEN; GEIGER), no período de maio a dezembro de 2018.

Os genótipos utilizados foram provenientes do programa de melhoramento da EPAMIG, cultivados em casa de vegetação em condições semicontroladas, em que a temperatura (T, °C) e umidade do ar (UR, %) foram monitoradas diariamente com auxílio de sensores conectados a um termohigrômetro digital Instrutherm (modelo HT-500).

As mudas foram transplantadas em recipientes do tipo rizotron (7 cm x 17 cm de raio x 60 cm de profundidade e volume de 22L.), os quais possuíam uma das superfícies de vidro e uma cobertura móvel de acrílico negro, cuja função foi de manter o sistema radicular na ausência de luz (FIGURA 1). O transplante das mudas ocorreu com oito pares de folhas, (aproximadamente aos cinco meses após a germinação da semente) para mistura de Latossolo distrófico vermelho e areia (1:1 v/v), onde foi colocada uma camada de brita ao final do recipiente para auxiliar no escoamento de água. A adubação no plantio e de cobertura do substrato foi feita de acordo com análise de solo e recomendações técnicas usuais para a cultura (PREZOTTIO, 2001);

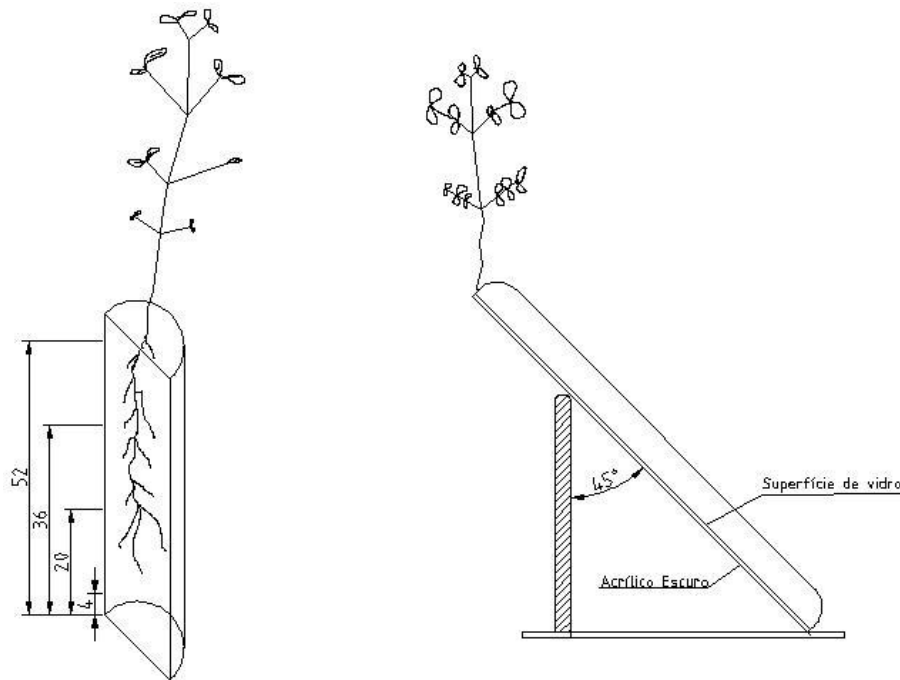
Tabela 1- Análise química do substrato utilizado durante o experimento (mistura de areia e solo na proporção 1:1)

pH.	K	P	Ca	Mg	Al	H+ Al	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
	mg.dm ⁻³		cmol _c .dm ⁻³				mg.dm ⁻³					
7,1	9,58	0,82	1,52	0,11	0,04	1,32	0,69	46,57	14,85	1,31	0,04	40,99

Fonte: Do autor, (2019).

As avaliações visuais do desenvolvimento radicular foram feitas retirando a cobertura de acrílico. Os rizotrons foram posicionados em ângulos de 45° com a horizontal para forçar o crescimento das raízes junto à janela de vidro (FIGURA 1).

Figura 1 - Representação do modelo de rizotron utilizado, indicando as três áreas seccionadas no mapeamento de imagens seguido da demonstração do posicionamento e angulação (45°), estabelecidos.



Fonte: Do autor, (2019)

3.1 Delineamento experimental

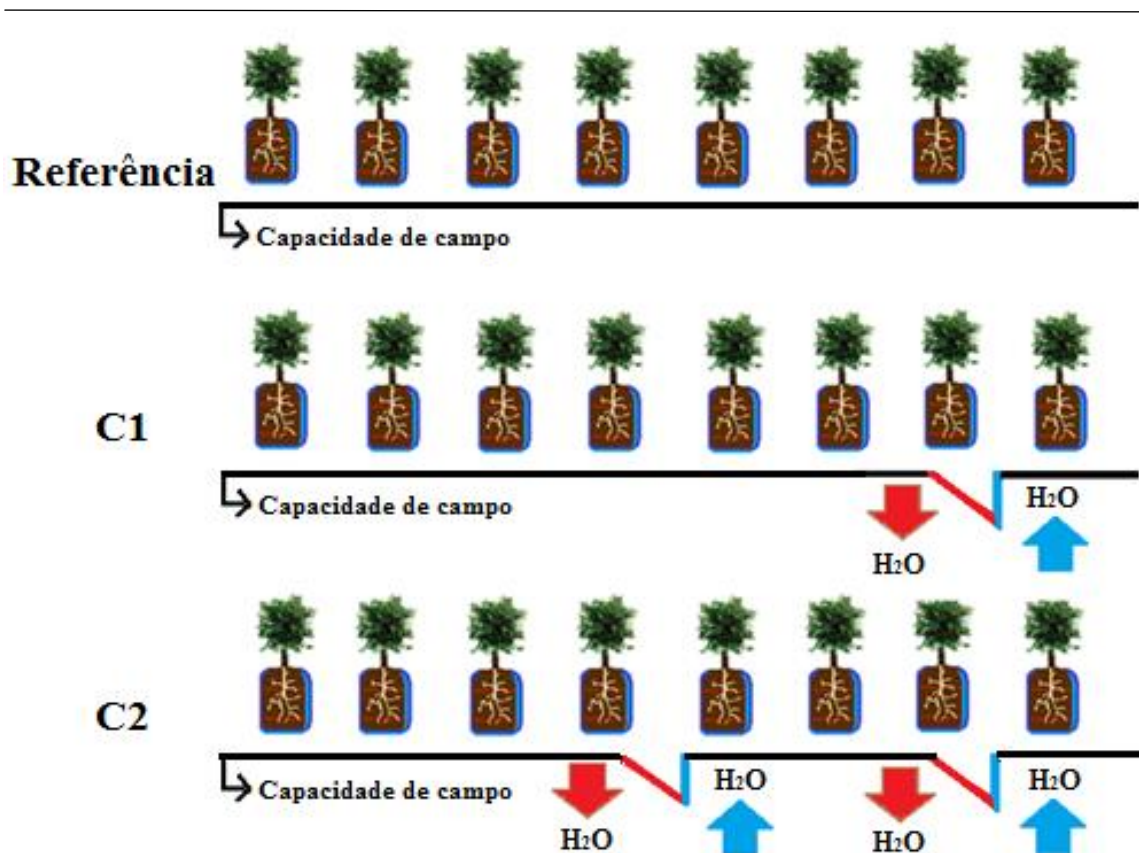
O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com doze tratamentos ao todo: quatro genótipos e três condições hídricas (4x3). Para cada tratamento havia quatro repetições, e durante o período experimental ocorreram dois momentos de coletas destrutivas. A parcela foi constituída de uma planta por rizotron, ao todo foram utilizadas 96 plantas; nas quais os genótipos de referência, sensíveis à seca, foram: Catiguá MG3, Catuaí 144; e os dois genótipos com expressão de tolerância à seca em campo genótipos 07 e 19.

No momento em que as plantas atingiram quatro meses após o transplântio iniciou-se a imposição dos tratamentos. Com o objetivo de avaliar o padrão de resposta da planta e a diferenciação/possíveis adaptações em meio a ciclos de restrição hídrica instalaram-se ciclos de restrição hídrica seguidos de reidratação, esses foram controlados a partir da aferição da fotossíntese, assim como, através do controle de irrigação de acordo com a variação da umidade do solo (FIGURA 2). A coleta realizada em restrição hídrica, ocorreu quando a assimilação líquida de carbono se aproximava a zero. Após, esse momento foi realizada a reidratação e a segunda coleta ocorreu quando os valores de fotossíntese se igualavam aos

valores das plantas referências. Com isso foram estabelecidos três regimes hídricos que foram: (1°) irrigados em capacidade de campo durante todo o experimento - referência; (2°) um ciclo de restrição hídrica ao final do experimento- C1; (3°) dois ciclos de restrição hídrica - C2, sendo um ao meio e outro ao final (FIGURA 2). Após quatro meses do transplântio iniciou-se a contagem do período experimental. Esse totalizou-se em 105 dias; em que C1 ocorreu entre os dias 20-50 e C2 entre 75-95 (FIGURA 4). As coletas destrutivas ocorreram em dois momentos: a primeira foi quando os tratamentos C1 e C2 se encontraram em estresse, no dia 102 e a segunda após a reidratação de todas as mudas no dia 105. Os ciclos foram impostos com a restrição da irrigação, e monitorados através dos valores de fotossíntese líquida (A) até o momento em que os valores se aproximassem a zero.

Figura 2 - Representação dos tratamentos estabelecidos.

- Referência: Representação das mudas de cafeeiro, implantadas em rizotrons irrigadas durante todo o período experimental;
- C¹: Representação das mudas que sofreram um ciclo de restrição hídrica e reidratação ao final do experimento;
- C²: Representação das mudas que sofreram dois ciclos de restrição hídrica seguidos de reidratação.



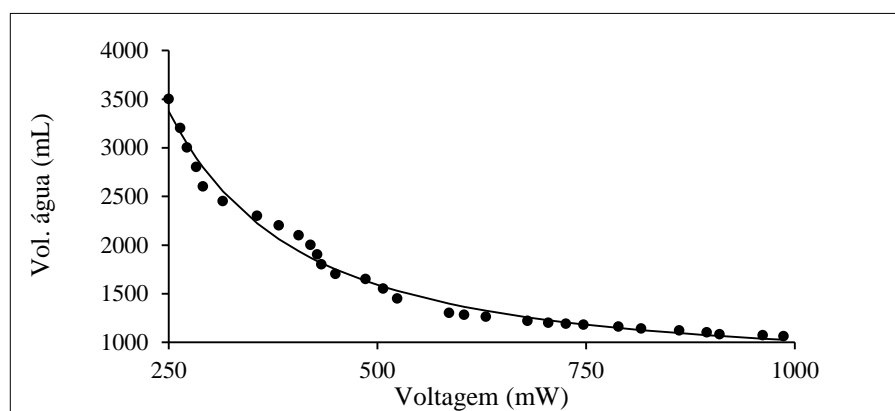
3.2 Determinação da umidade do solo, e estabelecimento das restrições hídricas

As plantas foram irrigadas de modo a manter a umidade do solo próxima à capacidade de campo durante todo o experimento, exceto nos momentos de imposição dos tratamentos de restrição hídrica. Para o controle de umidade no solo, foram instalados sensores responsáveis por medir o conteúdo volumétrico de água, representando cada um dos 12 tratamentos. O sensor foi instalado a 35 cm de altura (meio do rizotron) para que tivesse maior representatividade da água no solo. A constante dielétrica foi medida com a tecnologia de domínio de capacitância/frequência e os dados foram adquiridos a cada hora e enviados a um micro controlador do tipo Arduino de modelo Mega 2560 R39. A determinação da capacidade de campo foi feita no Departamento de Solos da Universidade Federal de Lavras, de acordo com o Manual de Métodos de Análise de Solos da Embrapa (1997). A calibração dos sensores foi realizada de acordo com o trabalho de Andrade (2019) onde foi feita uma curva de acordo com a voltagem (mV) dentro das alterações de umidade no solo (Figura 3) de acordo com a equação a seguir.

Equação 1 - Determinação de volume de água no solo

$$vol = \frac{728.731 + 137387.334}{\frac{US + 1.622 e^{08}}{US^2 - 7.792 e^{09}} \%^2}$$

Figura 3 - Representação da curva de calibração dos sensores de umidade do solo, a saturação do solo aferida foi em 3500ml de acordo com o eixo x (volume de água).

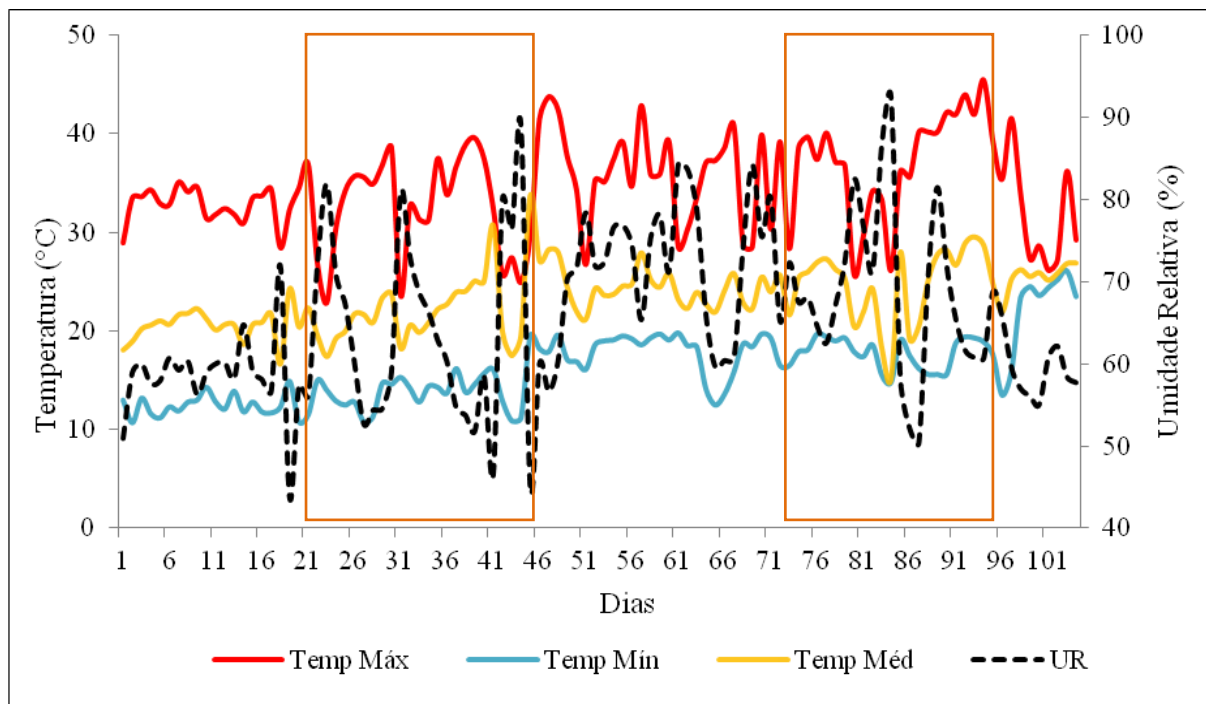


Fonte: Andrade, (2019).

