

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

ELÍSIA GOMES RAMOS

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E MORFOLÓGICAS DE CULTIVARES DE CAFÉ
ARÁBICA À COMPACTAÇÃO DO SOLO**

**VIÇOSA - MINAS GÉRIAS
2021**

ELÍSIA GOMES RAMOS

**RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E MORFOLÓGICAS DE CULTIVARES DE CAFÉ
ARÁBICA À COMPACTAÇÃO DO SOLO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Teogenes Senna de Oliveira

Coorientador: Júlio Cesar Lima Neves

**VIÇOSA - MINAS GÉRIAS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

Ramos, Elísia Gomes, 1994-
R175r Respostas fisiológicas e morfológicas de cultivares de café
2021 arábica à compactação do solo / Elísia Gomes Ramos. – Viçosa,
MG, 2021.
49 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Teogenes Senna de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 37-41.

1. *Coffea arabica*. 2. Café - Solos. 3. Solos - Compactação.
4. Café - Morfologia. 5. Café -Fisiologia. I. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação
em Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 633.73

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto Pires CRB6 2523

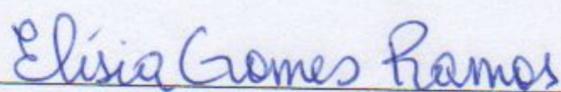
ELÍSIA GOMES RAMOS

RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E MORFOLÓGICAS DE CULTIVARES DE CAFÉ
ARÁBICA À COMPACTAÇÃO DO SOLO

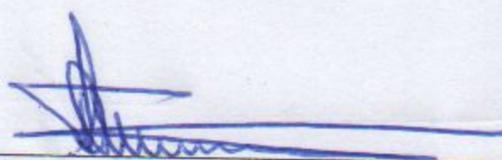
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 31 de maio de 2021

Assentimento:



Elísia Gomes Ramos
Autora



Teogenes Senna de Oliveira
Orientador

**Aos meus pais, Daniel Dias Ramos (*in
memoriam*) e Adriana Da Luz Gomes.**

Aos meus irmãos.

Aos meus sobrinhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar comigo em todas as horas.

Ao meu pai, Daniel (*in memoriam*), por me ajudar a ser quem sou hoje e principalmente pelo carinho, e à minha mãe Adriana por lutar para que hoje eu estivesse onde estou e por me ensinar a ter coragem.

Aos meus irmãos e sobrinhos por terem sido meu suporte, por acreditarem em mim e me apoiarem.

Ao meu companheiro Nayuca Alberto Bampoby pelo apoio principalmente nas horas difíceis.

Aos professores Teogenes e Júlio Cesar pela orientação, pela paciência, pelos ensinamentos e pelo carinho.

Ao grupo do Laboratório de Matéria Orgânica e Resíduos pela convivência e várias contribuições neste trabalho.

Aos professores do Departamento de Solos e aos técnicos que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa e para a minha formação.

Aos meus colegas e amigos Rosemery Alesandra Firmino dos Santos, Rugana Imbana, Jéssica Conceição Nunes Silva, José Danizete Miranda e Elienai, pelo apoio durante a realização do experimento.

À professora Renata Maria Strozi Alves Meira do Departamento de Biologia pelas contribuições e carinho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos e ao Governo Brasileiro.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Solos e a todos que contribuíram de alguma forma para a realização desta pesquisa e para a minha formação.

RESUMO

RAMOS, Elísia Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2021. **Respostas fisiológicas e morfológicas de cultivares de café arábica à compactação do solo.** Orientador: Teógenes Senna De Oliveira. Coorientador: Júlio Cesar Lima Neves.

A compactação causada pela mecanização afeta a qualidade do solo e conseqüentemente o desenvolvimento das culturas, alterando a morfologia e fisiologia das mesmas. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de cinco graus de compactação do solo na fisiologia e morfologia de diferentes cultivares de café. O experimento foi realizado em casa de vegetação, com delineamento de blocos casualizados em arranjo fatorial 5 x 5, sendo cinco cultivares de café e cinco graus de compactação, com quatro repetições, totalizando 100 unidades experimentais. As cultivares utilizadas foram Arara, Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho, Mundo Novo e Paraíso, e os graus de compactação foram 68, 74, 80, 86 e 92%. No ensaio experimental foram avaliadas as seguintes variáveis: altura das plantas; diâmetro do ramo ortotrópico; número de folhas e de entre-nós; massa úmida e massa seca das raízes e da parte aérea; área foliar; comprimento, área de superfície e volume das raízes; diâmetro de raízes finas e grossas e trocas gasosas (condutância estomática, transpiração, fotossíntese e concentração interna de CO₂). Os resultados obtidos mostraram que os altos graus de compactação, acima de 80%, afetaram negativamente a maioria das variáveis; a cultivar Catuaí Vermelho apresentou pior desempenho independente do grau de compactação, enquanto o Arara e o Paraíso foram os mais resistentes ao solo compactado. A estrutura anatômica das raízes foi modificada com a compactação do solo, não sendo observado diferenças entre as cultivares.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L. Compactação. Morfologia. Fisiologia

ABSTRACT

RAMOS, Elísia Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2021. **Physiological and morphological responses of arabica coffee cultivars to soil compaction.** Adviser: Teogenes Senna De Oliveira. Co-adviser: Júlio Cesar Lima Neves.

The compaction caused by mechanization affects the soil quality and consequently the development of crops, changing their morphology and physiology. This work aims to evaluate the effect of five degrees of soil compaction on the physiology and morphology of different coffee cultivars. The experiment was carried out in a greenhouse, with a randomized block design in a 5 x 5 factorial arrangement, with five coffee cultivars and five degrees of compaction, with four replications, totaling 100 experimental units. The cultivars used were Arara, Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho, Mundo Novo and Paraíso, and the degrees of compaction were 68, 74, 80, 86 and 92%. In the experimental test, the following variables were evaluated: plant height, diameter of the orthotropic branch, number of leaves and nodes, wet mass of roots and shoots, leaf area, dry mass, length, surface area and volume of the roots, diameter of thin and thick roots and gas exchange (stomatal conductance, transpiration, photosynthesis and internal CO₂ concentration). The results obtained showed that the high degrees of compaction, above 80%, negatively affected most of the variables, the cultivar Catuaí Vermelho showed the worst performance regardless of the degree of compaction, while Arara and Paraíso were the most resistant to compacted soil. The anatomical structure of the roots was modified, with no differences between cultivars.

Keywords: *Coffea arabica* L. Compaction. Morphology. Physiology.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
2.2. Montagem das unidades experimentais e compactação do solo	12
2.4. Análises estatísticas.....	17
3. RESULTADOS.....	19
3.1. Respostas biométricas das cultivares de café à compactação.....	19
3.2. Respostas fisiológicas das cultivares de café à diferentes níveis de compactação.....	22
3.3. Respostas morfológicas e anatômicas das raízes das cultivares de café à compactação	24
4. DISCUSSÃO.....	30
4.1. Variáveis biométricas das cultivares de café à compactação	30
4.2. Variáveis fisiológicas das cultivares de café	31
Trocias gasosas	31
Clorofilas	32
4.3. Variáveis morfológicas e anatomia radicular	33
Morfologia radicular.....	33
Anatomia das raízes.....	34
5. CONCLUSÕES	36
6. REFERÊNCIAS	37
APÊNDICE A – Tabelas de médias	42
APÊNDICE B – Tabela de porcentagem de comprimento raiz por camada.....	47

1. INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma atividade muito importante no Brasil sendo o maior produtor mundial de café (USDA, 2020). A produção de café tem acompanhado a história do país, tornando-se um dos principais contribuintes para seu desenvolvimento econômico (VOLSI et al., 2019), gerando empregos e proporcionando o aumento da renda do produtor rural (ALFONSI et al., 2019). Em 2020 a produção nacional foi de 63,08 milhões de sacas de café, sendo 48,77 milhões de arábica e 14,31 milhões de conillon, em uma área cultivada correspondente a 2,16 milhões de ha. O estado de Minas Gerais é o maior produtor, tendo produzido em 2020 cerca de 34,65 milhões de sacas (CONAB, 2020).

A posição brasileira se deve em grande parte à modernização da agricultura, impulsionada pela introdução de novas tecnologias, entre outras, o melhoramento e a mecanização na produção, reduzindo custos, trazendo assim várias transformações no dia a dia da cafeicultura brasileira (FERREIRA JÚNIOR et al., 2016; SANTINATO et al., 2015). As novas tecnologias tornam-se, assim, um dos principais responsáveis por conferir qualidade à produção, assegurando a posição do Brasil no cenário mundial (MAIA et al., 2020).

No geral, a qualidade do solo tem sido relacionada à capacidade deste recurso de desempenhar suas funções preservando ao máximo suas propriedades biológicas, físicas e químicas, garantindo a manutenção da saúde das plantas e animais (DORAN; PARKIN, 1996). Apesar dos benefícios, a mecanização pode levar a consequências negativas, degradando tanto o solo como a água, o que tem impulsionado o aumento de pesquisas relacionando à mecanização com a alteração dos atributos do solo e conseqüentemente, a perda da qualidade do solo nos últimos anos (DEPERON et al., 2016; NASCIMENTO et al., 2017). Uma das consequências do uso intensivo de máquinas, principalmente quando em condições de umidade inadequadas, é a compactação do solo, o que pode ocorrer durante várias etapas da produção agrícola (preparo do solo, tratos culturais, colheita, etc...) impactando negativamente sua qualidade (KELLER et al., 2017).

A compactação é caracterizada pelo ajuste de partículas do solo e/ou agregados, impulsionado pela aplicação de tensões que vão além da resistência mecânica do solo. Com isso, solo com textura fina e média como solos argilosos são mais susceptíveis a compactação, quando comparados com solos de textura arenosa, e isso levando em conta a umidade do solo,

haja vista que este interfere na coesão entre as partículas, aumentando a vulnerabilidade do solo a compactação com o aumento da umidade (AMPOORTER et al., 2012).