2.4 Temperatura e umidade relativa do ar

A temperatura (T °C) e umidade relativa (UR%) do ar foram monitoradas diariamente, (intervalo de 1 hora) com auxílio de sensores conectados a um termohigrômetro digital Instrutherm (modelo HT-500). Os dias de imposição dos ciclos hídricos estão destacados em laranja (FIGURA4).

Figura 4 - Valores de Temperatura (C°) máxima, mínima e a média diária no eixo primário, representadas pelas linhas contínuas em vermelho, azul e amarelo respectivamente. Umidade relativa (UR, %) no eixo secundário, representada pela preta tracejada. Os dois ciclos de restrição hídrica são indicados pelos retângulos alaranjados.



Fonte: Do autor, (2019).

3.3 Conteúdo relativo de água (CRA)

Para a determinação do conteúdo relativo de água (CRA), utilizou-se a metodologia descrita por Whertherley (1950). Foram coletados discos foliares da primeira folha completamente expandida, cerca de $1,0\text{ cm}^2$, que em seguida foi pesado em balança analítica para obter a massa fresca (MF). Posteriormente, os discos foliares foram depositados em placas de “Petri”, com aproximadamente 10 ml de água destilada e mantidos em temperatura

ambiente e no escuro por 24 horas. Após esse período, os discos foram colocados em papel toalha, visando à retirada o excesso de água da superfície dos tecidos e pesados para determinação da massa túrgida (MT). A massa seca (MS) foi obtida após os discos serem levados à estufa, a uma temperatura de 60 °C, até atingirem peso constante, assim, de posse desses dados, calculou-se o conteúdo relativo de água com auxílio da seguinte equação:

$$CRA (\%) = \frac{(MF - MS)}{(MT - MS)} \times 100$$

As coletas dos discos ocorreram em quatro momentos, após a imposição de C1 na condição de restrição hídrica de solo na data de 15/10/2018, e também posteriormente na condição de reidratação 20/10/2018. As duas últimas coletas de discos ocorreram; após a imposição de C2, em 13/12/2018, dia no qual ocorreu a primeira coleta destrutiva sob condição de restrição hídrica (dia 100); e a última aferição de potencial hídrico e conteúdo relativo de água, ocorreram após a reidratação, dia no qual que ocorreu a segunda coleta destrutiva, em 16/12/2018 (dia 104) (FIGURA 4).

3.4 Potencial hídrico (Ψ)

O potencial hídrico foliar (Ψ) foi determinado em folhas completamente expandidas com auxílio de uma bomba de pressão tipo Scholander modelo 1000 (PMS Instruments Company – Albany, OR, USA), em dois momentos, na antemãnhã (04:30h – 05:30h) ($\Psi_{5:00}$) e ao meio-dia ($\Psi_{md_{12:00}}$). As aferições ocorreram em quatro momentos distintos sendo os dois primeiros após a imposição de C1. O potencial hídrico foi mensurado nas condições de restrição hídrica e posteriormente na condição de reidratação. As duas últimas aferições ocorreram após a imposição de C2 dia no qual ocorreu primeira coleta destrutiva sob condição de restrição hídrica (dia 100) e a última aferição de potencial hídrico ocorreu após a reidratação, dia no qual que ocorreu a segunda coleta destrutiva, em 16/12/2018 (dia 104) (FIGURA 4).

3.5 Trocas gasosas

As trocas gasosas foram medidas utilizando o analisador de gás por infravermelho (IRGA - LI-6400XT Portable Photosynthesis System, LI-COR, Lincoln, USA) na primeira

folha completamente expandida, entre 9:00h e 11:00h. Foram consideradas a fotossíntese líquida (A), condutância estomática (gs) e transpiração (E). A concentração de CO_2 foi de $420 \pm 6,9 \mu\text{mol mol}^{-1}$, radiação fotossinteticamente ativa (Q) de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A média temperatura foliar foi de $27,6 \pm 2,9 \text{ }^\circ\text{C}$, a umidade relativa (UR) foi de $45 \pm 7,9 \%$. As aferições fotossintéticas ocorreram em dois momentos o primeiro foi anterior a C2 em fase de reidratação para parâmetros comparativos, e o segundo em C2 no momento de restrição hídrica, que coordenou a época de coleta, nos dias 100 e 104 respectivamente (FIGURA 4).

3.6 Eficiência e uso da água (EUA)

A EUA foi calculada partir dos valores das leituras realizadas com o (IRGA - LI-6400XT Portable Photosynthesis System, LI-COR, Lincoln, USA), de acordo com a equação a seguir:

$$EUA = \frac{\text{Fotossíntese líquida (A)}}{\text{Transpiração (E)}}$$

3.7 Determinação da concentração de carboidratos

Após as duas coletas (estresse e reidratação), os materiais vegetais (folhas e raízes) foram preparados para a extração de macromoléculas, sendo levados à estufa a $60 \text{ }^\circ\text{C}$, até peso constante e posteriormente, moídos em moinho do tipo Willey.

Os carboidratos solúveis foram extraídos das folhas e raízes por homogeneização de 0,2 mg (massa seca) em 5 mL de tampão fosfato de potássio (100 mM, pH 7,0), seguido de banho-maria por 30 min a $40 \text{ }^\circ\text{C}$, e após centrifugado a 5.000 g por 10 minutos. O sobrenadante foi coletado para a quantificação de açúcares redutores (AR) e sacarose. O processo foi repetido duas vezes e os sobrenadantes foram combinados.

A extração de sacarose foi feita a partir de 800 μL da extração inicial de macromoléculas, combinado com mais 800 μL de solução de KOH (Hidróxido de sódio) a 30%, seguidos de banho-maria por 15 minutos a $37 \text{ }^\circ\text{C}$. Enquanto a quantificação de AR seguiu a partir do extrato inicial que reagiu com o ácido dinitrosalicílico (DNS) (MILLER 1959). Esse foi preparado com NaOH 2M e tartarato duplo sódio de potássio a 30%.

Para extração de amido, o pellet (resíduo da extração anterior) foi ressuspendido em 4 mL de tampão acetato de potássio (200mM, a pH 4,8) e colocado em banho-maria a $100 \text{ }^\circ\text{C}$

por 5 minutos. Após, o banho-maria adicionou-se mais 2 mL de solução de tampão acetato de potássio junto combinado a enzima amiloglucosidade de *Aspergillus niger*. Em seguida foram levados novamente a banho-maria por mais 2 horas a 40 °C, e centrifugada a 5.000 g. O sobrenadante foi coletado e quantificado pelo método de Antrona (DISCHE, 1962), protocolo descrito por Zanandrea (2010).

3.8 Análises biométricas e parâmetros agronômicos

Durante os ciclos de seca-reidratação as características biométricas das plantas foram avaliadas, na qual foram contabilizadas: comprimento do ramo principal, número de ramos plagiotrópicos e ladrões, número de folhas completamente expandidas nos ramos principais e nos ladrões e diâmetro do caule. Durante as coletas destrutivas foram avaliados: número de folhas totais, número de folhas completamente expandidas em ramos plagiotrópicos e ramos ladrões, área foliar e comprimento final de raiz com auxílio de uma régua.

Para a avaliação do volume e comprimento sistema radicular, retirou-se cuidadosamente a planta do rizotrons, lavando o excesso de substrato em água corrente. Essas raízes foram mantidas em água para evitar o ressecamento. O volume da raiz foi determinado colocando as raízes em proveta graduada, contendo um volume conhecido de água, após a introdução da raiz na proveta mediu-se a diferença de água deslocada (BASSO 1999).

A estimativa de área foliar foi de acordo com o método descrito por Barros (1973) onde foi feita a medição do comprimento do limbo foliar, e a largura de cinco folhas completamente expandidas por planta. Em seguida esses valores foram usados na equação a seguir:

$$\hat{A}F = 0,667.C.L * \text{número de folhas totais}$$

Em que:

$\hat{A}F$ = estimativa da área foliar (cm²);

C = maior comprimento (cm);

L = maior largura (cm).

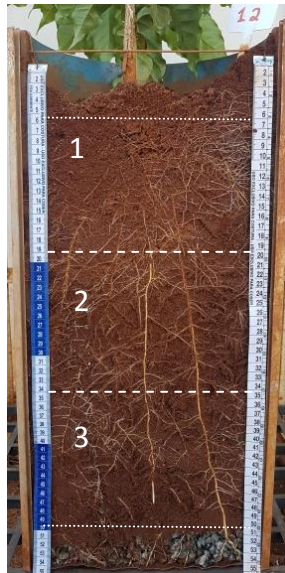
3.9 Matéria seca

A massa seca foi aferida após as amostras passarem pela estufa de circulação forçada 60 °C e atingirem peso constante. Cada amostra foi separada em folhas, caule e raiz.

3.10 Mapeamento de raízes

Para o mapeamento do sistema radicular foram tiradas fotografias que foram seccionadas em três áreas iguais: área 1 (superior: próximo ao coleto da muda); área 2 (região medial do sistema radicular, onde estava localizado os sensores de umidade) e área 3 (porção final do rizotron). Essas imagens foram georreferenciadas no programa ArcGISs® e foi determinada a proporção de raízes presentes na janela de vidro de cada rizotrons (cm²).

Figura 5 - Representação das áreas seccionadas para análise de imagem das raízes presentes nos rizotrons.



Fonte: Do autor, (2019).

3.11 Análises estatísticas

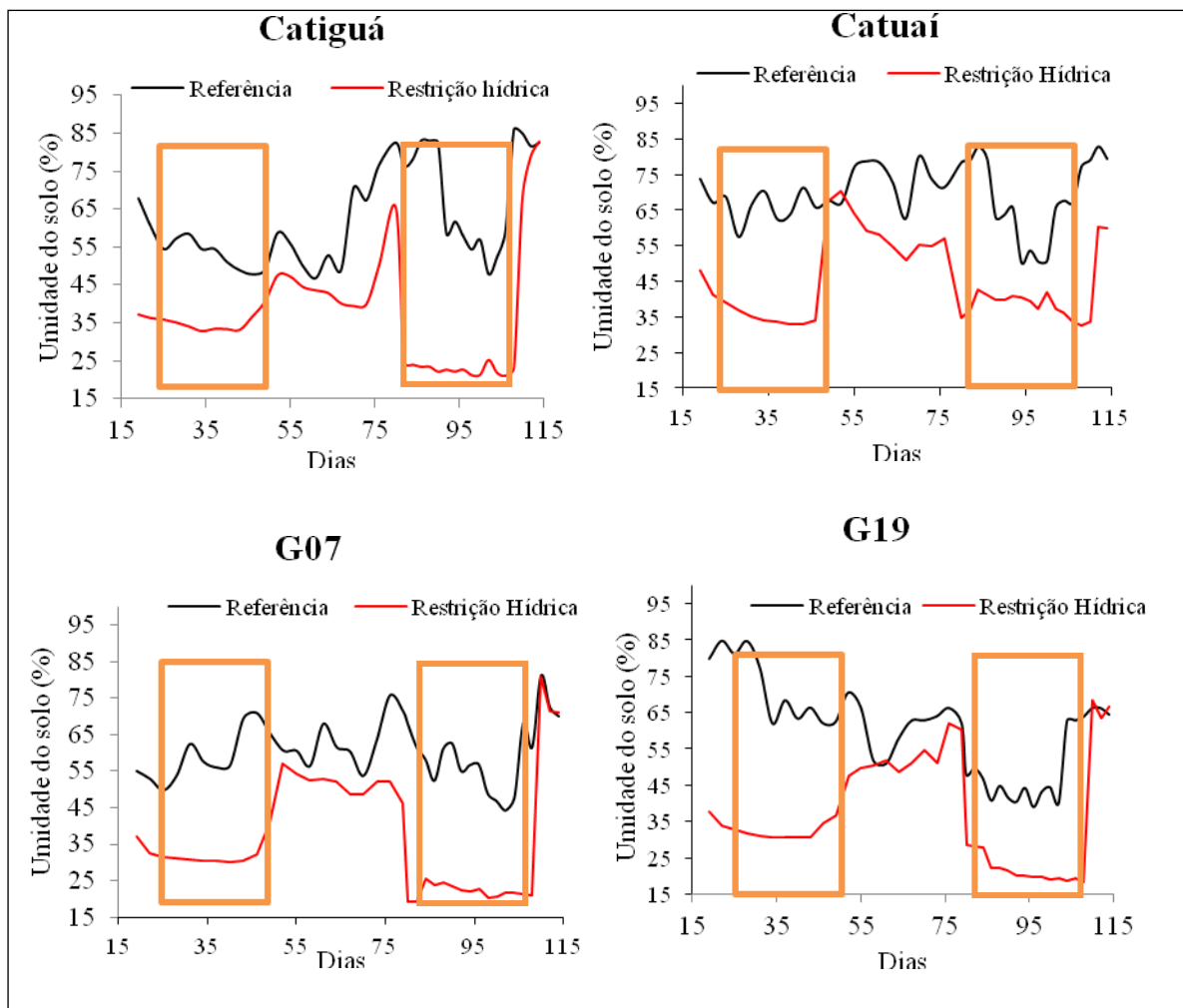
A normalidade dos dados foi testada com auxílio da plataforma R[®] e os dados foram submetidos à análise de variância ao teste de médias por Scott-Knott ($p \leq 0,05$) com o auxílio do software SISVAR[®].

4 RESULTADOS

A determinação da umidade do solo durante todo o período experimental foi monitorada e controlada, para que as plantas fossem expostas às mesmas condições hídricas. No entanto, são observadas diferenças na manutenção do potencial mátrico, induzidas pelos

diferentes genótipos estudados. Sob as três condições hídricas; referência, C1 e C2, os genótipos Catuaí e o G19 demonstraram uma maior manutenção de umidade no solo, enquanto no segundo ciclo, os genótipos Catiguá e G07 apresentaram um menor percentual de água no solo, comparado ao valor de referência e aos demais genótipos (FIGURA 6).

Figura 6 - Umidade do solo (%) durante o período experimental, os ciclos de restrição hídrica (primeiro ciclo - C1 e segundo ciclo- C2) são indicados pelos retângulos alaranjados. C1, ocorreu partir do 20° até o 45° dia seguido de reidratação, enquanto C2, foi realizado 75° até o 105° dia.



Fonte: Do autor, (2019).

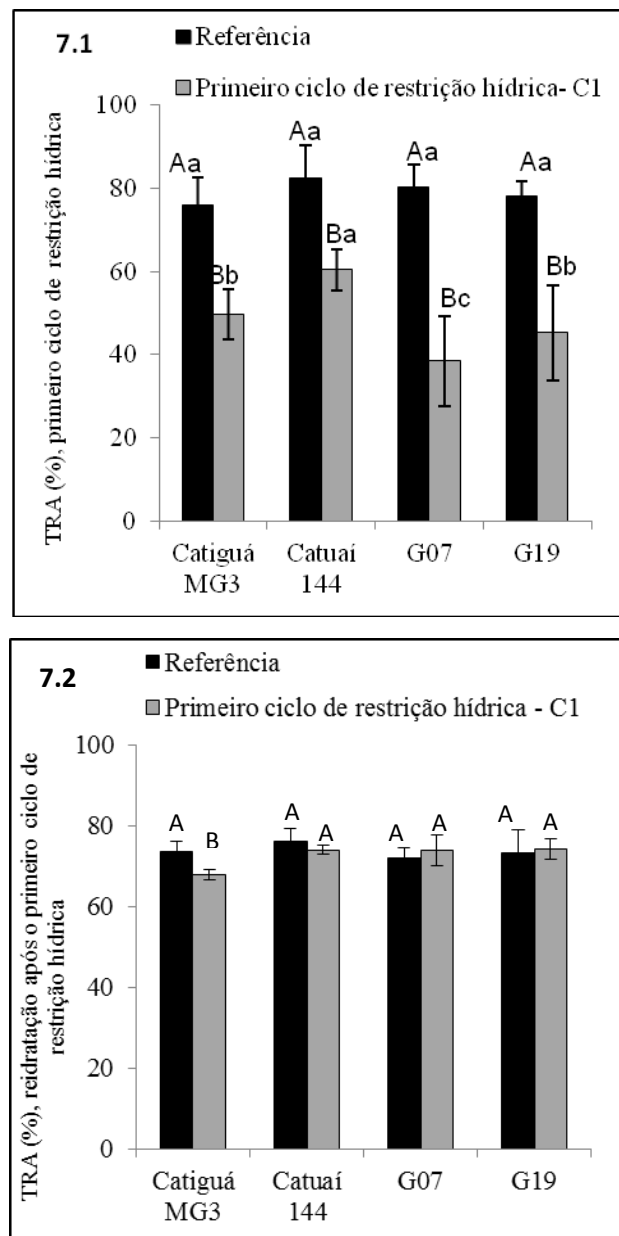
3.2 Teor relativo de água (TRA)

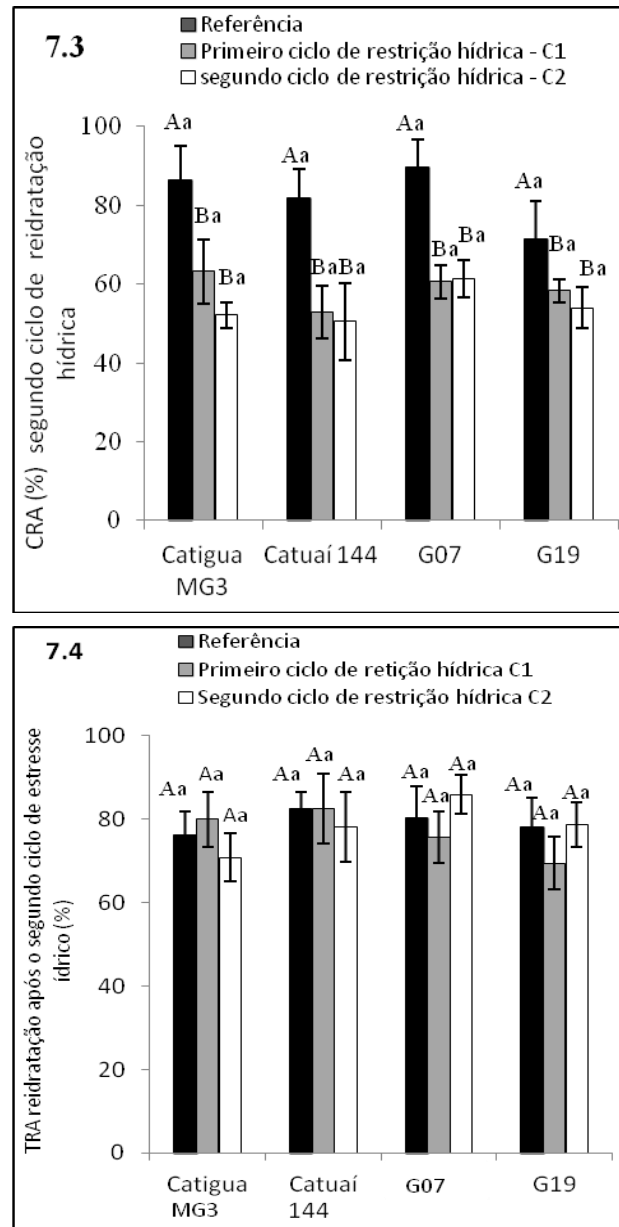
Sob a condição de déficit hídrico foi observada uma redução significativa no teor relativo de água em todos os materiais durante os ciclos de seca/reidratação. Quando submetido ao tratamento C1, entretanto o G07 apresentou uma redução ao ser comparado à

referência e aos demais genótipos na mesma condição (FIGURA 7.1). O mesmo comportamento não foi verificado na segunda imposição de restrição hídrica, pois o G07 comportou-se semelhante aos demais materiais apresentando redução no conteúdo relativo de água ao ser comparado às plantas referência e não as demais submetidas a restrição hídrica.

No período de reidratação foi observado que os genótipos tiveram uma recuperação do status hídrico, sendo semelhante ao tratamento de referência (FIGURA 7.4).

Figura 7 - Teor relativo de água (TRA). ^{7.1} TRA no primeiro ciclo de restrição hídrica - C1. ^{7.2} TRA na primeira reidratação após - C1. ^{7.3} TRA no segundo ciclo de restrição hídrica- C2. ^{7.4} TRA após a segunda reidratação - C2. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos tratamentos. Letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).





Fonte: Do autor, (2019).

4.1 Potencial hídrico

Sob a condição de restrição hídrica foi observada diferença significativa ($p < 0,05$) entre os materiais Catuaí e o G07, em aferições feitas na antemanhã. Observou-se também, uma diferença em relação aos valores de referência nos materiais Catigua, Catuaí e G07 nas aferições realizadas ao meio-dia. Contudo após a imposição de C1 e C2 todos os tratamentos apresentaram uma efetiva reidratação, fato comprovado pelos valores semelhantes aos das plantas de referência na aferição da antemanhã após a reidratação (TABELA 2).

O genótipo Catiguá em momento de restrição hídrica (valores referentes à antemanhã) manteve o potencial hídrico semelhante à referência, entretanto, o mesmo comportamento não foi observado ao meio-dia, em que as plantas submetidas a C1 e C2 reduziram o potencial hídrico. O genótipo Catuaí e o G07 apresentaram valores menores aos das plantas de referência, nas aferições realizadas na antemanhã e ao meio-dia, tanto em C1 quanto em C2. O G19 demonstrou uma redução significativa do potencial hídrico em C2 na antemanhã, contudo, esse mesmo comportamento não foi observado ao meio-dia.

Tabela 2- Potencial hídrico na antemanhã Ψ_{am} (MPa) e meio-dia $\Psi_{12:00}$ (MPa), após a imposição dos tratamentos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas na mesma linha indicam diferença de cada genótipo, na imposição dos três tratamentos. Letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).

	Restrição hídrica (Ψ_{am})			Restrição hídrica ($\Psi_{12:00}$)		
	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2
Catiguá 144	-0,25 \pm 0,2Ab	-0,6 \pm 0,05Ab	-0,8 \pm 0,6Ab	-0,6 \pm 0,2Aa	-0,9 \pm 0,2Ba	-0,9 \pm 0,1Ba
Catuaí MG3	-0,2 \pm 0,1Aa	-0,5 \pm 0,1Ba	-0,4 \pm 0,1Bb	-0,8 \pm 0,2Aa	-1,6 \pm 0,5Ba	1,2 \pm 0,5Ba
G07	-0,25 \pm 0,03Ab	-0,7 \pm 0,5Bb	-0,9 \pm 0,6Ba	-0,5 \pm 0,2Aa	-1,6 \pm 0,4Ba	-1,9 \pm 0,5Ba
G19	-0,1 \pm 0,0 Aa	-0,8 \pm 0,5Aa	-1,2 \pm 0,3Bb	-1,0 \pm 0,6Aa	-1,5 \pm 0,5Aa	-1,5 \pm 0,6Aa
	Reidratação (Ψ_{am})			Reidratação ($\Psi_{12:00}$)		
	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2
Catiguá 144	-0,11 \pm 0,02Aa	-0,14 \pm 0,09Aa	-0,03 \pm 0,01Aa	-0,28 \pm 0,16Ab	-0,45 \pm 0,19Ab	-0,45 \pm 0,13Ab
Catuaí MG3	-0,14 \pm 0,08Aa	-0,05 \pm 0,01Aa	-0,18 \pm 0,09Aa	-0,9 \pm 0,25Aa	-0,71 \pm 0,34Aa	-0,46 \pm 0,05Ab
G07	-0,14 \pm 0,11Aa	-0,14 \pm 0,09Aa	-0,14 \pm 0,08Aa	-0,49 \pm 0,03Bb	-0,36 \pm 0,13Bb	-0,83 \pm 0,19Aa
G19	-0,1 \pm 0,09 Aa	-0,05 \pm 0,04Aa	-0,14 \pm 0,07Aa	-0,8 \pm 0,18Ba	-0,75 \pm 0,24Ba	-0,33 \pm 0,12Ab

Fonte: Do autor, (2019).

4.2 Trocas gasosas

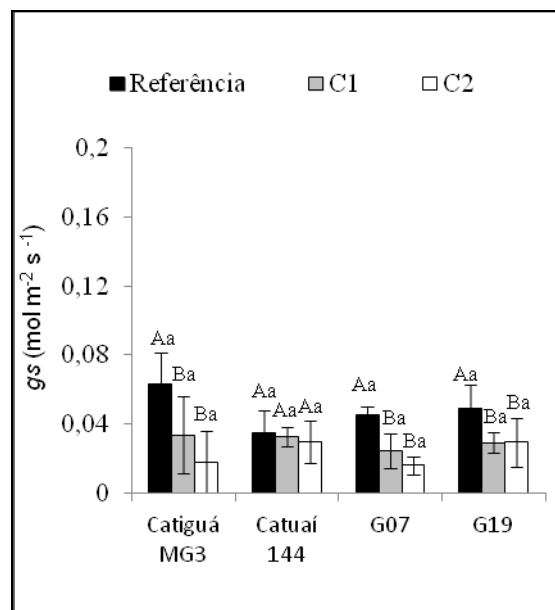
Todos os materiais submetidos às condições de restrição hídrica C1 e C2 sofreram reduções nas taxas de assimilação líquida de carbono A em comparação às plantas de alta disponibilidade hídrica. A redução de A durante os ciclos de déficit hídrico afetou, principalmente os genótipos Catiguá e G07, os quais apresentaram o menor rendimento fotossintético, com redução relativa de $71 \pm 5\%$ em C1. Entretanto em C2 a redução de assimilação de carbono dos genótipos Catiguá e G07 foram de $48 \pm 4\%$, equiparando-os aos demais materiais na mesma condição. O material Catuaí demonstrou uma leve redução da taxa de assimilação de CO_2 , não

apresentando diferença significativa em comparação com sua respectiva referência (FIGURA 8).

Assim como em *A*, um comportamento semelhante ocorreu com a maior parte dos genótipos em déficit hídrico, registrando-se uma redução na condutância estomática (*gs*) para os genótipos Catiguá MG3, G07 e G19 (FIGURA 9). Entre os materiais, o genótipo Catiguá foi o que apresentou a maior redução em comparação à referência, seguido pelo G07, e G19, contudo, colaborando com as taxas de *A*, o genótipo Catuaí foi o único que não apresentou uma redução significativa diante os ciclos de estresse.