As deformações na estrutura do solo promovem a redução de macroporos, o aumento da resistência do solo a penetração das raízes, a diminuição da condutividade hidráulica do solo, o aumento do déficit de oxigênio e das restrições ao crescimento radicular (SHAH et al., 2017), resultando na redução da produtividade (COLOMBI; KELLER, 2019).

O desenvolvimento da cultura do cafeeiro é afetado pela compactação do solo principalmente devido o aumento do déficit hídrico e as alterações na temperatura do solo, interferindo diretamente na fotossíntese, na condutância estomática, na taxa de fotossíntese líquida e na atividade enzimática (MENEZES-SILVA et al., 2017). Aspectos fisiológicos e a morfologia da planta também são afetados, causando redução do crescimento e do diâmetro das raízes e alterando sua anatomia (POTOCKA; SZYMANOWSKA-PULKA, 2018), diminuição da área foliar (GUBIANI; REICHERT; REINERT, 2014) e induz ao fechamento estomático diminuindo assim a fotossíntese (MORALES et al., 2018). Logo, em solos compactados a planta tem seu funcionamento fisiológico alterado, o que compromete o desempenho produtivo da cultura, principalmente devido ao déficit hídrico, à deficiência nutricional e a deficiência de oxigênio (LIU et al., 2017).

A escolha de cultivares é um importante fator a ser levado em conta na implantação de qualquer cultura. Do ponto de vista da física do solo, existe uma carência de informações relacionadas ao comportamento de cultivares face a limitações estruturais do solo. A maioria das informações está associada ao porte, a rusticidade, a produtividade, a resistência a doenças entre outros aspectos. Assim sendo, é importante a realização de pesquisas que favoreçam a identificação e indicação de cultivares mais adaptadas e responsivas a tais limitações. Algumas cultivares têm potencial para maior tolerância à seca, outras possuem um sistema radicular mais rústico (CARVALHO et al., 2017) e outras se ajustam melhor a condições restritas de porosidade. O bom desenvolvimento das plantas depende das interações entre os atributos do solo com o ambiente radicular (CARDUCCI et al., 2014), logo cultivares com sistema radicular mais vigoroso permitem uma maior eficiência na absorção e partição de nutrientes mesmo em condições restritas da qualidade física do solo.

Diante do exposto, o presente estudo parte da hipótese de que a compactação interfere no crescimento e desenvolvimento das plantas refletindo na produtividade das plantas, o que pode passar a ser limitante, mesmo pós-correção, seja durante o cultivo ou por ocasião da

renovação dos cafezais e que cultivares de café podem ter comportamentos diferentes frente a compactação, sendo mais um indicativo para a recomendação de cultivares ou mesmo a consideração em programas de seleção/melhoramento genético. A avaliação da influência da compactação do solo no desempenho da cultura e identificação de cultivares que melhor se adaptem a essa condição contribui para a minimização dos danos causados. Nesse contexto, avaliou-se o efeito de cinco graus de compactação do solo na fisiologia e morfologia de diferentes cultivares de cafeeiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Solo e plantas utilizados no ensaio

O ensaio foi conduzido em casa de vegetação, na Universidade Federal de Viçosa, no período de março a julho de 2020, utilizando terra fina seca ao ar (TFSA) proveniente de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd) coletado na profundidade de 20-40 cm (horizonte B). A caracterização deste solo (EMBRAPA, 2017) está representada na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades químicas e físicas da camada 20-40 cm do Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd) utilizado no experimento

Propriedades químicas							
pH H ₂ O	MO (dag kg ⁻¹)	P-rem (mg L ⁻¹)	Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)			
5,12	0,94	3,6	0,57	0,04			
P disponível	K disponível	S	B	Cu	Mn	Fe	Zn
-----mg dm ⁻³ -----							
0,3	10	30,50	0,01	0,36	1,00	29,60	0,43
Al	H + Al	SB	t	T	V	m	
-----cmol _c dm ⁻³ -----							
0,00	1,80	0,64	0,64	2,44	26,20	0,00	
-----%-----							
Propriedades físicas							
AG	AF	Silte	Argila	Ds (g cm ⁻³)	EU (g cm ⁻³)		
-----kg kg ⁻¹ -----							
0,13	0,09	0,03	0,75	1,03	0,34		

Fonte: Autora

pH H₂O determinado por potenciometria em solução (1:2,5; solo: água); MO: Matéria pH H₂O = determinado por potenciometria em solução (1:2,5; solo: água); MO: matéria orgânica estimada pelo teor C orgânico total determinado por Walkey-Black multiplicado por 1,724; P-rem: P remanescente extraído com 10 mmol L⁻¹ de CaCl₂, contendo 60 mg L⁻¹ de P na relação 1:10, com determinação do teor de P em solução após agitação; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, os dois primeiros determinados por fotometria e o segundo por titulometria; S: enxofre extraído por fosfato monocálcico em ácido acético e determinado por fotometria; B: boro extraído com água quente e determinado por fotometria; P e K disponível, Fe, Zn, Mn e Cu extraídos com Mehlich-1 e determinados por fotometria de chama (K disponível) e espectrometria de absorção atômica; H+Al: acidez potencial extraídos por acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ em pH 7.0 e determinados por titulometria; SB: soma das bases é a soma de K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺; t: capacidade de troca de cátions efetiva calculada pela SB + Al³⁺; T: capacidade de troca de cátions total calculada pela SB + (H+Al); V: saturação por bases que é calculada pela fórmula: SB x 100/T; m: saturação por Al, calculada pela fórmula 100 x Al³⁺/t; Análise granulométrica (AG: areia grossa, AF: areia fina, silte e argila) realizada por dispersão física com agitação lenta por 16 horas (50 rpm) e química com NaOH 0,1 mol L⁻¹ com determinação de AG e AF por tamizamento e argila e silte pelo método da pipeta; Ds = densidade do solo determinada pelo método do anel volumétrico; EU = equivalente de umidade determinado pelo método da centrifugação.

O solo foi corrigido quimicamente de acordo com as recomendações para o estado de Minas Gerais (ALVAREZ; RIBEIRO, 1999), para a cultura do café. e a adubação seguiu as recomendações para experimentos em casa de vegetação, conforme Novais et al. (1991).

As cultivares de café utilizadas foram Arara, Catuaí Amarelo IAC 62, Catuaí Vermelho 144, MGS Paraíso 2 e Mundo Novo IAC 379-19. O Arara por possuir maior tolerância a seca, os Catuaís por possuir maior representatividade de área plantada (CRUZ et al., 2020) e o Mundo Novo e o Paraíso devido a adaptação desses ao cultivo e colheita mecanizados e ainda a cultivar Paraíso tem-se desenvolvido bem em várias regiões aptas para produção de café arábica sendo por isso muito recomendada para o Estado de Minas Gerais e outras regiões (CARVALHO, 2008).

Tabela 2 – Cultivares de café (*Coffea arábica*) do ensaio experimental, cruzamento de origem, características e instituição de desenvolvimento da cultivar

Cultivares	Cruzamento de origem	Características biométricas	Instituição de origem
Arara	Hibridação natural entre Obatã e Catuaí Amarelo	Porte baixo e alto vigor.	Fundação Procafé*
Catuaí Amarelo IAC 62	Caturra Amarelo IAC 476-11, e Mundo Novo IAC 374-19.	Porte baixo, 2,0 a 2,3 m de altura e alto vigor.	IAC**
Catuaí Vermelho 144	Caturra Amarelo, IAC 476-11 e Mundo Novo IAC 374-19	Porte baixo, 2 a 2,4 m de altura e alto vigor.	IAC**
Mundo Novo IAC 379-19	Sumatra e Bourbon Vermelho	Porte alto, 3 a 3,8 m de altura e alto vigor.	IAC**
MGS Paraíso 2	Catuaí Amarelo IAC 30 e o híbrido de Timor UFV 445-46	Porte baixo, 1,95m de altura e alto vigor.	EPAMIG*

*Fonte: <https://www.fundacaoprocafe.com.br/cultivares>.

**Fonte: http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/cafe/tabela_rnc_cultivares_cafe_iac.pdf.

IAC – Instituto Agrônomo de Campinas; EPAMIG – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais.

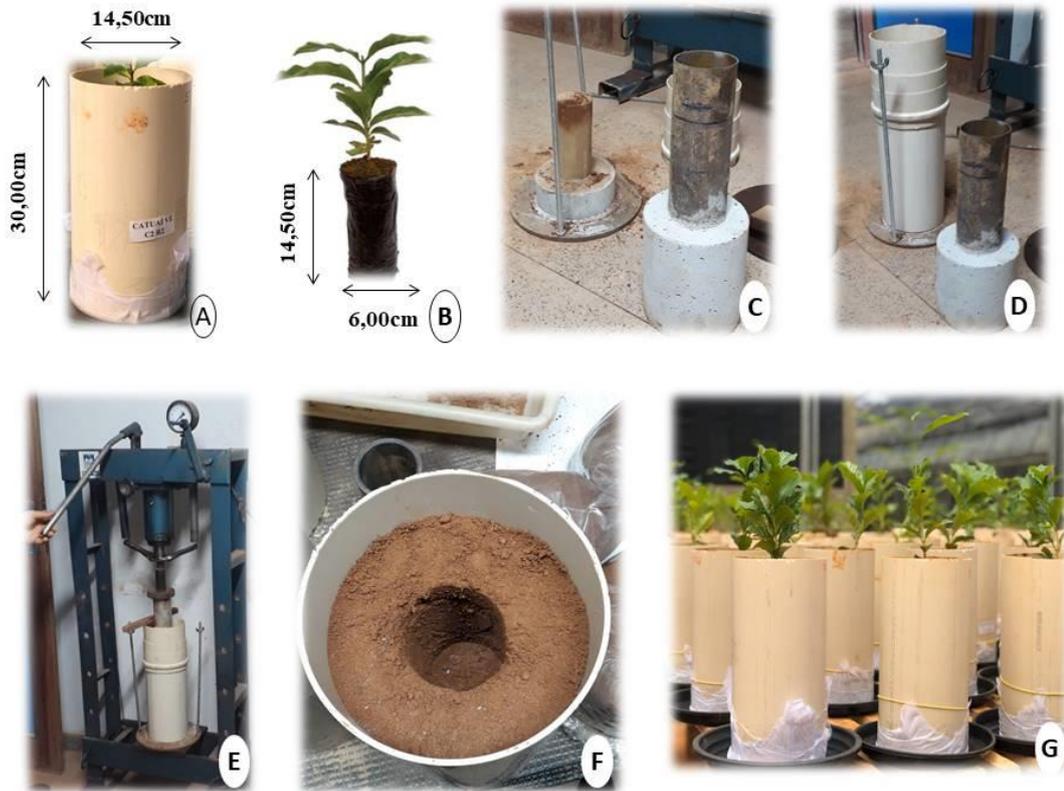
2.2. Montagem das unidades experimentais e compactação do solo

O experimento foi montado em arranjo fatorial 5 x 5 (cinco cultivares de café e cinco graus de compactação), sendo utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições, totalizando 100 unidades experimentais.