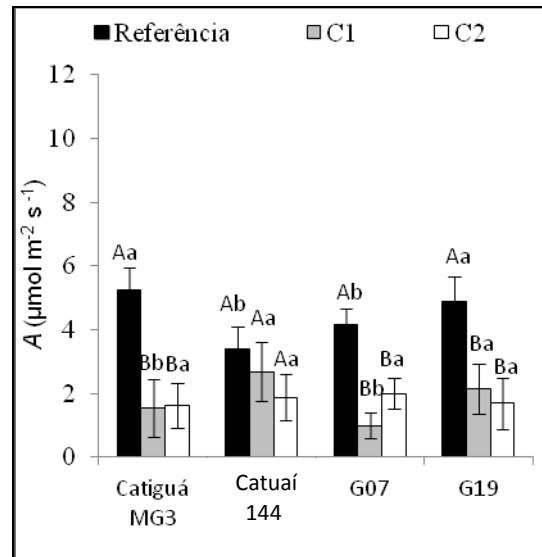
Do mesmo modo, a taxa de transpiração *E* apresenta o mesmo padrão de resposta que *gs* e *A*. O genótipo Catiguá apresentou os menores índices de redução estomática ao se comparar a referência, seguido pelo G07, fato que é justificado a redução de *A*, e *E*, seguido pelo G19 e Catuaí respectivamente (FIGURA 10).

Figura 8- Condutância estomática (*gs*), aferida durante a restrição hídrica nos tratamentos, (um ciclo de restrição hídrica- C1, e dois ciclos de restrição hídrica-C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).



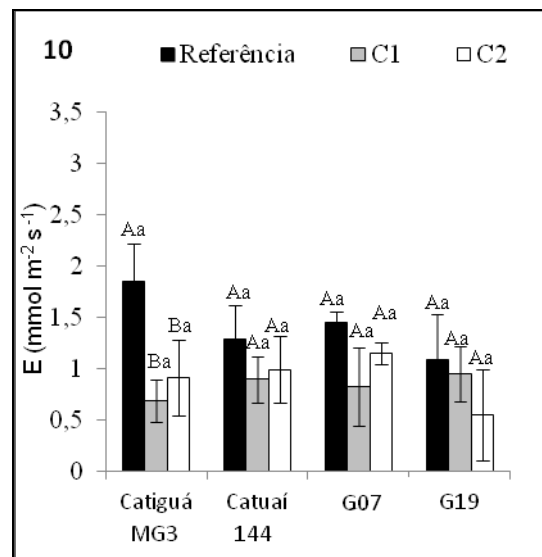
Fonte: Do autor, (2019).

Figura 9 - Taxa de assimilação líquida de carbono (*A*), aferida durante a restrição hídrica nos tratamentos, (um ciclo de restrição hídrica- C1, e dois ciclos de restrição hídrica-C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).



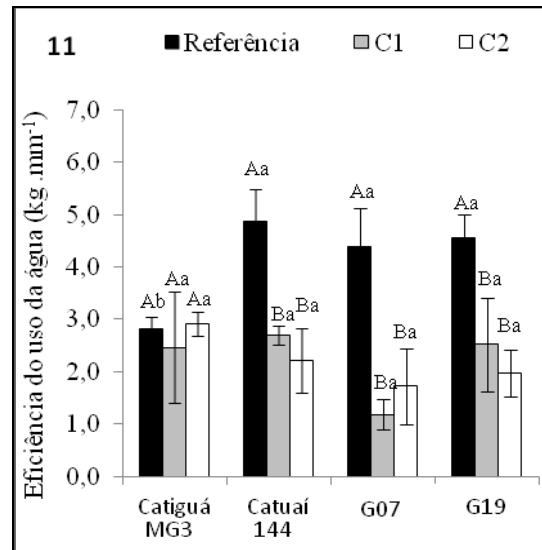
Fonte: Do autor, (2019).

Figura 10 – Taxa transpiratória (E), aferida durante a restrição hídrica nos tratamentos, (um ciclo de restrição hídrica- C1, e dois ciclos de restrição hídrica-C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).



Fonte: Do autor, (2019).

Figura 11 - Uso e eficiência da água (EUA), aferida durante a restrição hídrica nos tratamentos, (um ciclo de restrição hídrica- C1, e dois ciclos de restrição hídrica-C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).

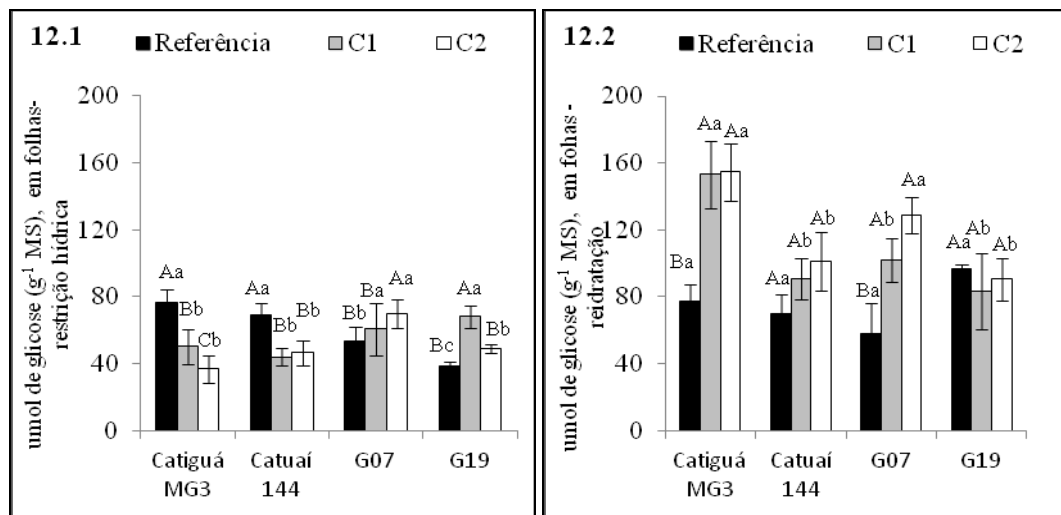


Fonte: Do autor, (2019).

4.3 Carboidratos em folha

Observou-se um consumo do amido nos genótipos Catiguá e Catuaí durante os períodos de estresse em comparação com a referência seguidos de uma grande elevação na reidratação, contudo nas condições C1 e C2 os G07 e G19 apresentaram aumentos no teor de amido nas folhas em comparação a referência (Figura 12.1 e Figura 12.2).

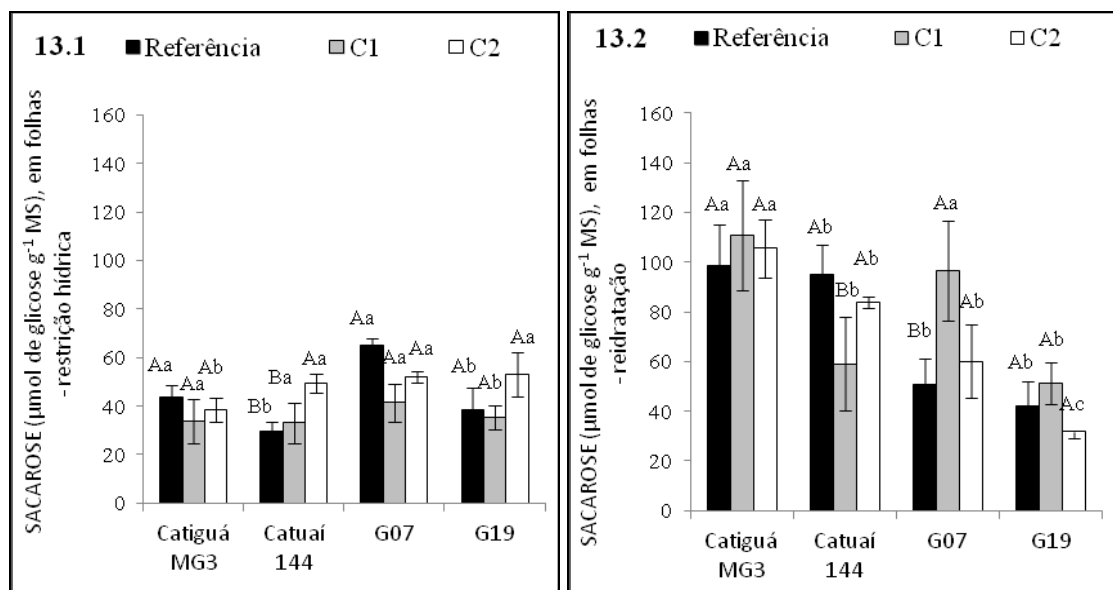
Figura 12 - ^{12.1} Teor de amido em folhas coletadas em restrição hídrica, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. ^{12.2} Teor de amido em folhas coletadas após a reidratação, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).



Fonte: Do autor, (2019).

No momento de restrição hídrica observa-se uma redução da concentração de sacarose para todos os genótipos onde o Catiguá e o Catuaí apresentaram diferenças significativas (FIGURA 13.1). Após o estresse hídrico o genótipo Catuaí apresentou uma maior elevação de sacarose nas folhas quando submetido aos tratamentos C1 e C2 em comparação a referência, enquanto os demais genótipos não se diferenciaram (FIGURA 13).

Figura 13 – ^{13.1} Teor de sacarose em folhas coletadas em restrição hídrica, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. ^{13.2} Teor de sacarose em folhas coletas após a reidratação, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).

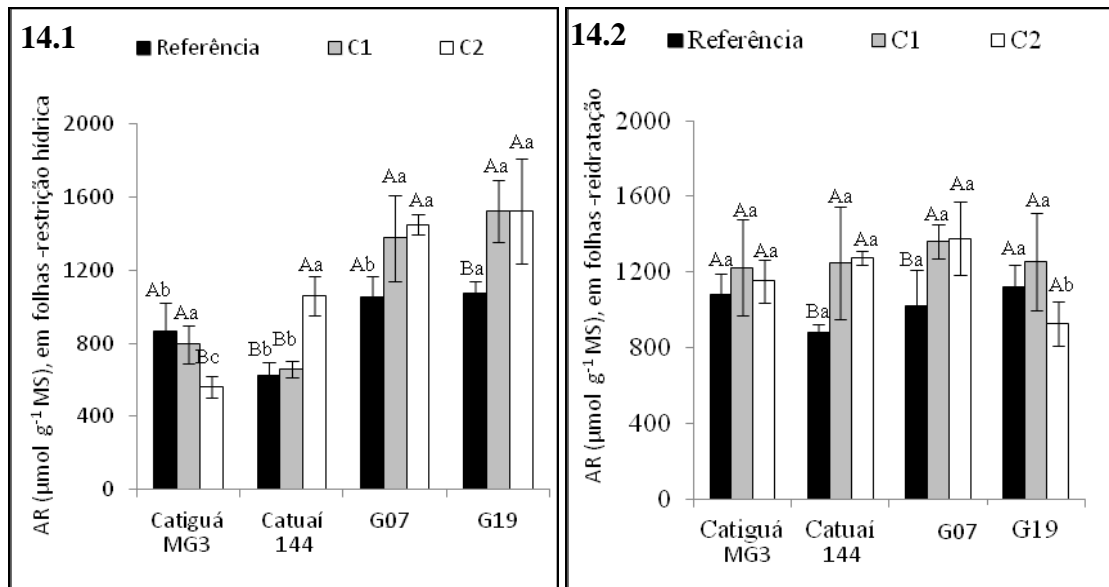


Fonte: Do autor, (2019).

Em restrição hídrica o genótipo Catiguá apresentou uma redução de açúcares redutores, o Catuaí apresentou uma elevação de concentração no tratamento C2, enquanto o G07 manteve os valores de acordo com a referência. O G19 apresentou elevação dos açúcares redutores (AR), tanto em C1 quanto em C2 (FIGURA 14). No momento de reidratação observamos elevação dos AR's em todos os materiais ao comparamos a referência (FIGURA 14).

Figura 14 – ^{14.1} Teor de açúcares redutores- AR em folhas coletadas em restrição hídrica, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. ^{14.2} Teor de açúcares redutores-AR em folhas coletas após a

reidratação, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).



Fonte: Do autor, (2019).

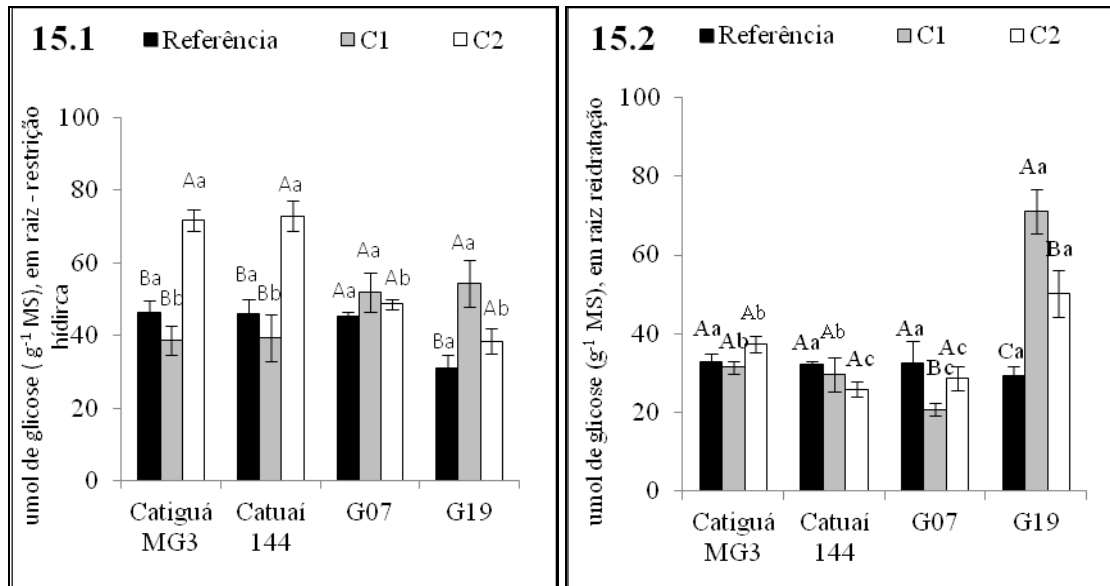
4.4 Carboidratos em raiz

Em condições de restrição hídrica os genótipos Catiguá, Catuaí e G19 apresentaram aumento no teor de amido no sistema radicular, enquanto o G07 manteve a concentração próxima à testemunha (FIGURA 15.1). O mesmo comportamento foi observado para os teores de sacarose e açúcares redutores, onde não se diferenciaram da referência nos momentos de déficit hídrico (FIGURA 16.1; FIGURA 17.1).

Após a reidratação, os teores de amido se estabilizaram e mantiveram-se próximos a referência para Catuaí, Catiguá e G07, entretanto o G19 apresentou elevação dentro dos tratamentos que passaram pelo ciclo C1 e C2. Para sacarose um comportamento parecido foi registrado, contudo além de uma elevação dos teores para o G19 um comportamento semelhante para o G07 foi percebido. Para os valores de açúcares redutores foi observada uma estabilização, aproximando-se a concentração de suas respectivas referencias.

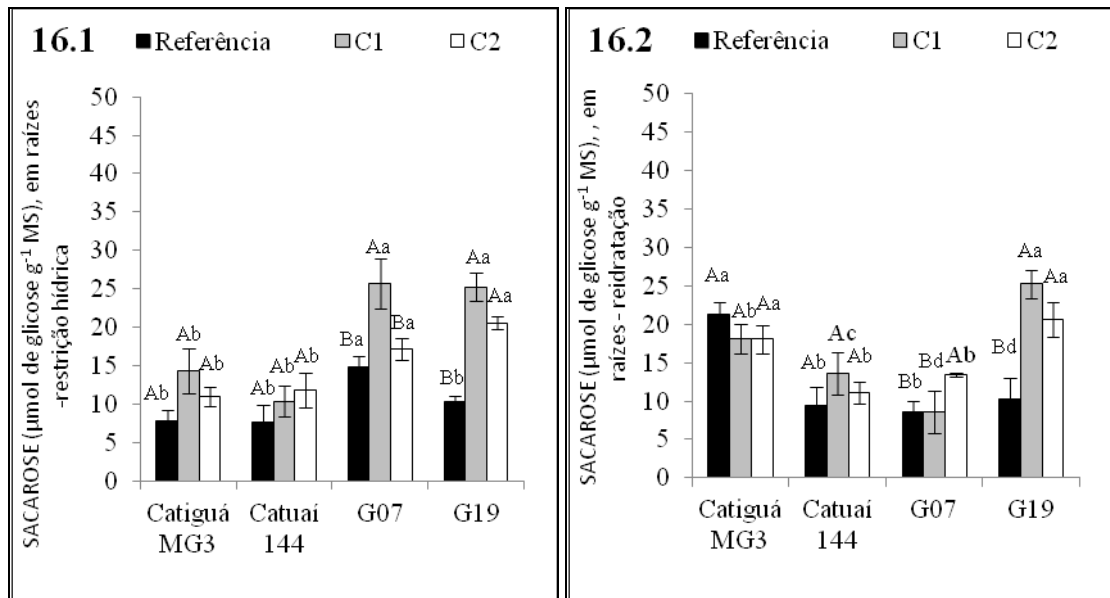
Figura 15- 15.1 Teor de amido em raízes coletadas em restrição hídrica, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. 15.2 Teor de amido em raízes coletas após a reidratação,

nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).



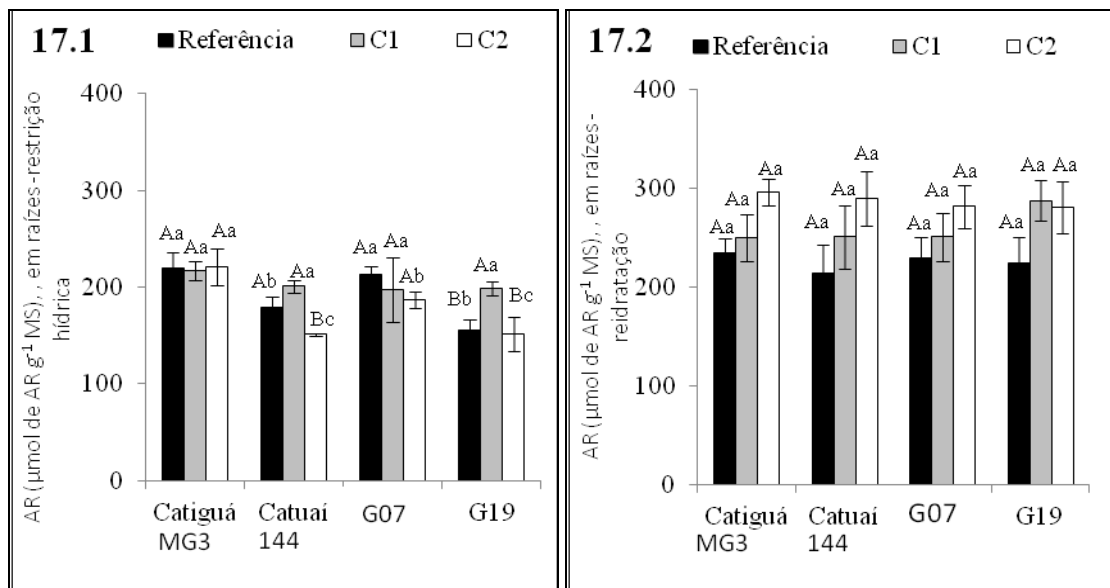
Fonte: Do autor, (2019).

Figura 16- ^{16.1} Teor de sacarose em raízes coletadas em restrição hídrica, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. ^{16.2} Teor de sacarose em raízes coletas após a reidratação, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).



Fonte: Do autor, (2019).

Figura 17- ^{17.1} Teor de açúcares redutores- AR em raízes coletadas em restrição hídrica, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. ^{17.2} Teor de açúcares redutores-AR em raízes coletas após a reidratação, nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).



Fonte: do Autor, (2019).

4.5 Análises biométrias

Entre as variáveis biométricas, o comprimento máximo do ramo principal, diâmetro de caule, número de folhas e área foliar, foi observada uma grande homogeneidade entre os materiais estudados ($p > 0,05$).

Em relação à produção de ramos ladrões o genótipo Catuaí foi o único que demonstrou uma relação entre os ciclos de estresse hídrico, onde os tratamentos referência não tiveram produção de ramos ladrões somente C1 e o C2. Esse fato justificou a ausência de produção de folhas completamente expandidas em ramos ladrões em mudas de referência.

O genótipo Catiguá apresentou um menor número de ramos plagiotrópicos, em comparação aos demais materiais. E foi o segundo genótipo com menor produção de ramos ladrões, contudo esse fato não alterou a área foliar e o número de folhas totais produzidas pelas mudas desse material (TABELA 3).

A área foliar dos genótipos Catiguá, G07 e 19 foram semelhantes entre os três tratamentos impostos, contudo assim como na produção de ramos ladrões o Catuaí se diferiu dos demais nos tratamentos de referência e quando exposto a um ciclo de restrição, contudo ao ser exposto ao segundo ciclo essa redução de área foliar total não foi evidenciada (TABELA3).

Tabela 3 – Biometria final nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas na mesma linha indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).

Comprimento do ramo principal (cm)				Ramos plagiotrópicos (unidade)			Ramos ladrões (unidade)			Diâmetro de caule (mm)		
	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2
Catiguá MG 3	18,0 \pm 4,8Aa	22,5 \pm 6,2Aa	23 \pm 3,0Aa	3,25 \pm 0,9Bb	5 \pm 1,1Ab	2,5 \pm 1Bb	3,25 \pm 1,4Ba	5,0 \pm 1,5Aa	2,5 \pm 0,5Ba	4,74 \pm 0,8Aa	5,00 \pm 0,6Aa	5,75 \pm 0,6Aa
Catuai 144	20,5 \pm 4,1Aa	24,0 \pm 3,3Aa	24,5 \pm 1,1Aa	4,25 \pm 1,3Aa	3,2 \pm 0,9Ac	3,0 \pm 1,1Ab	0,25 \pm 0,4Aa	3,25 \pm 0,9Aa	3,0 \pm 1,4Aa	5,65 \pm 0,6Aa	5,64 \pm 0,5Aa	5,70 \pm 0,6Aa
G07	20,5 \pm 1,9Aa	22,0 \pm 1,5Aa	24,0 \pm 5,1Aa	6,0 \pm 2,3Ab	7,0 \pm 1,1Aa	7,0 \pm 1,0Aa	6,0 \pm 0,9Aa	7,0 \pm 1,3Aa	6,3 \pm 0,9Aa	6,06 \pm 0,8Aa	5,94 \pm 0,1Aa	5,22 \pm 0,9Aa
G19	17,0 \pm 3,9Aa	23,75 \pm 0,9Aa	25,0 \pm 5,9Aa	5,5 \pm 1,0Aa	5,5 \pm 1,0Aa	5,25 \pm 0,9Aa	6,0 \pm 1,4Aa	5,25 \pm 1,2Aa	5,3 \pm 1,9Aa	5,47 \pm 0,9Aa	5,44 \pm 0,8Aa	6,30 \pm 1,5Aa
Folhas no ramo principal-completamente expandidas (unidade)				Folhas nos ramos ladrões (unidade)			Somatório de folhas (unidade)			Área foliar total (m²)		
	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2
Catiguá MG3	20,25 \pm 4,6Aa	22,00 \pm 2,8Aa	22,00 \pm 5,9Ab	11,5 \pm 6,2Aa	17,0 \pm 6,0Aa	18,5 \pm 3,5Aa	48,50 \pm 4,4Aa	69,00 \pm 1,5Aa	69,50 \pm 5,9Aa	0,25 \pm 0,06Ab	0,26 \pm 0,03Aa	0,24 \pm 0,04Aa
Catuai 144	20,00 \pm 2,8Ab	19,00 \pm 3,5Aa	18,50 \pm 1,0Ab	1,5 \pm 2,5Bb	0,50 \pm 1,0Bb	9,0 \pm 4,8Ab	56,75 \pm 7,5Aa	56,75 \pm 4,3Aa	70,50 \pm 10,7Aa	0,23 \pm 0,03Ab	0,16 \pm 0,05Ab	0,20 \pm 0,02Aa
G07	25,00 \pm 4,7Aa	23,75 \pm 2,3Aa	29,00 \pm 3,5Aa	12,5 \pm 4,4Aa	13,5 \pm 7,5Aa	12,5 \pm 6,5Ab	58,00 \pm 12,5Aa	64,00 \pm 8,5Aa	68,75 \pm 7,5Aa	0,32 \pm 0,10Aa	0,31 \pm 0,02 Aa	0,25 \pm 0,06Aa
G19	27,00 \pm 3,8Aa	26,75 \pm 4,9Aa	19,75 \pm 8,0Bb	16,0 \pm 3,3Aa	18,5 \pm 1,9Aa	19,0 \pm 8,5Aa	53,75 \pm 15,6Aa	64,25 \pm 11,7Aa	71,25 \pm 7,5Aa	0,39 \pm 0,13Aa	0,33 \pm 0,11Aa	0,30 \pm 0,13Aa

Fonte: Do autor, (2019).

4.6 Matéria seca

Os dados de matéria seca demonstram semelhança entre os materiais dentro dos ciclos de restrição hídrica. A massa seca de folhas nos ramos principais mantidas nos três tratamentos para o Catiguá, Catuaí e G07, todavia o G19 no tratamento C2 apresentou uma redução em relação aos demais (referência e C1).

Assim como os dados de biometria que apontavam uma maior produção de ramos ladrões no genótipo Catuaí dentro de C1 e C2, o mesmo comportamento foi observado em relação à massa seca. Houve uma elevação na massa seca de folhas de ramos ladrões do Catuaí nos tratamentos de redução hídrica (C1 e C2), em ambos os momentos de coleta. Os demais materiais não apresentaram diferenças estaticamente significativas em comparação aos tratamentos e genótipos.

A massa seca de caule apresentou diferença significativa reduzindo em C2 para o Catuaí e para o G07 em C1 e C2, ambos quando coletados em máximo estresse, os demais genótipos apresentaram valores próximos ao de referência.

A massa seca final de raízes na coleta realizada em estresse foi menor nos genótipos Catiguá, G07 e G19; e o genótipo Catuaí apresentou nos três tratamentos um menor acúmulo de massa seca em comparação aos outros materiais. Não obstante, a massa seca aferida na coleta após a reidratação, apontou um resultado semelhante à testemunha para Catiguá, indicando uma possível recuperação. Os demais genótipos mantiveram uma redução de massa de raízes quando submetidos a ciclos de estresse hídrico mesmo após a reidratação (TABELA 4)

Tabela 4- Partição de Biomassa nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência, nas coletas realizadas em restrição hídrica e após a reidratação. Os valores são médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas na mesma linha indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).