Os diferentes níveis de compactação foram determinados pelo grau de compactação (GC, %) do solo usando a equação: $GC = (D_s/D_{max}) * 100$, na qual D_s é a densidade do solo ($g\ cm^{-3}$) na condição natural de ocorrência, obtida pelo método do anel volumétrico (Embrapa, 2017) e D_{max} ($g\ cm^{-3}$) é a sua densidade-referência (máxima) determinada por meio do teste de compressão uniaxial (HAKASSON, 1990). O solo no local de coleta e em condições naturais apresentou grau de compactação (GC) de 74%, sendo considerado os seguintes graus de compactação para o presente ensaio: GC1 = 68% ($D_s = 0,94\ g\ cm^{-3}$), GC2 = 74% ($D_s = 1,03\ g\ cm^{-3}$), GC3 = 80% ($D_s = 1,11\ g\ cm^{-3}$), GC4 = 86% ($D_s = 1,19\ g\ cm^{-3}$) e GC5 = 92% ($D_s = 1,27\ g\ cm^{-3}$). Posteriormente foi determinado o volume da coluna de PVC ($V = 4.128,25\ cm^3$) e determinada a massa de solo correspondente a cada um dos graus de compactação. As unidades experimentais foram montadas com o solo na umidade ótima de compactação ($0,32\ g\ g^{-1}$), colocado nas colunas de PVC e compactado com auxílio de prensa hidráulica de 15 t de capacidade. Para tal, a quantidade de solo correspondente a cada grau de compactação foi dividida em cinco porções, constituindo uma camada cada, sendo compactada uma por vez, de forma a uniformizar o máximo possível, mantendo a densidade desejada em toda a coluna. O volume do saco da muda de café ($V = 409,98\ cm^3$) foi descontado em cada coluna, deixando um orifício equivalente ao volume médio das mudas de café com o uso de um cilindro de metal no processo de compactação, garantindo o volume inicial ocupado pelo sistema radicular e pelo substrato das mudas utilizadas. Procurou-se evitar o efeito do crescimento de raízes na interface entre a parede do tubo de PVC e o solo compactado.

Na parte inferior da unidade experimental foi colocada uma tela para impedir a perda do solo. A quantidade de água foi mantida constante, de acordo com pesagens diárias dos vasos e reposição de água tendo em conta a porosidade do solo, por capilaridade e regas diárias alternadas.

Figura 1 – Esquema de montagem das colunas de solo compactado: tubo de PVC utilizado (A), muda de café das cultivares (B), estrutura montada com cilindro de ferro para moldar o orifício para a muda (C), PVC com encaixe (D), compactação pelo uso da prensa hidráulica (E), coluna compactada com orifício para receber a muda (F) e colunas de PVC após transplântio das mudas (G)



Fonte: Autora

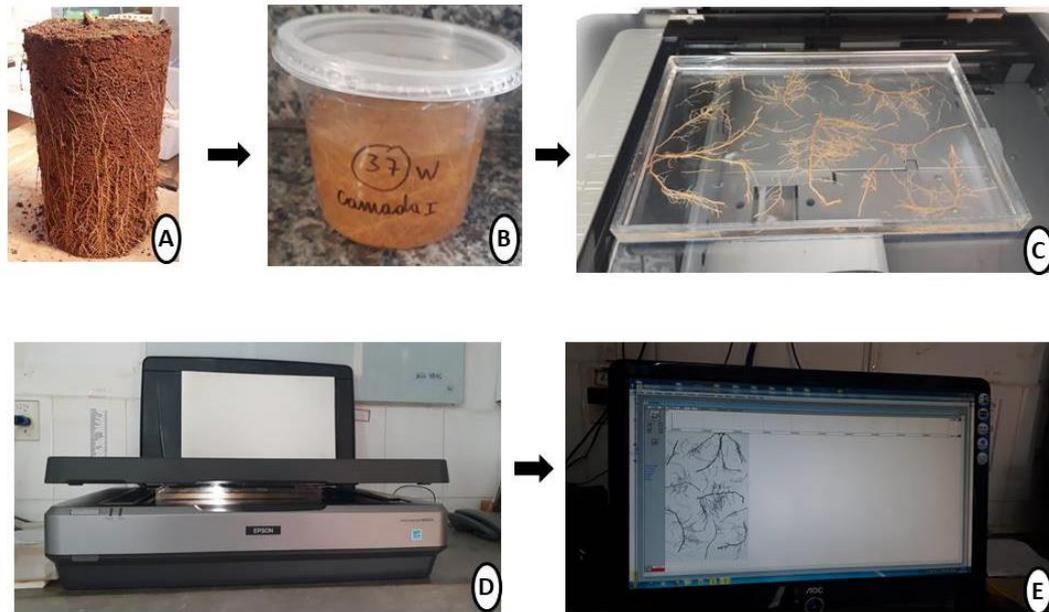
2.3. Avaliações biométricas, fisiológicas e anatômicas

As avaliações biométricas realizadas foram a determinação da altura das plantas com auxílio de régua graduada, diâmetro do ramo ortotrópico com uso de paquímetro digital e a contagem do número de folhas. Ao final do experimento (aos 120 dias após o transplântio) foi feita a contagem do número de entrenós presentes no ramo ortotrópico, seguido da coleta separada da parte aérea e das raízes, ambas pesadas para obtenção de suas massas de matéria fresca. A determinação da área foliar total também foi feita utilizando um medidor de área foliar modelo LI-3100C (LI-COR, 1995).

Os índices de clorofila *a* e *b* foram determinados utilizando o clorofilômetro clorofiLOG, modelo CFL 1030 (FALKER, 2008), realizadas no primeiro par de folhas completamente expandidas e em bom estado fitossanitário. As trocas gasosas: taxa de fotossíntese líquida (*A*), condutância estomática (*g_s*) e transpiração (*E*) foram determinadas por meio de um analisador de gás infravermelho (IRGA) Li-6400 XT (Infra-red Gas Analyzer) nas seguintes condições: temperatura ambiente, intensidade de luz de 1000 μmol , concentração de CO_2 igual a 400 $\mu\text{mol s}^{-1}$, entre as 7 e 11 h, no primeiro par de folhas completamente expandidas e em bom estado fitossanitário, aos 65 DAT (dias após transplântio). Ainda foram determinadas a eficiência de utilização de C ($\text{EiCi} = \text{A}/\text{Ci}$), a partir da razão entre a fotossíntese e a concentração interna de C, e a utilização de água ($\text{EiUA} = \text{A}/\text{E}$), considerando a razão entre a fotossíntese e a transpiração.

A morfologia radicular foi realizada pela separação das raízes, tendo sido a coluna de solo dividida em três partes. As raízes de cada uma dessas partes foram lavadas separadamente, colocadas em álcool etílico 30%, levadas a refrigeração a 2°C e, posteriormente, digitalizadas em um scanner profissional da marca Epson acoplado a um computador com o software WinRHIZO PRO 2009 instalado. As amostras foram dispostas na superfície do scanner de modo que as raízes não ficassem sobrepostas, sendo a aquisição das imagens feita diretamente. Os dados obtidos permitiram obter o comprimento total, o diâmetro médio de raízes finas (< 2 mm) e de raízes grossas (2 a 5 mm), o volume total e a área de superfície total das raízes.

Figura 2 – Esquema do escaneamento das raízes: coluna de solo com a raiz para separação (A); raiz em álcool 30% (B); raízes dispostas na placa de acrílico com água (C); scanner profissional durante escaneamento (D) e computador com o software WinRHIZO PRO 2009 instalado para aquisição das imagem e obtenção dos dados de morfologia de raiz (E)