Restrição hídrica	Matéria seca de folhas no ramo principal (g)			Matéria seca de folhas nos ramos ladrões (g)			Matéria seca de caule (g)			Matéria seca de raiz (g)		
	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2
	Catiguá MG3	13,4 \pm 3,2Aa	16,1 \pm 3,0Aa	9,7 \pm 3,2Aa	4,7 \pm 3,2Aa	4,2 \pm 3Aa	2,0 \pm 3,2Bb	11,9 \pm 2,1Aa	12,9 \pm 2Aa	8,3 \pm 1,9Aa	13,7 \pm 3,6Aa	16,2 \pm 4,2Aa
Catuai 144	11,2 \pm 2,6Aa	11,6 \pm 1,5Aa	8,8 \pm 3,6Aa	0,0 \pm 0 Bb	1,9 \pm 1,5Aa	3,2 \pm 3,6Ab	10,8 \pm 1,0Aa	11,1 \pm 3,1Aa	5,7 \pm 1,8Bb	10,2 \pm 2,8Ab	10,3 \pm 5,2Ab	7,0 \pm 1,5Ab
G07	14,1 \pm 3,3Aa	12,2 \pm 3,3Aa	9,9 \pm 4,0Aa	2,4 \pm 3,3Aa	2,0 \pm 3,3Aa	3,9 \pm 4,0Aa	12,5 \pm 1,3Aa	8,5 \pm 1,4Bb	8,2 \pm 2,6Ba	15,5 \pm 2,5Aa	11,7 \pm 3,2Bb	8,7 \pm 1,6Ba
G19	9,1 \pm 1,3Aa	13,0 \pm 3,0Aa	7,1 \pm 1,5Ba	4,2 \pm 1,3Aa	3,9 \pm 3,0Aa	6,5 \pm 1,5Aa	9,7 \pm 1,2Aa	11,0 \pm 3Aa	8,6 \pm 1,5Aa	16,8 \pm 1,9Aa	14,9 \pm 3,0Aa	11,2 \pm 2,3Ba
Reidratação	Matéria de folhas no ramo principal (g)			Matéria seca de folhas de ramos ladrões (g)			Matéria seca de caule (g)			Matéria seca raiz (g)		
	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2
	Catiguá MG 3	10,1 \pm 1,4Aa	10,6 \pm 1,3Ab	10,0 \pm 1,0Ab	2,82 \pm 2,6Aa	1,5 \pm 2,7Aa	4,4 \pm 2,6Aa	10,5 \pm 2,0Aa	10,5 \pm 3,7Aa	8,6 \pm 2,4Aa	12,8 \pm 1,6Aa	10,6 \pm 1,1Aa
Catuai 144	9,4 \pm 0,8Aa	8,2 \pm 1,6Ab	7,2 \pm 1,9Ab	1,89 \pm 2,6Aa	5,0 \pm 0,6Aa	4,3 \pm 1,9Aa	8,8 \pm 2,3Aa	6,3 \pm 0,7Aa	8,8 \pm 3,6Aa	15,3 \pm 4,1Aa	9,6 \pm 2,1Ba	8,5 \pm 1,2Ba
G07	9,6 \pm 2,1Aa	13,3 \pm 2,9Aa	12,2 \pm 2,3Aa	3,9 \pm 3,7Aa	4,8 \pm 2,8Aa	5,3 \pm 4,6Aa	10,9 \pm 1,4Aa	10,8 \pm 1,8Aa	10,9 \pm 1,1Aa	15,2 \pm 2,9Aa	12,3 \pm 2,6Aa	11,5 \pm 1,5Aa
G19	10,4 \pm 1,0Aa	12,8 \pm 2,1Aa	9,8 \pm 1,3Bb	3,87 \pm 2,4Aa	5,4 \pm 2,6Aa	4,3 \pm 2,2Aa	12,5 \pm 2,0Aa	3,9 \pm 3,0Aa	8,9 \pm 1,5Aa	15,5 \pm 3,0Aa	13,8 \pm 1,8Aa	10,2 \pm 3,5Ba

Tabela 5 - Biomassa total e Razão raiz/Parte aérea nos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência, nas coletas realizadas em restrição hídrica e após a reidratação. Os valores são médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas na mesma linha indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).

Biomassa total (restrição hídrica)				Razão Raiz/ Parte aérea (restrição hídrica)		
	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2
Catiguá	43,68 \pm 4,8Aa	49,38 \pm 8,5Aa	28,05 \pm 4,6Ba	0,467 \pm 0,09 Ab	0,487 \pm 0,09 Aa	0,407 \pm 0,16 Ba
Catuaí 144	35,63 \pm 4,6Aa	34,92 \pm 4,7Ab	23,97 \pm 6,5Ba	0,414 \pm 0,09 Ab	0,410 \pm 0,19 Ba	0,402 \pm 0,05 Ba
Gen.07	44,39 \pm 2,7Aa	34,46 \pm 7,1Bb	30,85 \pm 7,4Bb	0,544 \pm 0,11 Ab	0,516 \pm 0,07 Aa	0,411 \pm 0,11 Ba
Gen.19	39,99 \pm 3Aa	42,96 \pm 5,5Aa	33,44 \pm 4,1Aa	0,729 \pm 0,07 Aa	0,526 \pm 0,07 Ba	0,502 \pm 0,10 Ba
Biomassa total (reidratação)				Razão Raiz/ Parte aérea (reidratação)		
	Referência	C1	C2	Referência	C1	C2
Catiguá	31,87 \pm 3,4Aa	31,59 \pm 0,4Aa	33,13 \pm 5,6Aa	0,404 \pm 0,01Ab	0,440 \pm 0,01 Aa	0,502 \pm 0,02 Aa
Catuaí 144	32,73 \pm 5,9Aa	26,08 \pm 4,6Aa	42,8 \pm 3,8Aa	0,662 \pm 0,01 Aa	0,400 \pm 0,02 Ba	0,355 \pm 0,02 Ba
G07	38,11 \pm 3,4Aa	41,16 \pm 3,7Aa	34,54 \pm 1,9Aa	0,577 \pm 0,02 Aa	0,400 \pm 0,02 Ba	0,325 \pm 0,02 Ba
Gen.19	40,01 \pm 3,8Aa	38,96 \pm 4,1Aa	33,95 \pm 3,9Aa	0,503 \pm 0,02 Ab	0,428 \pm 0,01 Aa	0,383 \pm 0,07 Aa

Fonte: Do autor, (2019)

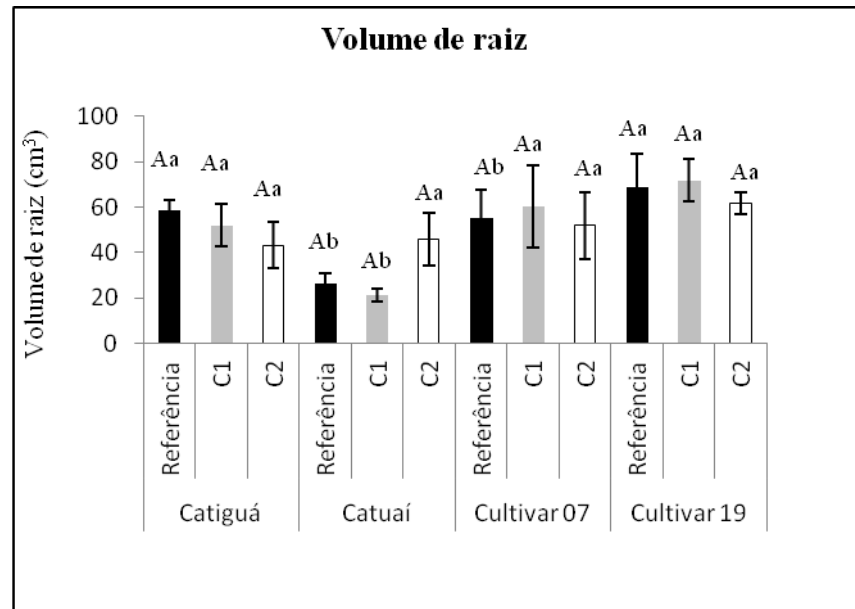
4.7 Matéria seca total

Para o somatório de matéria seca total (massa seca de folhas, caule, ramos ladrões e raiz) quando colhido em estresse, observou-se uma considerável redução para os genótipos Catuaí e G07 quando colhido em estresse e também em reidratação quando comparado aos tratamentos impostos. Em contrapartida os materiais Catiguá e G19 demonstraram uma redução da razão raiz:parte aérea quando colhido em estresse, contudo com a coleta realizada após a reidratação os valores se assemelham a referência (TABELA 4)

4.8 Volume final de raiz

Ao final do experimento foi aferido o volume final do sistema radicular, e assim com os valores de matéria seca foi possível observar um menor investimento em raiz do genótipo Catuaí, em comparação aos demais, contudo após C2 foi possível observar uma elevação no volume equiparando aos demais genótipos (FIGURA 18).

Figura 18 - Volume final de raiz após a imposição dos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).

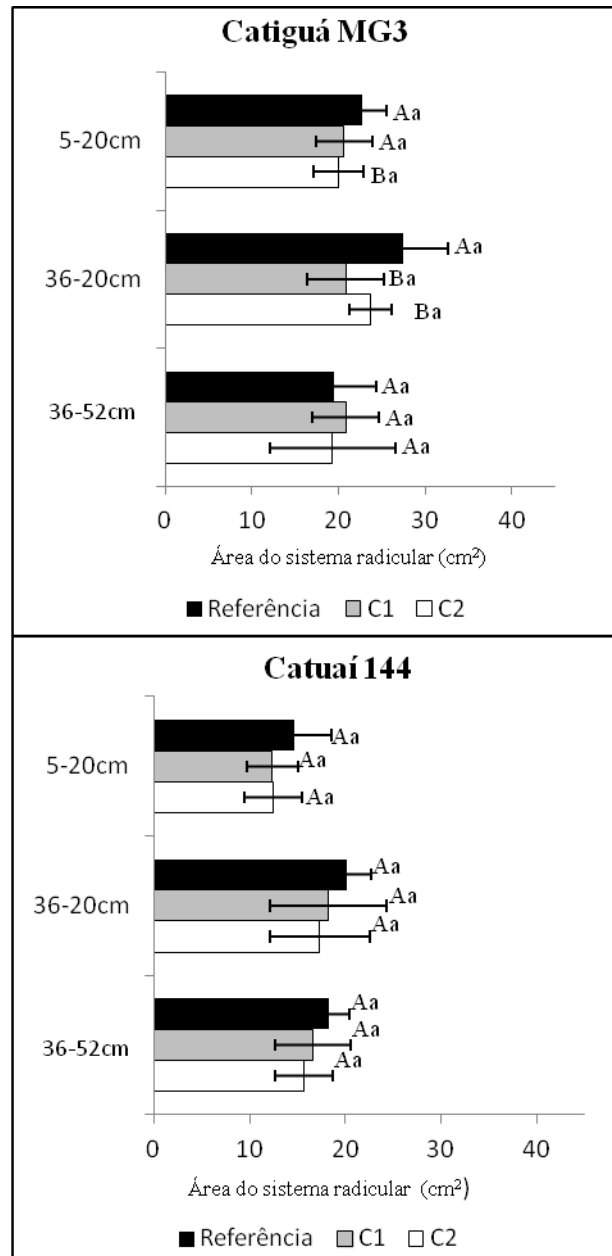


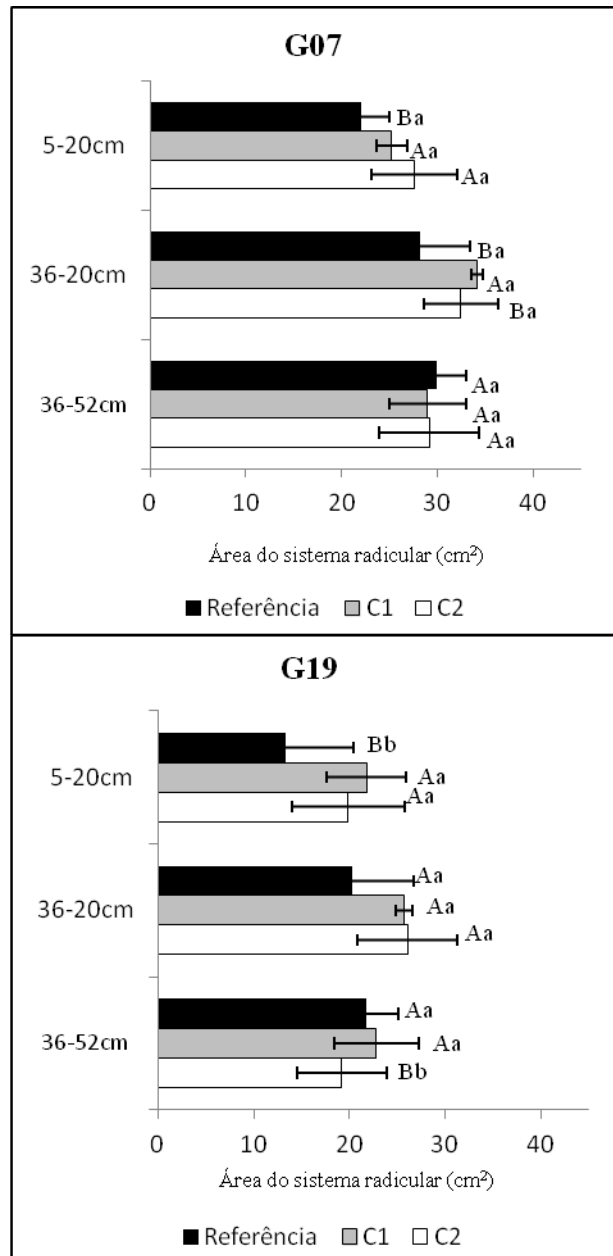
Fonte: Do autor, (2019).

4.9 Crescimento de raízes sob ciclos de redução hídrica

A influência dos ciclos de restrição hídrica ao final do período experimental foi aferida através das análises das imagens (Figura19). Assim como os resultados de massa seca, matéria seca e volume genótipo Catuaí apresentou uma redução de área em meio ao perfil do solo em comparação aos demais materiais (Imagem 20). Foi possível observar que a imposição do déficit hídrico promoveu um maior acúmulo de raízes no primeiro e segundo quadrante para os genótipos Catiguá e G07. E que o G19 apresentou um comportamento diferente dos demais, aprofundando sua área radicular.

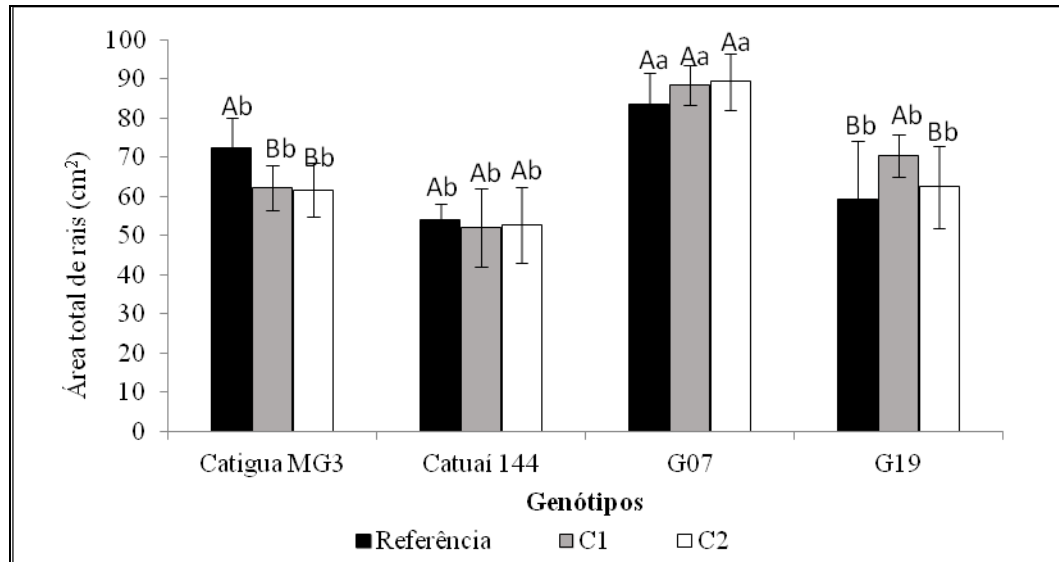
Figura 19 - Área final do sistema radicular, presente nas três regiões seccionadas (5-20cm, 36-20cm, 36-52cm) após a imposição dos tratamentos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica- C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença cada tratamento dentro da mesma área de secção no perfil do solo. Letras minúsculas indicam a comparação entre as três áreas seccionadas dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).





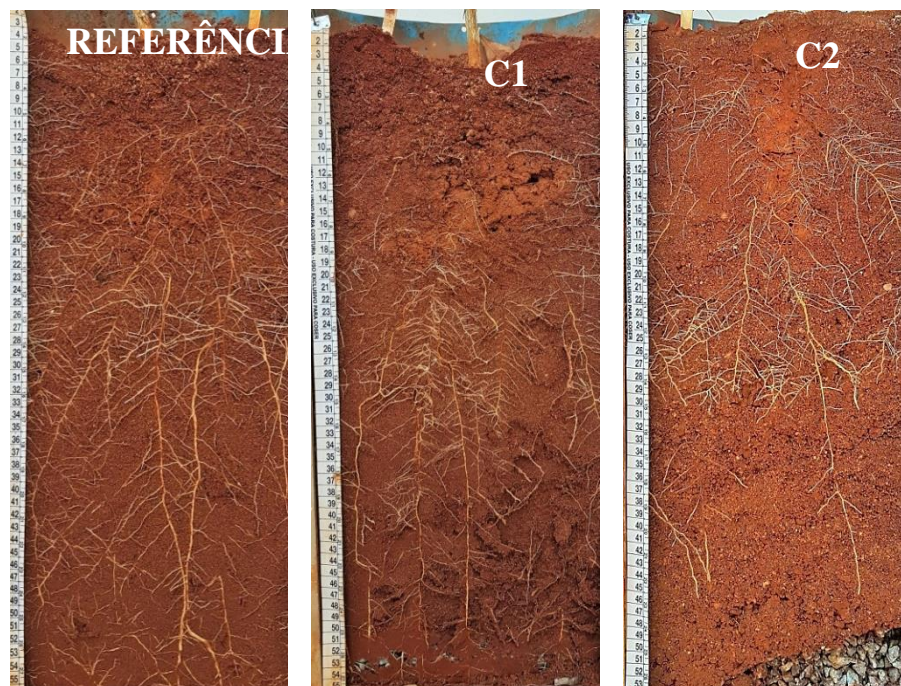
Fonte: Do autor, (2019).

Figura 20 - Área total do sistema radicular, após a imposição dos tratamentos impostos (um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica - C2) em relação às plantas de referência. Os valores são as médias \pm desvio-padrão de quatro repetições. Letras maiúsculas indicam diferença de cada genótipo na imposição dos três tratamentos; letras minúsculas na mesma coluna representam a comparação entre os genótipos dentro de um mesmo tratamento. Teste realizado Scott-Knott, ($p < 0,05$).



Fonte: Do autor, (2019).

Figura 21 - Catiguá MG3 nas três condições hídricas impostas: Referência, um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica - C2



Fonte: Do autor, (2019).

Figura 22 - Catuaí 144- nas três condições hídricas impostas: Referência, um ciclo de restrição hídrica- C1 e dois ciclos de restrição hídrica - C2



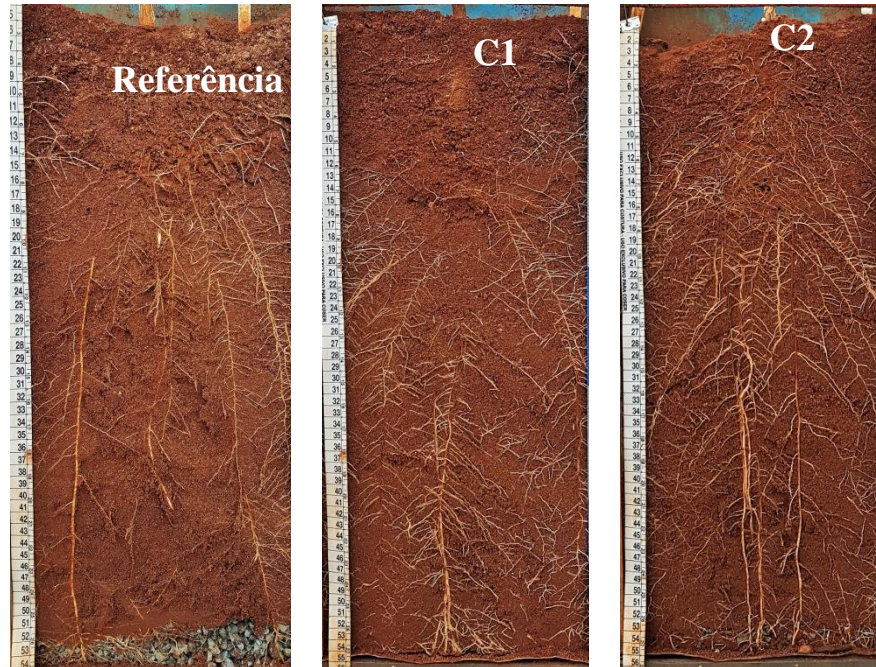
Fonte: Do autor, (2019)

Figura 23 - G07 nas três condições hídricas impostas: Referência, um ciclo de restrição hídrica- C1 e dois ciclos de restrição hídrica - C2



Fonte: Do autor, (2019).

Figura 24 - G19 nas três condições hídricas impostas: Referência, um ciclo de restrição hídrica - C1 e dois ciclos de restrição hídrica - C2



Fonte: Do autor, (2019).

5 DISCUSSÃO

Durante o período experimental observou-se um efetivo controle de água no solo em relação às plantas com a imposição dos tratamentos e às plantas de referência. Esse fato foi comprovado pelas variáveis analisadas como: a umidade de solo em conjunto com o teor relativo de água seguido, pelo potencial hídrico foliar (acima de $-0,25$ MPa), nas plantas de referência, na antemanhã durante todo período experimental (MELO, 2008) (FIGURA 7; TABELA 2). Por conseguinte, nas plantas que foram submetidas períodos de restrição hídrica, observou-se uma redução gradativa de: umidade do solo (abaixo de 35%), conteúdo relativo de água (entre 40-50%) e de potencial hídrico foliar, que ao meio-dia, alcançou valores próximos a $-2,0$ MPa em alguns genótipos (FIGURA 6; FIGURA 7; TABELA 2). Esses dados indicam estresse hídrico moderado, pois alguns trabalhos mostram um estresse severo em que as plantas de café apresentam potencial hídrico foliar a $-3,0$ MPa (MELO, 2008).

Após o período de restrição hídrica, a reidratação permitiu uma expressiva recuperação das variáveis analisadas. Dentre essas, destaca-se o potencial hídrico, que atingiu valores próximos aos das plantas de referência. Esses dados mostram que as mudas dos genótipos Catiguá, Catuaí, G07 e G19, são capazes de suportar períodos de déficit hídrico moderado e apresentam rápida recuperação do seu estado hídrico, ao serem reidratadas. O potencial de água nas folhas descreve o estado energético que essa se encontra, tais valores demonstram a dinâmica solo-planta-atmosfera. As variações desses valores são observadas durante o dia, de acordo com as alterações, como a transpiração da planta, até mesmo para as plantas de referência (TABELA 2), esses valores são amplamente utilizados em estudos de relações hídricas em cafeeiros (WESTGATE, 1994; ALVES, 2011; MARCOS, 2018).

Observou-se uma resposta direta dentro das três condições hídricas estudadas, os quatro genótipos diminuíram a fotossíntese (A), fato comprovado de igual forma para redução da transpiração. Sabe-se que ambas variáveis são interligadas e controladas pela condutância estomática g_s , esta também apresentou taxas inferiores nos momentos de restrição hídrica (FIGURA 9; FIGURA 10; FIGURA 11). Uma resposta rápida estomática às variáveis hídricas demonstra habilidades importantes para a sobrevivência em ambientes de escassez e pode ser um fator marcador na seleção de materiais tolerantes à seca (MARCOS, 2018).

Menores taxas de A sob os períodos de restrição hídrica foram registradas em todos os genótipos, revelando uma previsível redução da taxa de assimilação de CO_2 (FIGURA 9). Todavia, assim como os valores de potencial hídrico, o genótipo Catuaí teve menor expressão nas reduções nas taxas de trocas gasosas em relação às plantas de referência (TABELA 2). Os

demais genótipos apresentaram uma redução significativa de *A*, destacando-se o G07, que na imposição do segundo ciclo de restrição hídrica (C2), apresentou uma elevação de *A*, demonstrando uma possível adaptabilidade ao déficit hídrico moderado e repetido.

Ao analisar os teores de amido nos tecidos foliares, foi observada uma diminuição em relação à referência para os genótipos Catiguá e Catuaí, contudo, o mesmo comportamento não foi expresso para os G07 e G19, em que se mostraram superiores à referência. O período de seca exerce uma série de reações nas plantas de café. A degradação de amido e elevação dos açúcares solúveis e redutores são características esperadas dentro da restrição hídrica (DAMATTA E RAMALHO, 2006). Uma possibilidade, para que esse comportamento não tenha sido evidenciado para esses genótipos (G07 e G19), é que esses ainda não haviam sido totalmente afetados pela imposição da restrição hídrica, indicando a possibilidade de maior tolerância. No trabalho de Andrade (2019) esses genótipos apresentaram valores superiores em curvas de avaliação da assimilação de CO₂ *A* em função da variação da resposta ao fluxo de fótons fotossinteticamente ativos.

Nas plantas, a sacarose é o primeiro carboidrato a ser transportado das regiões de síntese ou de armazenamento de carboidrato para as regiões de consumo. As hexoses provenientes da sacarose são de fundamental importância para o catabolismo e anabolismo dos vegetais, além de fornecerem substratos para o ajustamento osmótico (MELO 2008). Nas folhas, não foi observado uma elevação da sacarose, contudo, nas raízes um comportamento diferente, foi observado para os genótipos G07 e G19; em que houve uma grande elevação dessas moléculas, indicando uma possível mobilização via floema (FIGURA 13; FIGURA 16).

Os teores de AR aumentaram em todos os genótipos, tanto em folhas quanto em raízes em exceção nas folhas do genótipo Catiguá. A elevação dos teores de AR em decorrência do estresse hídrico, tanto nas folhas quanto nas raízes, potencializando as reações de oxido-redução (FIGURA 14). A maioria das espécies quando submetidas ao “déficit-hídrico”, apresentam elevação nos teores de AR, e assim apresentam uma maior capacidade de suportar esse período de baixa atividade fotoquímica (SILVA, 2001). O acúmulo de hexoses nos tecidos foliares pode auxiliar no ajustamento osmótico, uma vez que essas moléculas atraem mais água, e assim auxilia na manutenção da turgescência, reduzindo a desintegração das organelas celulares (TAIZ, 2017; MARTINS, 2019).

Dentro das variáveis biométricas analisadas alguns fatores preponderantes devem ser destacados; como o fato de o comprimento final dos ramos principais e diâmetro de caule não sofrerem alterações entre os tratamentos, e principalmente, entre os genótipos. Essa questão é

justificada pela utilização de mudas com a mesma idade. A produção de ramos, principalmente, de ramos-ladrões e consequente formação de folhas, nesses ramos, se mostrou relacionada com a imposição dos tratamentos, principalmente, para o genótipo Catuaí. Na agricultura convencional é indicada a remoção desses ramos ladrões, uma vez que a proporção de folhas completamente expandidas é muito baixa e estes acabam por funcionar como drenos às plantas. Em campo, com plantas adultas e estabelecidas, estudo observou um maior porte para os genótipos G07 e G19, em variáveis como: diâmetro de copa e altura de plantas (PEREIRA, 2018). Entretanto, o Catuaí é caracterizado por muitos autores como uma planta de porte baixo. (DAMATTA 1993; PEREIRA 2018).

A manutenção da matéria seca dos genótipos G07 e G19 (TABELA 4; TABELA 5; FIGURA 23; FIGURA 24), durante os momentos de restrição hídrica, ao longo do período experimental, ocorreu, proporcionalmente, ao maior desenvolvimento radicular (FIGURA 19; FIGURA 20). Esses genótipos apresentaram crescimento de raízes superior aos demais, à medida que foram expostos ciclos de restrição hídrica (FIGURA 14). Diante disso é possível inferir que o investimento no aprofundamento de raízes é uma característica morfológica utilizada em momentos de restrição hídrica para esses novos materiais.

O genótipo G07 apresentou uma manutenção nos níveis de amido em comparação às plantas de referência, contudo, foi possível observar também uma elevação dos teores de sacarose, indicando um efetivo transporte via floema para os órgãos aéreos durante o período de fechamento estomático, momento em que há menor produção de trioses fosfato (TAIZ, 2017; DAMATTA, 2019). Esse resultado, em conjunto aos valores correspondentes de açúcares redutores, indica que a energia disponível para o crescimento pode justificar a superioridade deste em acumular biomassa em frente aos demais (FIGURA 23).