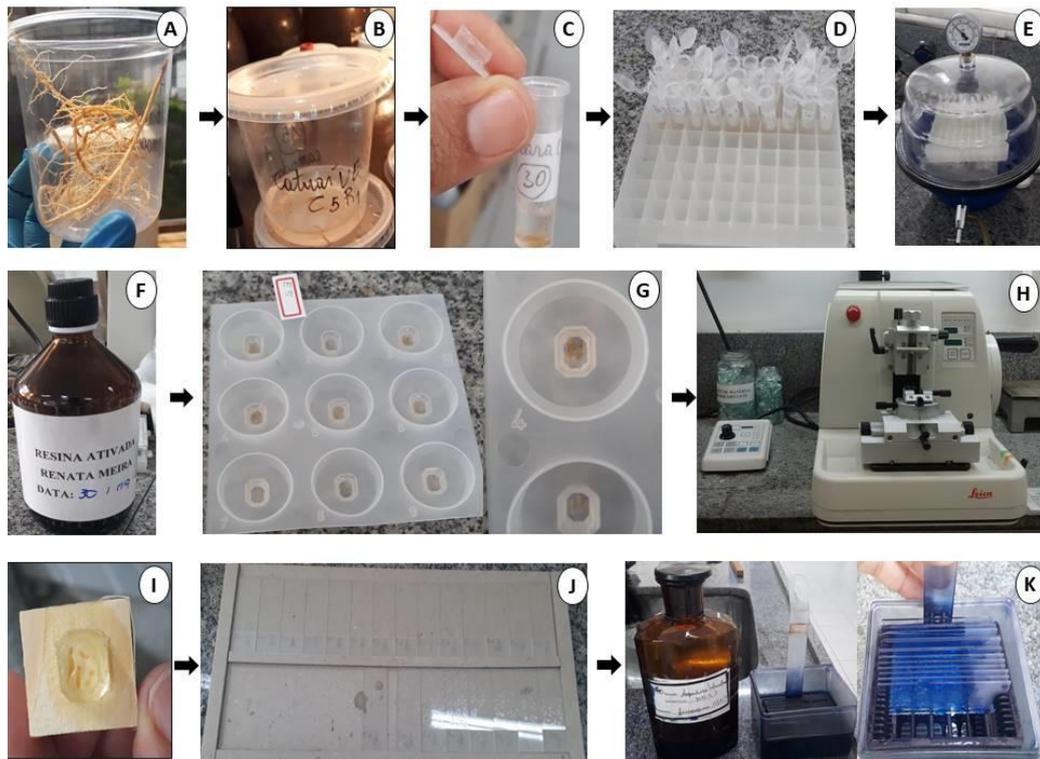
Fonte: Autora

A avaliação da anatomia das raízes foi feita utilizando amostras de raízes da parte inferior da coluna de solo, porção em que o desenvolvimento desse órgão está mais sujeito aos efeitos dos diferentes GC's, 1 (68%), 3 (80%), 4 (86%) e 5 (92%). As raízes foram separadas, lavadas e fixadas em Formalina Neutra Tamponada (FNT) e armazenadas sob refrigeração por uma semana (KRAUS; ARDUIN, 1997). Após fixação, as amostras foram colocadas em banho etanólico a 30 e 50 % por 24 h cada um e estocados em etanol 70 %.

Para a preparação dos cortes histológicos, as amostras foram submetidas a desidratação pela imersão em duas etapas distintas utilizando etanol 85 e 95 %, em sequência, sendo em cada etapa utilizada dessecador sob vácuo por duas horas. Posteriormente foi realizada a pré-infiltração, na qual as raízes foram colocadas em solução de 1:1 (v/v) de historesina (Historesin, Leica) pura ativada em álcool etílico 95 % por 12 h. Após essa etapa, as amostras foram colocadas em historesina pura ativada, permanecendo nessa condição por um mês. Após a infiltração, o material foi incluído em histomoldes utilizando historesina acrescida de solução endurecedora. Para polimerização, os histomoldes foram levados a estufa a 30- 40 °C por 48 h. Após a polimerização, o material foi retirado do histomolde e colocado em um bloco

de madeira utilizado como suporte, sendo feitos cortes de 5 μm de espessura em micrótomo rotativo de avanço automático (Leica RM2265, Deerfield, IL, USA), usando navalhas de vidro. Após os cortes passou-se a fase de coloração com azul de Toluidina em pH 4,4 (O'BRIEN; MCCULLY, 1981) e montadas com resina sintética tipo Permount (Fisher[®], Alemanha). A documentação fotográfica foi realizada em fotomicroscópio (Olympus AX 70, Tóquio, Japão) no Laboratório de Anatomia Vegetal da Universidade Federal de Viçosa, MG.

Figura 3 – Esquema das etapas para análise da anatomia das raízes: coleta e amostragem das raízes (A); Fixação com formalina neutra tamponada (B); Lavagem com água (C); submersão em álcool para desidratação (D); amostras submetidas à vácuo para auxiliar na desidratação (E); resina ativada para infiltração (F); amostras nos histomoldes para emblocar (G); micrótomo para realização dos corte (H); resina endurecida em suporte de madeira após passagem por estufa (I); lâminas dispostas após cortes (J) e coloração com azul de Toluidina (K)



Fonte: Autora

2.4. Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância (ANOVA), desdobrando-se a interação cultivares x graus de compactação, independentemente de ter sido significativa ou

não pelo teste F. O comportamento das cultivares frente aos graus de compactação (GC) avaliado por regressão. A escolha dos modelos considerou a significância da equação, e dos coeficientes (R^2), além da possibilidade de explicação biológica do comportamento. Em todos os casos utilizou-se a significância de 5%. O programa SISVAR foi utilizado nas análises estatísticas (FERREIRA, 2008) e os gráficos preparados pelo software Sigmaplot.

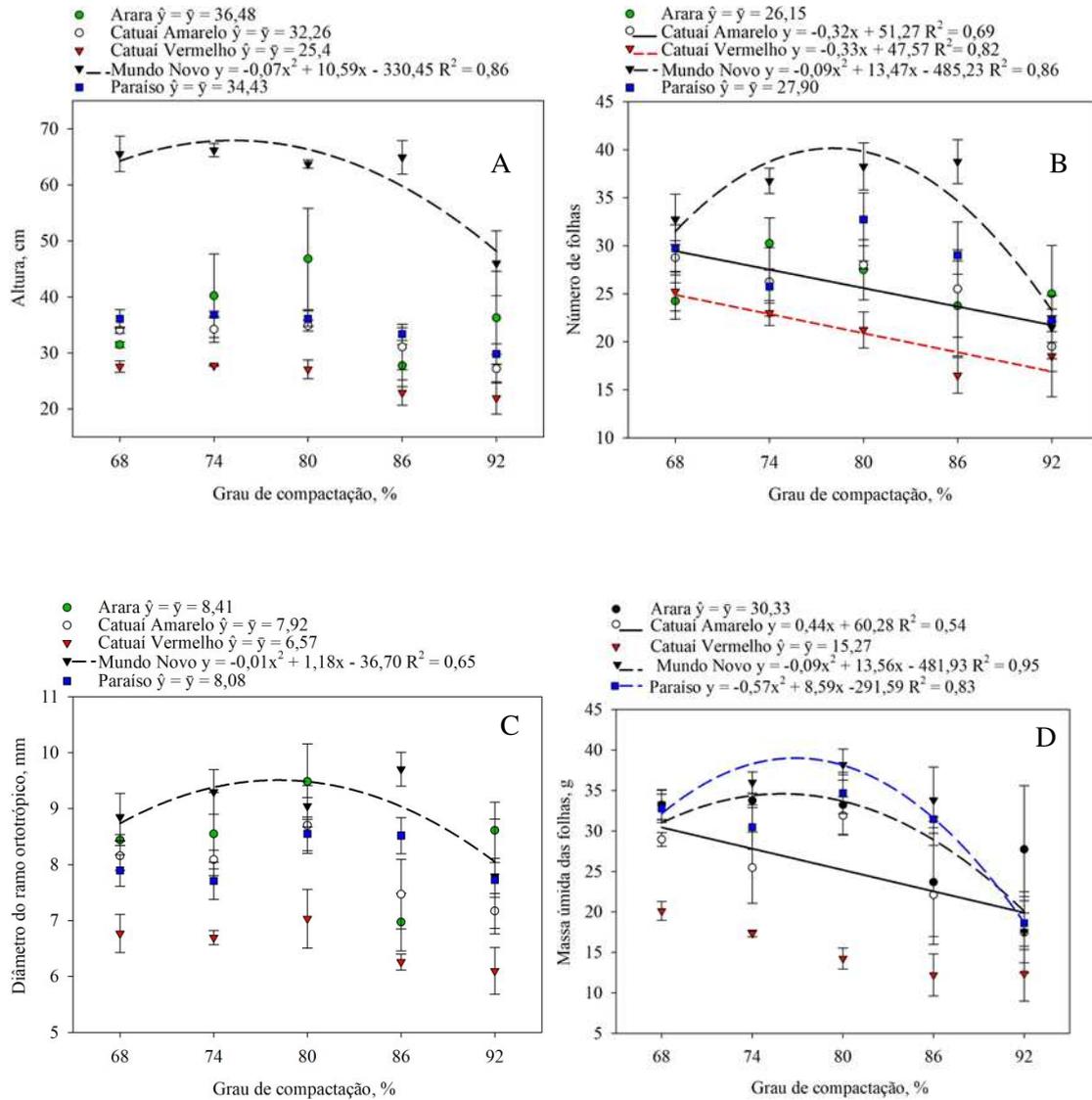
3. RESULTADOS

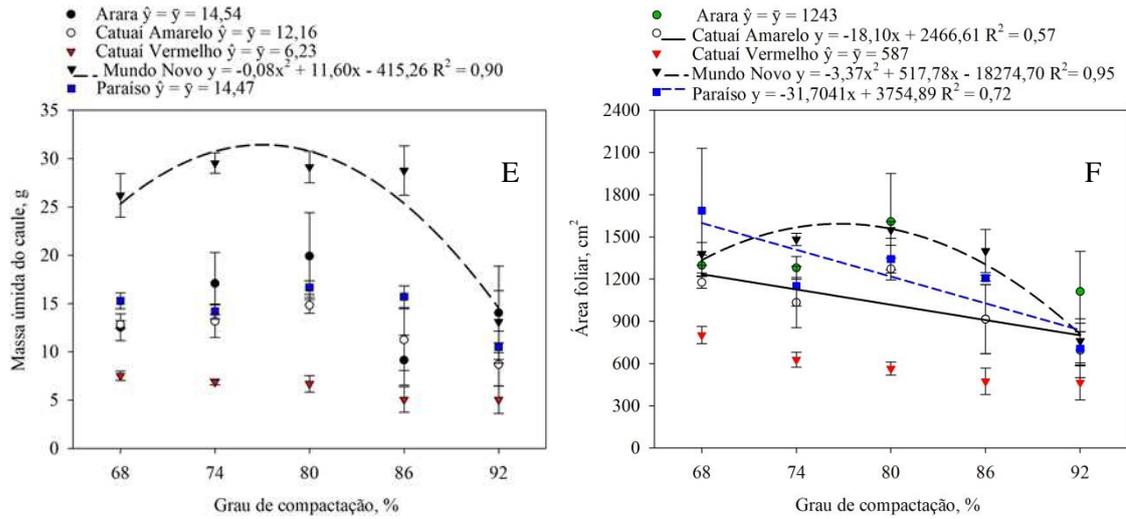
3.1. Respostas biométricas das cultivares de café à compactação