Uma maior biomassa final de raízes foi observada para os genótipos Catiguá, G07 e G19, após C2. O mesmo comportamento foi observado para o volume de raízes, em que, somente o Catuaí apresentou valores inferiores aos outros materiais. Entretanto uma maior área de dispersão no rizotron foi observada no G07, seguido pelo G19, Catiguá e Catuaí dentro da imposição das restrições hídricas, indicando uma possível diferença na arquitetura e dimensão dos capilares radiculares entre os materiais estudados (FIGURA 20; FIGURA 21; FIGURA 22; FIGURA 23; FIGURA 24). Um fato preponderante ao se considerar dentro do melhoramento de plantas é que, os primeiros 50 cm de profundidade do solo são responsáveis por concentrar mais de 90% das raízes do *C. arabica* e essa proporção é estabelecida no primeiro ano de plantio. A maior fração de raízes “alimentadoras” está concentrada entre 30 a 45 cm do perfil do solo (INFORZATO E REIS, 1974; ALVES 2011). Os dois ciclos de

restrição hídrica foram responsáveis por aumentar, principalmente, a proporção de raízes entre os 35 – 52 cm do solo nos G07 e G19.

O maior crescimento radicular dos G07 e G19 também foi observado por Pereira (2018), em plantas adultas em condição experimental de campo. Assim como Andrade (2019) em um estudo anatômico no qual esses materiais foram submetidos à restrição hídrica observou uma maior proporção de pelos radiculares no G07, e no G19 uma elevação de elementos traqueais, características morfológica que auxiliam na manutenção do suprimento hídrico (ANDRADE, 2019)

Conhecer e selecionar características morfológicas como o maior desenvolvimento de raízes, arquitetura radicular mais plástica e conservação de biomassa em meio à seca, pode auxiliar na seleção de materiais jovens em campo, acelerando o processo do melhoramento. Contudo o crescimento radicular, e a manutenção de biomassa atrelada às modificações bioquímicas são inteiramente relacionadas às variáveis ambientais, sendo passíveis de modificações em detrimento ao meio de inserção (NUTMAN 1933; RAMOS E LIMA 1980; THAM 1992; RENA 2000). Selecionar plantas com a expressão morfológica de genes com essas características desejáveis pode auxiliar na seleção de plantas com a maior produção e não menos importante, maior resiliência e tolerância frente às restrições hídricas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As mudas dos genótipos G07 e G19, em fase de transplântio apresentaram capacidade manutenção da produção de biomassa mesmo após passarem por dois episódios de déficit hídrico moderado. A maior produção de raízes frente à restrição hídrica demonstrou que essa é uma característica de tolerância à seca observada na muda ou planta jovem; podendo ser um atributo considerado no melhoramento de plantas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADU, M.O.; WIESEL, L.; BENNETT, M.J.; BROADLEY, M.R.; WHITE, P.J.; DUPUY L.X. A scanner system for high-resolution quantification of variation in root growth dynamics of *Brassica rapa* genotypes. **Journal of Experimental Botany** 65, 2039–2048, 2014.
- AGUIAR, A.T.E.; GUERREIRO FILHO, O.; MALUF, M.P.; GALLO, P.B.; FAZUOLI, L.C. Caracterização de cultivares de *Coffea arabica* mediante a utilização de descritores mínimos. **Bragantia**, v.63, p.179-192, 2004.
- ALVES, J.D; PAGLIS, C.M; LIVRAMENTO, D.E; LINHARES, S.S.D; BECKER, F.B; MESQUITA, A.C. Source-sink manipulations in *Coffea arabica* L. and its effect on growth of shoots and root system. **Ciências e agrotecnologia**. Lavras, v. 35, n. 5, p. 956-964, 2011.
- ANDRADE, L.I.F. Fotossíntese e anatomia de raiz em genótipos de *Coffea arabica* l. sob déficit hídrico. **Dissertação de Mestrado**- (pós-graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal) UFLA-Lavras 2019.
- BARROS, R.S.; MAESTRI, M.; VIEIRA, M.; BRAGA-FILHO, L.J. Determinação de área de folhas do café (*Coffea arabica* L. cv. 'Bourbon Amarelo'). **Ceres**, Viçosa, v.20, n.107, p.44-52, 1973.
- BASSO, S.M.S. Caracterização morfológica e fixação biológica de nitrogênio de espécies de *Adesmia* DC e *Lotus* L. 1999. 268p. **Tese** (Doutorado)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999, acesso setembro 2018.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de café, v. 6– Safra 2019, n.1- **Primeiro levantamento, Brasília**, p. 1-62, janeiro, 2019.
- DAMATTA F.M.; MAESTRI M.; BARROS R.S.; REGAZZI A.J Water relations of coffee leaves (*Coffea arabica* and *C. canephora*) in response to drought. **J. Horticulture Science**. 68:741-746, 1993
- DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impactos da seca e do estresse térmico sobre a fisiologia e a produção do cafeeiro: uma revisão. **Braz. Journal Plant Physiology**. ISSN 1677-9452. vol.18, n.1, pp.55-81, 2006
- DAMATTA, F. M.; RONCHI, C. P.; MAESTRI, M.; BARROS, R. S. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 04, p. 485-510, 2007.
- DAMATTA, F.M.; AVILA, R.T.; CARDOSO, A.A.; MARTINS, S.C.V.; RAMALHO J.C. Physiological and Agronomic Performance of the Coffee Crop in the Context of Climate Change and Global Warming: A Review. **Journal Agriculture Food Chemistry**. 201866215264-5274, 2018.
- DAMATTA, F.M.; RAMALHO, J.D.C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.18, p.55-81, 2006.
- DAMATTA, FÁBIO M. Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. **Journal of experimental botany**, v. X, p. Y, 2017.

DAMATTA, F.M.; RAHN, E.; LÄDERACH, P.; GHINI, R.; RAMALHO, J. C. Why could the coffee crop endure climate change and global warming to a greater extent than previously estimated? **Journal Climatic change springer**, v. 152, p. 167-178, 2019.

DANNOURA M., KOMINAMI Y., MAKITA N. & OGUMA H. Flat optical scanner method and root dynamics. In *Measuring Roots: An Updated Approach* (ed. S. Mancuso), New York: **Journal Springer**. pp. 127–133, 2012.

DISCHE, Z.; WHISTLER, R. L.; WOLFRAM, M. L. Carbohydrate chemistry. In *General color reactions*. New York: **Academic Press**, p. 477-520, 1962.

DONG, S.F.; NEILSEN, D.; NEILSEN, G.H.; WEIS, M. A scanner-based root image acquisition technique for measuring roots on a rhizotron window. **Hortscience**, 2003.

DOWNIE, H.F.; ADU, M.O.; SCHMIDT, S.; OTTEN, W.; DUPUY, L. X.; WHITE, P. J.; VALENTINE T.A. Challenges and opportunities for quantifying roots and rhizosphere interactions through imaging and image analysis. **Plant, Cell and Environment** 38, 1213–1232, 2015.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EPAMIG - Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais. www.epamig.br. Dezembro de 2019.

EPRON, D; DREYER, E. Long-term effects of drought on photosynthesis of adult oak trees [*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.] in a natural stand. **New Phytologist**, 125: 381-389, 1993.

FAHL, J.I.; CARELLI, M.L.C.; GALLO, P.B.; COSTA, W.M.; NOVO, M.C.S.S. Efeito da enxertia de *Coffea arabica* sobre *C. canephora* e *C. congensis* no crescimento, nutrição mineral e na produção das plantas. **Bragantia** 57:297-312, 1998.

FLEXAS, J.; BOTA, J.; LORETO, F.; CORNIC, G.; SHARKEY, T.D. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. **Plant Biology**, 6: 269- 279, 2004.

FRAGA; C. C. Resenha histórica do café no Brasil. **Revista Agricultura em São Paulo**, 1963 - sp.gov.br

GASCH, C.K.; COLLIER, T.R.; ENLOE, S.F.; PRAGER, S.D. A GIS-based method for the analysis of digital rhizotron images. **Journal Plant Root** 5, 69–78, 2011.

HUXLEY PA, PATEL RZ, KABAARA AM, MITCHELL HW. Tracer studies with P on the distribution of functional roots of Arabica coffee in Kenya. **Annals Journal Applied Biology** 77:159-180, 1974.

INFORZATO, R; REIS, A.J. Desenvolvimento do sistema radicular em diversas fases do crescimento do cafeeiro. Campinas, Instituto Agrônomo, **Circular** 40, 13p, 1973.

IOC (International Coffee Organization) World coffee trade (1963–2013): a review of the markets, challenges and opportunities facing the sector. **International Coffee Council**, 111-5 Rev. 1, p 29, 2014.

IPCC. Proceedings of the 5th assessment report, working group II, climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability; **Cambridge University Press**, Cambridge, U.K., 2014.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: **Verlag Justus Perthes**, 1928.
KUCHENBUCH, R.O.; INGRAM, K.T. Image analysis for non-destructive and non-invasive quantification of root growth and soil water content in rhizotrons. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Für Pflanzenernahrung Und Bodenkunde** 165, 573–581, 2002.

LICHTENTHALER HK. The stress concept in plants: an introduction. In: Csermely P, (ed) *VStress of Life: From Molecules to Man*. **Annals of the New York Academy of Sciences**, 851: 187-98, 1998

MALCZEWSKI, J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. **Progress in Planning**. Volume 62, Issue 1, Pages 3-65, July 2014.

MARCHIORI, P.E.R. Fisiologia de cana-de-açúcar sob déficit hídrico: plasticidade fenotípica, transporte de água, metabolismo antioxidante e fotossíntese. **Tese de doutorado** (Pós-graduação em agricultura tropical e subtropical Campinas) Instituto Agronômico-Campinas SP, 2014.

MARCOS, F.C.C.; SILVEIRA, N.M.; MOKOCHINSKI, J.B.; SAWAYA, A.C.H.F.; MARCHIORI, P. E.R.; MACHADO, E.C.; SOUZA, G.M.; LANDELLE, M.G.A.; RIBEIRO, R.V. Drought tolerance of sugarcane is improved by previous exposure to water deficit. **Journal of Plant Physiology**, 2018.

MARTINS, S.C. V.; SANGLARD, M. L.; MORAIS, L.E.; MENEZES-SILVA, P. E.; MAURI, R.; AVILA, R. T.; VITAL, C. E.; CARDOSO, A. A.; DAMATTA, F. M. . How do coffee trees deal with severe natural droughts? An analysis of hydraulic, diffusive and biochemical components at the leaf level. **Trees-structure and function**, v. 33, p. xx-yy, 2019.

MELO, E.F. Modificações ecofisiológicas bioquímicas e anatômicas em cafeeiro progênie Siriema sob deficiência hídrica. **Dissertação de mestrado**, (Programa de pós-graduação em Agronomia, área de concentração Fisiologia Vegetal). Universidade Federal de Lavras, Lavras 2008.

MENEZES -SILVA, P E. Aclimação fisiológica e bioquímica a ciclos de deficiência hídrica em clones de *Coffea canéfora*. **Tese de doutorado**. Programa de pós-graduação em Fisiologia Vegetal. UFV, Viçosa, 2014.

MENEZES-SILVA.; PAULO E.; SANGLARD, LILIAN M. P. V.; ÁVILA, RODRIGO T.; MORAIS, LEANDRO E.; MARTINS, SAMUEL C. V.; NOBRES, PRISCILLA.; PATREZE, CAMILA M.; FERREIRA, MARCIO A.; ARAÚJO, WAGNER L.; FERNIE, ALISDAIR R.; MILLER, G. L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 31, n. 3, p. 426-428, Mar. 1959.

- NAGEL, K.A.; PUTZ, A.; GILMER, F.; HEINZ, K.; FISCHBACH, A.; PFEIFER, J. & SCHURR U. GROWSCREEN-Rhizo is a novel phenotyping robot enabling simultaneous measurements of root and shoot growth for plants grown in soil-filled rhizotrons. **Functional Plant Biology** 39, 891–904, 2012.
- NUTMAN, F.J. The root system of *Coffea arabica*- II the spatial effect of some soil conditins in modifying the “normal” root system. **Empire Journal of Experimental Agriculture**, Oxford V.1 p 285-196, 1933.
- PEREIRA, V.A. Desempenho agrônômico de progênes de *Coffea arabica* L. em sistema irrigado e sequeiro. **Tese de doutorado**. Programa de pós-graduação em Agronomia/Fitotecnia. UFLA Lavras, 2018.
- POORTERA,C, H.; BÜHLER A, J.; DUSSCHOTEN ADV.; CLIMENT B, J AND.; POSTMAA, J. A meta-analysis of the effects of rooting volume on plant growth. **Functional Plant Biology** 39(10-11):839-850, December 2011.
- PREZOTTI, L.C.; ROCHA, A.C. Nutrição do cafeeiro arábica em função da densidade de plantas e da fertilização com NPK. **Bragantia**, v.63, p.239-251, 2004.progress. Comptes Rendus Geoscience, 337: 57-67, 2005.
- RAMOS, L.C da S.; LIMA, M.M.A. Avaliação da superfície relativa do sistema radicular de cafeeiros. **Bragantia**, Campinas, v.39, p1-5, jan 1980.
- RENA, A.B; GUIMARÃES, P.T.G. Sistema radicular de cafeeiro: estrutura, distribuição atividade e fatores que influencia. **Série De documentos n° 37, Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais**, 2000.
- RONCHI C.P. Aclimação da maquinaria fotossintética do cafeeiro à alteração da força-dreno e à seca, em função da restrição do volume radicular. **Tese de doutorado**. Programa de pós-graduação de Fisiologia Vegetal, UFV, Viçosa, 2005.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**.6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.
- TESFAYE, S. G.; ISMAIL, M. R.; KAUSAR, H.; MARZIAH, M.; RAMLAN, M. F. Plant water relations, crop yield and quality of arabica coffee (*Coffea arabica*) as affected by supplemental deficit irrigation. **International Journal of Agriculture and Biology (Pakistan)** Biol. 15, 666–672, 2013.
- WEATHERLEY, P. E. Studies in the water relations of the cotton plant I: the field measurements of water deficits in leaves. **New Phytologist, Cambrigde**, v. 49, p. 81-97, 1950.
- WEAVER, J.E. Root evelopment in the Grassland Formation. **Carnegie Institution of Washington**. Publ. No. 292, Washington D.C,1919.
- ZANANDREA, I. Tolerance of *Sesbania virgata* plants to flooding. **Australian Journal of Botany**, Melbourne, v. 57, n. 9, p. 661-669, 2010.