Na avaliação do efeito dos GC's sobre o comportamento das variáveis biométricas, constatou-se que, nos casos em que foram significativos ($p < 0,05$), houve a redução dos valores das mesmas à medida que o GC aumentava, sendo observados os modelos linear e polinomial quadrático (Figura 3), com coeficientes de determinação (R^2) entre 0,65 e 0,95. Todavia, tais comportamentos (modelos) não foram observados para todas as variáveis e cultivares, predominando respostas ao GC no caso da cultivar Mundo Novo em todas as variáveis, seguido da Catuaí Amarelo (NF, MUF e AF) e Paraíso (MUF e AF). O comportamento quadrático demonstra que a condição compactada pode ser favorável ao desenvolvimento da cultura, pois, a título de exemplo, os valores máximos das variáveis para a cultivar Mundo Novo foram a altura de 67,85 cm, o número de folhas de 40 unidades, o diâmetro do ramo ortotrópico de 9,36 mm, a massa da matéria úmida das folhas de 38,8 g, a massa da matéria úmida do caule de 33,28 g e a área foliar de 1593,28 cm², obtidos respectivamente com 75, 78, 78, 77, 77 e 77 % de GC, por meio da derivada dos modelos quadráticos. Para a cultivar Paraíso, que também apresentou comportamento polinomial quadrático na MUF, o valor máximo foi de 37,65 g obtido em 76% de GC.

As demais cultivares não apresentaram comportamento das variáveis biométricas influenciado pelos GCs, ou seja, $\hat{Y} = \bar{Y}$.

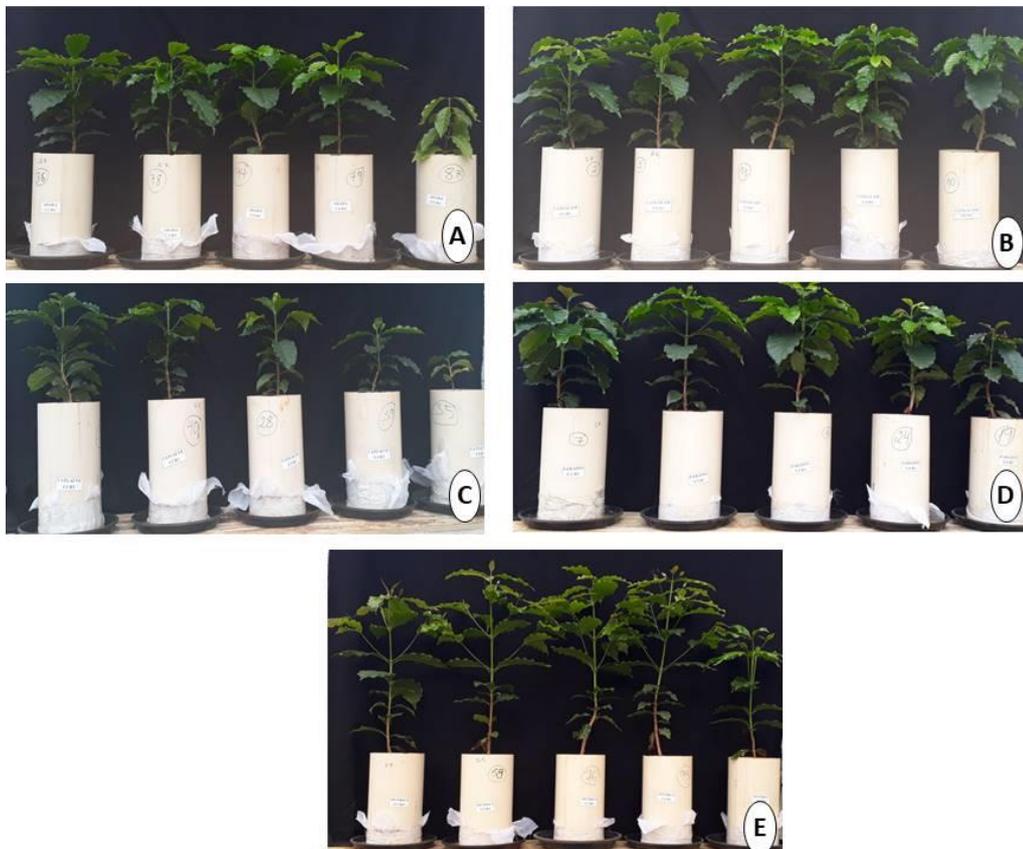
Figura 3 – Comportamento da altura das plantas - ALT (A), número de folhas – NF (B), diâmetro do ramo ortotrópico - DRO (C), massa úmida de folhas - MUF (D), massa úmida do caule - MUC (E), e área foliar - AF (F) das cultivares Arara, Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho, Mundo Novo e Paraíso em cinco graus de compactação (GCs)





Fonte: Autora

Figura 4 – Plantas de cafeeiro conduzidas em colunas de solo com cinco graus de compactação (GCs) de 68, 74, 80, 86 e 92 % com as cultivares Arara (A), Catuaí Amarelo (B), Catuaí Vermelho (C), Paraíso (D) e Mundo Novo (E) após 120 dias de experimento, Viçosa – MG, 2020

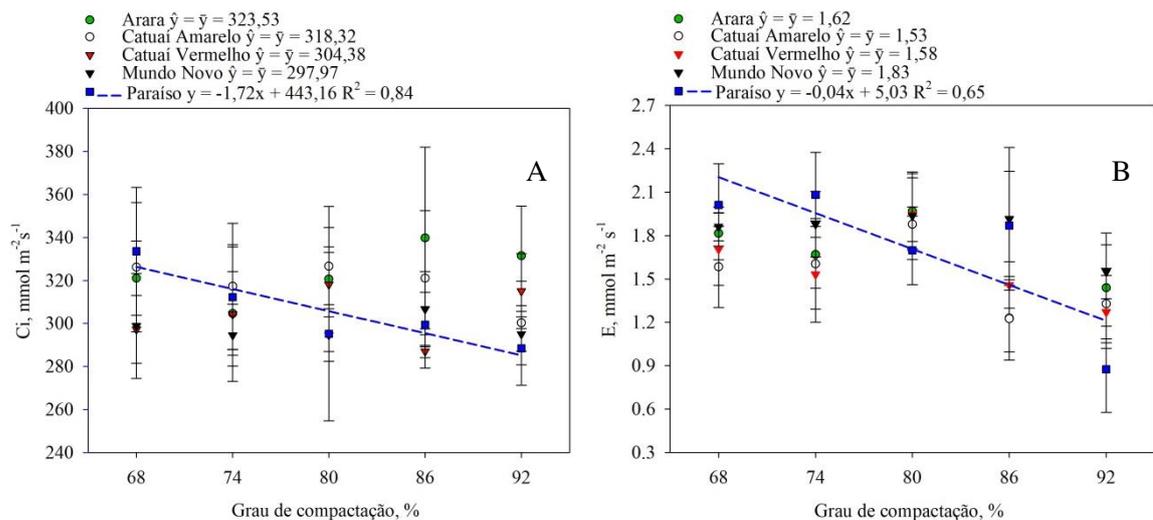


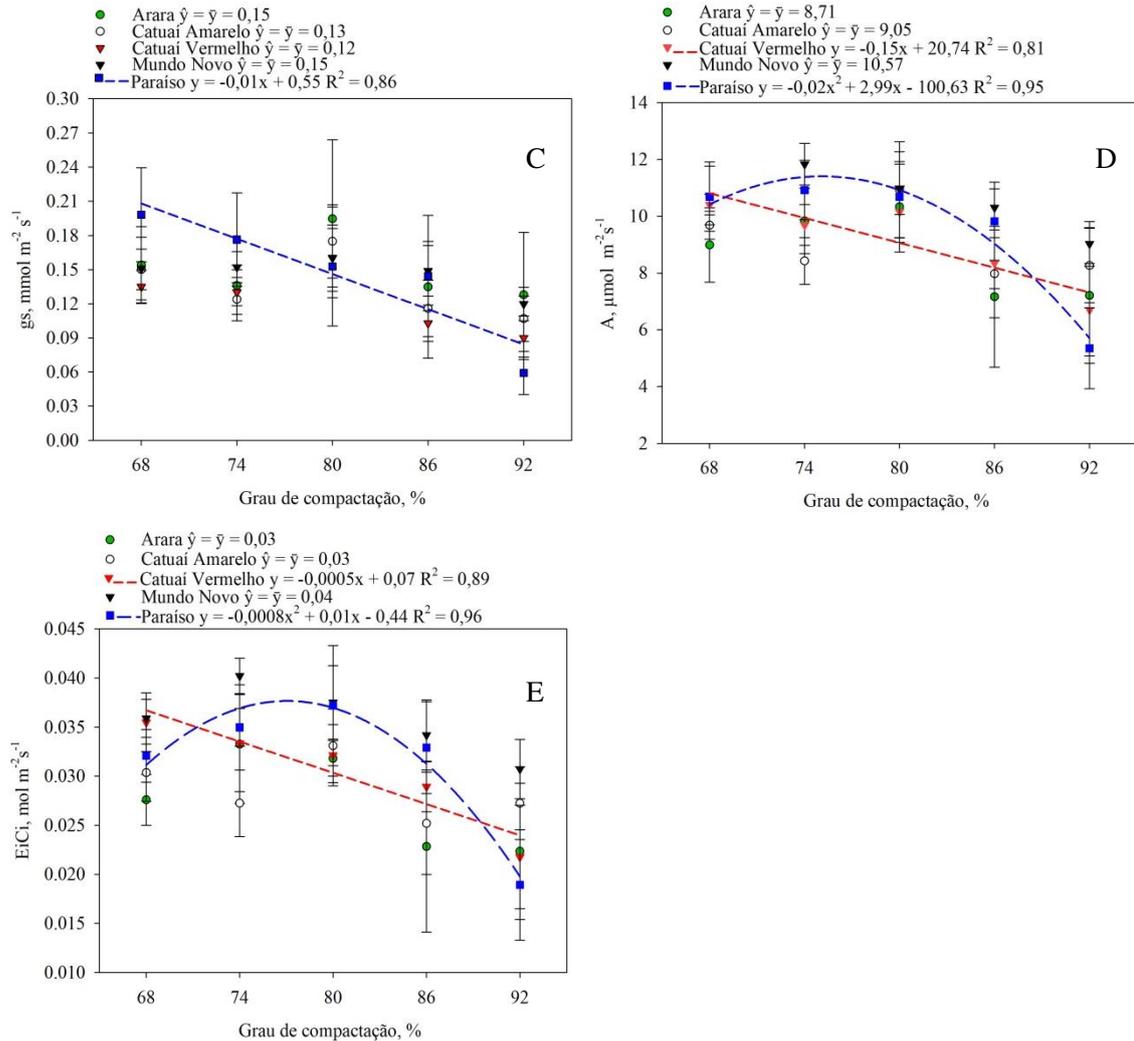
Fonte: Autora

3.2. Respostas fisiológicas das cultivares de café à diferentes níveis de compactação

O modelo linear negativo predominou em todas as variáveis de avaliação das respostas fisiológicas com o aumento dos GC's, enquanto o polinomial quadrático (aumento seguido de redução) também ocorreu, para fotossíntese (A) e a eficiência de assimilação de carbono (EiCi). Tais comportamentos foram observados para as cultivares Paraíso (linear: Ci, E e gs; quadrático: A e EiCi) e Catuaí Vermelho (linear: A e EiCi), sendo que para as demais cultivares não houve respostas aos GCs, ou seja $\hat{Y} = \bar{Y}$, (Figura 5). Da mesma forma observada para as variáveis biométricas, um certo grau de compactação pode contribuir para o crescimento vegetal, o que ocorreu nos casos da fotossíntese que teve seu valor máximo de $11,33 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em 75% de GC e da EiCi de $0,036 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em 79% de GC para a cultivar Paraíso.

Figura 5 – Comportamento de concentração interna de (A), transpiração (B), condutância estomática (C), fotossíntese (D) e eficiência de assimilação de C (E) das cultivares Arara, Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho, Mundo Novo e Paraíso em cinco graus de compactação

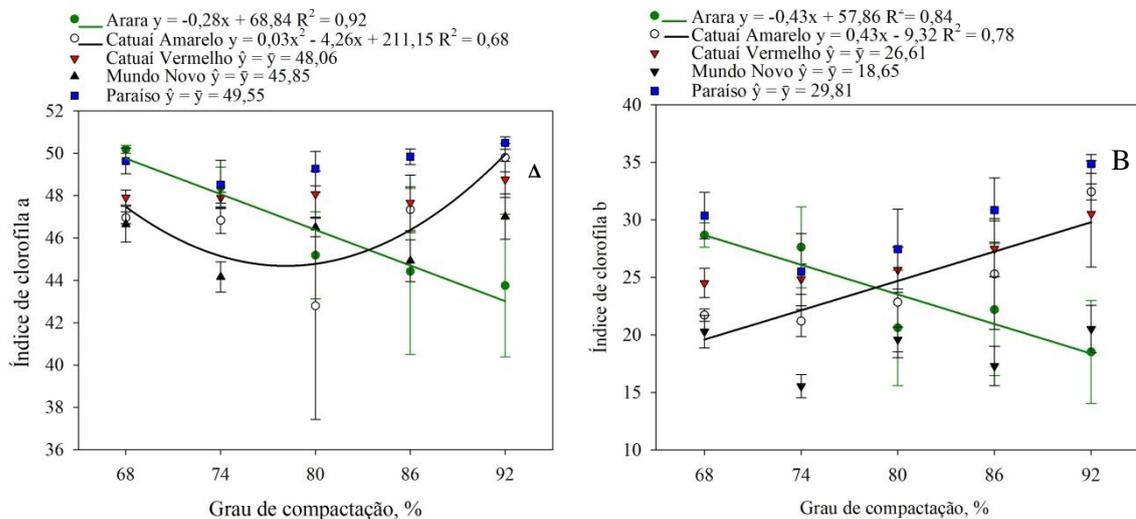




Fonte: Autora

Somente as cultivares Arara e Catuaí Amarelo apresentaram influência dos GCs, sendo que no caso da Arara constatou-se a redução linear dos índices de clorofila *a* e *b* ($p < 0,05$), enquanto a Catuaí Amarelo o comportamento foi polinomial quadrático (Clorofila *a*) ou linear (clorofila *b*). Nesses casos (comportamento quadrático), em ambas variáveis, o aumento dos índices é comum com os GCs, mesmo que antecedido de redução (Clorofila *a*) (Figura 6).

Figura 6 – Comportamento dos índices de clorofila a (A) e b (B) das cultivares Arara, Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho, Mundo Novo e Paraíso em cinco graus de compactação



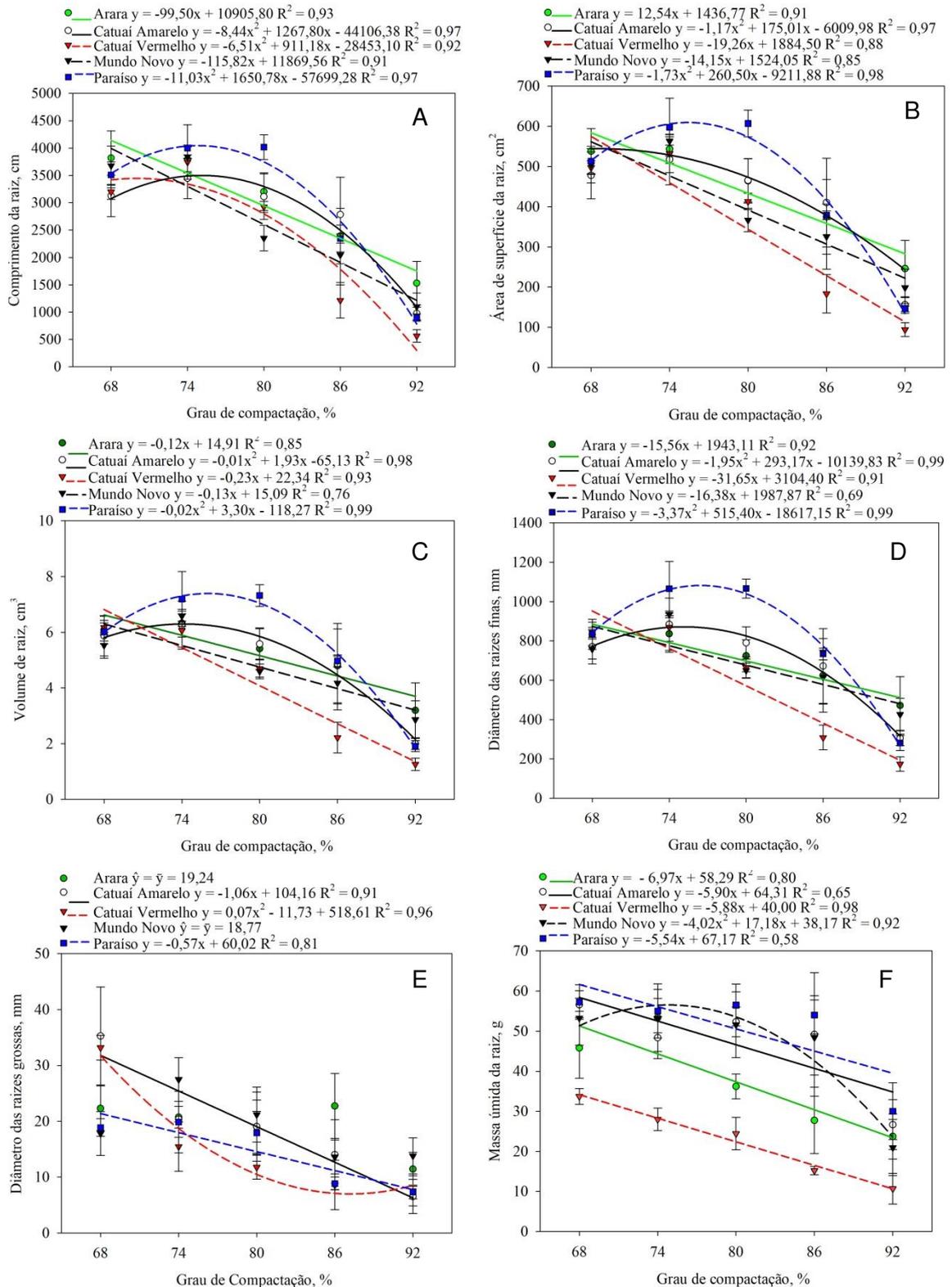
3.3. Respostas morfológicas e anatômicas das raízes das cultivares de café à compactação

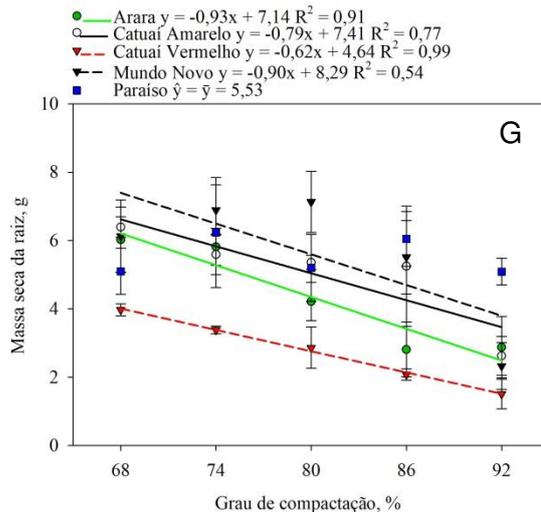
Os resultados relativos à morfologia de raízes, coletados separadamente nas três camadas da coluna, serão apresentados pela soma dos resultados das variáveis obtidos para cada camada. As razões para tal procedimento estão associadas ao fato de que grande parte das raízes ocorreram na camada superficial, tendo sido constatado durante a coleta das raízes que, quando penetravam o solo compactado, as proporções de raízes nas camadas restantes eram reduzidas especialmente nos GC's mais elevados.

As variáveis morfológicas das raízes avaliadas: comprimento das raízes (CR), área de superfície das raízes (AS), volume de raízes (VR), diâmetro de raízes finas (DRF) e diâmetro de raízes grossas (DRG) das cultivares foram afetadas significativamente pela compactação, pois observou-se a redução dos valores, seja linear ou quadrático polinomial, mesmo que um aumento possa ocorrer até os primeiros GCs (68 e 74%), como ocorrido para as cultivares Paraíso e Mundo Novo (Figura 7). Para o comprimento das raízes (CR), as cultivares Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho e Paraíso apresentaram comportamento quadrático e os valores máximos foram de 2.969,45 cm obtido quando o GC foi de 67 % para o Catuaí Amarelo, 3.430,5 cm em GC de 70% para o Catuaí Vermelho e 4.065,78 cm quando o GC foi de 75 % de GC para o Paraíso respectivamente.

A área de superfície de raízes (ASR), volume de raízes (VR) e diâmetro de raízes finas (DRF) apresentaram comportamento quadrático apenas para as cultivares Catuaí Amarelo e Paraíso, cujos valores máximos estiveram em 535 e 594,51 cm², ambos em GC de 75%, VR de 6,5 e 5,48 cm³ em GC de 74 e 75% e DRF de 909,23 e 1.088,87 mm em GC de 75 e 76 %, respectivamente. A duas exceções ao comportamento identificado anteriormente ocorreu com DRG no caso da Catuaí Vermelho, quando o modelo indicou que não houve aumento do diâmetro com os GCs, assim como o cultivar Arara, quando também essa variável não foi afetada pelos GC's, ou seja $\hat{Y} = \bar{Y}$ (P<0,05) (Figura 7).

Figura 7 – Comportamento das variáveis comprimento da raiz - CR (A), área de superfície de raiz - ASR (B), volume de raiz- VR (C), diâmetro de raiz fina- DRF (D), diâmetro de raiz grossa- DRG (E), Massa úmida da raiz- MUR (F) e Massa seca da raiz - MSR (G) das cultivares Arara, Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho, Mundo Novo e Paraíso nos cinco graus de compactação





Fonte: Autora

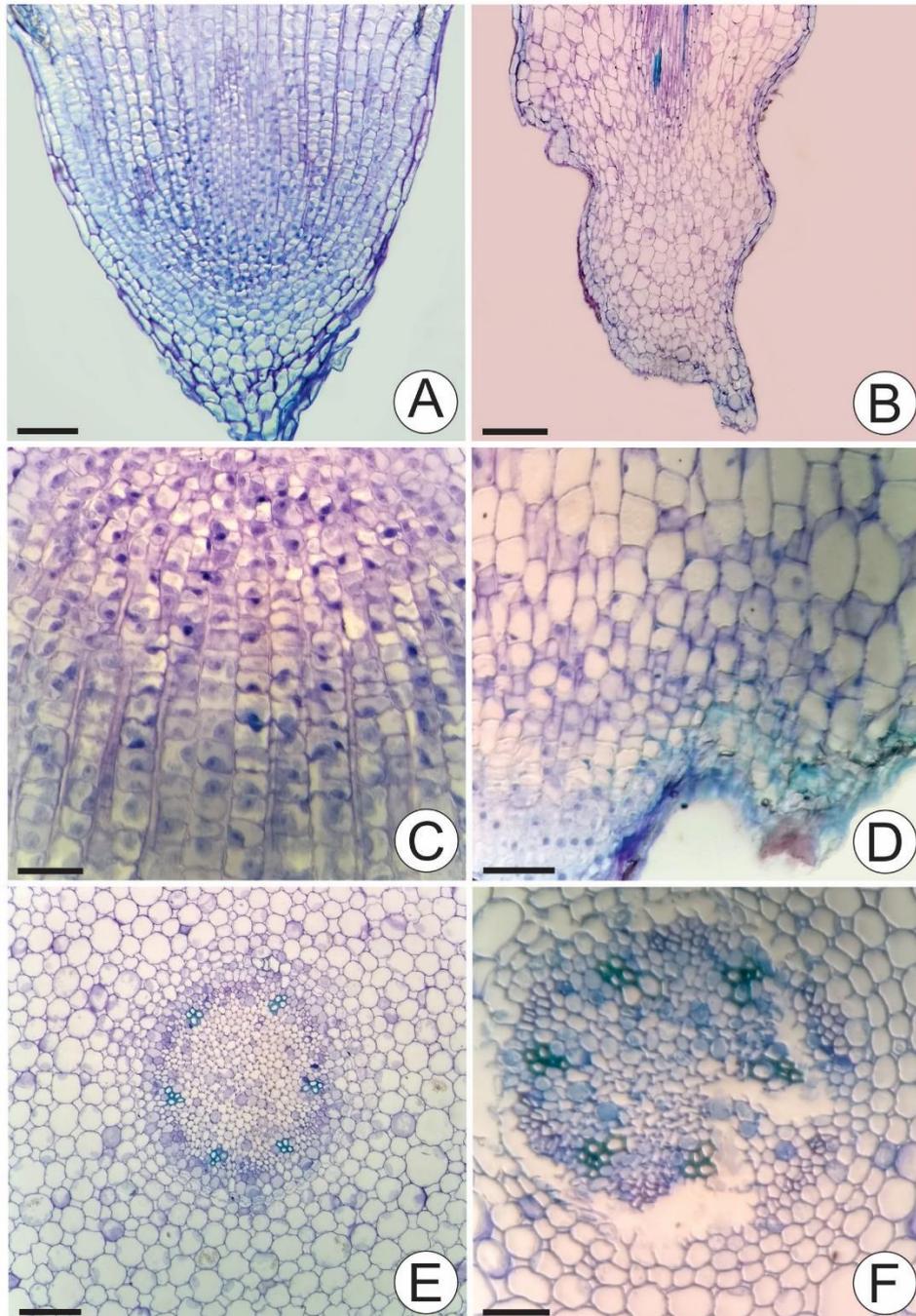
Para avaliação da anatomia foram montadas aproximadamente 120 lâminas. Após observação no microscópio notou-se que os danos eram semelhantes e nos mesmos graus de compactação para todas as cultivares, optando-se assim por selecionar e não apresentar lâminas para todas as cultivares, evitando uma análise repetitiva. A avaliação anatômica das raízes indicou que a epiderme na região de alongamento das raízes é formada por células que apresentam as paredes delgadas e cutícula fina. De modo geral, a epiderme na região de alongamento e de ramificação, apresentou poucas deformações na sua estrutura. Na região apical, ao comparar as raízes submetidas a GC4 (Figura 8A) com aquelas que foram submetidas a compactações superiores (Figura 8B), no GC4 as células da epiderme apresentaram aspecto vacuolado, mais descamadas e com a coifa é pouco perceptível.

No ápice radicular, a zona meristemática constitui um conjunto de células iniciais protegidas pela coifa, assim o meristema apical da raiz é subterminal. Ao passarem por divisões sucessivas, essas células resultam na formação e desenvolvimento dos tecidos da raiz, garantindo a autopropagação do meristema, mantendo um conjunto de células iniciais (EVERT; ESAU, 2013). Por ser uma região de alta atividade de multiplicação celular, verificou-se células com o núcleo conspícuo em diferentes etapas do ciclo celular. A Figura 8C ilustra a porção meristemática que foi observada nas raízes que se desenvolveram em solos com até 80% de CG, mostrando as células em plena atividade metabólica, como é sugerido pela presença tão evidente dos núcleos. Em contrapartida, em GCs superiores a 86%, verificou-se a ausência de células em divisão celular, poucos núcleos evidentes e a porção meristemática apical da raiz e da coifa praticamente inexistentes, como ilustrado na Figura

8D. No GC5 (92%) as células do meristema fundamental são volumosas, hialinas, e a relação citoplasma/núcleo é menor, não sendo observadas células em divisão (Figuras 8 B e D).

Nas secções transversais (Figuras 8 E e F) identificou-se que o córtex não passou por grandes modificações devido a compactação (Figura 8E). Algumas alterações, como a presença de células colapsadas (sem atividade), podem ser resultados do início de desenvolvimento secundário com os acréscimos de tecidos provenientes da atividade do câmbio, ou danos causados durante o transplântio da muda. O cilindro vascular apresentou danos nos GC's acima de 86%, sendo as porções correspondentes ao periciclo e floema as mais danificadas (Figura 8F), especialmente devido as características parenquimáticas das células, na região do xilema, as células que apresentam paredes delgadas também se apresentaram danificadas.

Figura 8 - Cortes longitudinais (A-D) e transversais (E, F) das raízes do café em estrutura primária. (A) cultivar Arara no grau de compactação (GC) 3; (b) Café Cultivar Mundo Novo, GC4; (C) detalhe do meristema apical, cultivar Mundo Novo no GC3; (D) detalhe do meristema apical, cultivar Arara, c GC5; (E) visão geral do cilindro vascular da raiz lateral da cultivar Paraíso, GC3; (F) visão geral do cilindro vascular de uma raiz lateral da cultivar Catuaí Vermelho, GC5



Fonte: Autora

4. DISCUSSÃO

4.1. Variáveis biométricas das cultivares de café à compactação

Os resultados obtidos para as variáveis de crescimento neste estudo corroboram com a maioria dos trabalhos encontrados na literatura que afirmam que altos valores de compactação influenciam negativamente o crescimento das plantas (KOZLOWSKI, 2008; SZATANIK-KLOC et al., 2019; WOLF et al., 2019). Alameda e Villar, (2009), avaliando o efeito da compactação do solo no crescimento absoluto de dezessete espécies lenhosas, constataram um aumento nas variáveis de crescimento (altura, biomassa e área foliar) quando as plantas foram cultivadas em solos com valores moderados de resistência do solo à penetração (0,2 a 0,6 MPa) e um crescimento inferior quando as mesmas espécies foram cultivadas em solo com valores maiores.

Do mesmo modo, Shukor et al. (2015) trabalhando com *Azadirachta excelsa* constataram área foliar e biomassa inferiores com o aumento da densidade do solo, justificado pela redução da atividade fotossintética, o que também foi comprovado pelo presente estudo. Outros autores que observaram redução tanto no número de ramos, como de folhas devido ao aumento da compactação do solo trabalhando também com cultura perene (*Cajanus cajan*) foram Farias et al. (2013). O mesmo acontece com culturas anuais como observado por Grzesiak et al. (2013) que também notaram um menor número de folhas e de massa seca da parte aérea de triticales (*X Triticosecale* W.) e milho (*Zea Mays*) na compactação moderada e severa do solo, quando comparada com a compactação baixa.

Aparentemente, uma compactação moderada do solo é benéfica para a planta à medida que aproxima a raiz do solo, aumentando o contato entre eles o que favorece a absorção de nutrientes (MARIOTTI et al., 2020), culminando em maior acúmulo de biomassa, como comprovado pelos valores máximos de algumas variáveis (Alt, NF, DRO, MUF, MUC e AF) terem sido encontrados em graus de compactação moderados (entre 75 a 78%).

Grzesiak et al. (2013) propõem que as possíveis causas da redução do crescimento da planta em solo muito compactado seriam a diminuição da disponibilidade de nutrientes e água assim como a diminuição do crescimento radicular. Cambi et al. (2017) também atribuem estas respostas à fisiologia da planta que também foi afetada negativamente pelos graus mais altos de compactação, comprovada pela diminuição da fotossíntese.

A área foliar (AF) é um excelente parâmetro de avaliação de crescimento e fisiologia da planta, refletindo a interceptação de luz, eficiência fotossintética e transpiração, por isso, qualquer alteração provocada pelo manejo do solo resulta em diminuição do crescimento e desempenho da planta (BLANCO; FOLEGATTI, 2005). A menor AF e conseqüentemente menor altura das plantas ocorrida neste estudo está relacionada ao pouco crescimento radicular impulsionado pelo déficit hídrico e pouca absorção de nutrientes devido a reduzida macroporosidade provocada pela compactação (CAMBI et al., 2017), resultando em redução da produção da biomassa.

Assim como no presente estudo, Masaka e Khumbula, (2007) avaliaram o efeito da compactação em mudas de cafeeiro e constataram uma menor acumulação da biomassa, menor altura e haste das mudas cultivadas em solos compactados quando comparadas às cultivadas em solo sem compactação. O cafeeiro é uma planta que apresenta alta plasticidade diante de estresses bióticos e abióticos por desenvolver características específicas para adaptar a cada tipo de estresse (DAMATTA, 2004), como pode ser observado nos resultados, por uma menor área foliar, por exemplo, para diminuir a transpiração e evitar maior perda de água, que já está sendo limitante devido a redução da macroporosidade do solo.

Em relação ao comportamento diferenciado entre cultivares, é normal, uma vez que são provenientes de cruzamentos diferentes, cada qual objetivando plantas com resistência ou tolerância a algum agente, ou com o objetivo de aumento da produtividade. O Mundo Novo é uma cultivar de porte alto (até 3,8 m) e de internódios longos e em maior número, por isso apresentou maior crescimento do que as demais, mesmo com influência da compactação, enquanto que a cultivar Catuaí Vermelho teve o menor crescimento entre as de porte médio (em torno de 2 m) não só devido a compactação, mas também por ser uma cultivar com internódios curtos e que investe mais na ramificação secundária (CARVALHO, 2008). Melo et al. (2006) avaliando características vegetativas e produtivas constataram que houve diferenças na altura entre as cultivares Catuaí Vermelho, Catuaí Amarelo e Mundo Novo e também constataram um maior desenvolvimento vegetativo dos dois últimos quando comparado ao Catuaí Vermelho.

4.2. Variáveis fisiológicas das cultivares de café

Trocas gasosas

A compactação afeta a fisiologia e desempenho da planta devido a diminuição da disponibilidade de oxigênio (BASSETT et al., 2005) e da condutividade hidráulica que afeta a quantidade de água disponível para crescimento e transpiração das plantas (OLLAS; DODD, 2016). A privação de oxigênio devido a compactação nas raízes inibe a respiração aeróbica provocando a redução da fotossíntese e alterando a produção de biomassa (BERTOLDE et al., 2010).

De forma semelhante ao presente estudo, o efeito negativo da compactação sobre as trocas gasosas também foi constatado por Mariotti et al. (2020) que analisaram vários estudos por meio de meta-análise, encontrando diminuição significativa nos valores de trocas gasosas por causa da compactação. Os autores atribuem esse efeito a limitação de água e da aquisição de nutrientes. Outra explicação seria a diminuição das variáveis de crescimento (área foliar, diâmetro do ramo ortotrópico e altura) e de morfologia das raízes que são fatores que trazem um incremento à absorção de energia luminosa quando a planta encontra condições favoráveis, investindo assim em biomassa acima e abaixo do solo (STERCK et al., 2011).

As cultivares Catuaí Vermelho e Amarelo pertencentes ao grupo Catuaí foram desenvolvidas para cultivo em pleno sol (CARVALHO, 2008) geralmente apresentam maiores taxas fotossintéticas assim como condutância estomática e transpiração, características essas adaptativas as condições restritas de radiação e disponibilidade de CO₂ (BATISTA et al., 2010), já que o cafeeiro investe em área foliar para maior tolerância ao sombreamento (BOTE et al., 2018; CAVATTE et al., 2012). No caso do solo compactado, a planta reduz a área foliar diminuindo assim a transpiração para economizar água necessária para realização da fotossíntese (TARDIEU, 2013), o que foi comprovado neste estudo por meio da diminuição das trocas gasosas nas referidas cultivares.

Apesar de as trocas gasosas terem diminuído devido a compactação, os valores estão na faixa de valores médios encontrados por Silva et al. (2013) e Martins et al. (2014) para plantas de cafeeiro.

Clorofilas

As clorofilas *a* e *b* são pigmentos existentes nas folhas responsáveis pela absorção e conversão da radiação luminosa para realização da fotossíntese. A diminuição da absorção de nutrientes, principalmente o nitrogênio, reduz a biossíntese de clorofila afetando diretamente a eficiência do metabolismo da planta (REIS et al., 2006).

Assim como observado neste estudo, Silva et al. (2020) observaram um aumento no valor de clorofila *b* quando a densidade aumentou ($1,7 \text{ g cm}^{-3}$). Já Neves et al., (2020) encontraram também efeito significativo da compactação no índice de clorofila, porém justificado pela eficiência de um inoculante usado para aumentar a capacidade do amendoim em superar o estresse causado pelo aumento da densidade do solo, resultando numa fixação eficiente, fornecendo à planta nutrientes necessários para o seu desenvolvimento adequado (NEVES et al., 2020).

Em relação a clorofila *a* que diminuiu com o aumento da compactação no presente estudo, (Cambi et al. (2017) também constataram uma diminuição na fluorescência da clorofila *a* em plantas cultivadas em solo compactado, explicada por uma depressão na eficiência fotossintética e devido a diminuição do ciclo de Calvin causada pela compactação. A análise de fluorescência da clorofila é uma forma importante de avaliar os efeitos de estresse na fisiologia das plantas, principalmente fornecendo informações do seu estado fotossintético e na avaliação da fotoinibição em condições adversas que influenciam a fotossíntese (BENERAGAMA; GOTO, 2011).

A cultivar Paraíso, que apresentou o maior índice de clorofila *a*, é uma cultivar pouco estudada, mas que vem sendo muito utilizada comercialmente respondendo de forma positiva em várias regiões (RODRIGUES; MARTINS; TOMAZ, 2018). Essa capacidade de adaptação a várias condições pode ser o fator que permitiu maior tolerância ao aumento da compactação, levando a uma menor diminuição nos índices de clorofila em relação as outras cultivares.

4.3. Variáveis morfológicas e anatomia radicular

Morfologia radicular

A alta resistência do solo à penetração reduz o comprimento das raízes levando a uma menor exploração do solo, resultando em menor interceptação de água e nutrientes, diminuindo o fornecimento dos mesmos para a parte aérea, o que pode comprometer diretamente o crescimento total da planta em solos compactados (RICH; WATT, 2013). Bassett et al. (2005) também afirmam que a compactação afeta o desenvolvimento das plantas, principalmente na fase de estabelecimento de mudas devido ao impedimento do crescimento radicular provocado pela alta resistência a penetração e à diminuição da disponibilidade de água e oxigênio. Esses autores encontraram uma relação negativa entre a resistência do solo e a penetração da raiz no solo compactado, evidenciando um efeito significativo no crescimento da raiz nas espécies cordiline (*Cordyline australis*) e leptosperme (*Leptospermum scoparium*). Ainda, eles afirmam que a tolerância à compactação varia entre

as espécies provavelmente devido a características morfológicas. Bejarano et al. 2010 também mencionam o efeito negativo no comprimento da raiz principal de carvalho-pardo (*Quercus pyrenaica*) em altos níveis de compactação do solo, porém, o menor comprimento não representou nenhuma restrição na absorção de nutrientes ou água.

Colombi et al. (2017) também constataram que o aumento da densidade do solo afetou a morfologia e o crescimento radicular do trigo. Esses autores observaram volume e comprimento das raízes menores, porém houve um aumento significativo no diâmetro das raízes. Eles justificam essas alterações no fato de que com o aumento da resistência do solo a planta tende a modificar a geometria da ponta da raiz e a anatomia da raiz para contrabalancear o aumento da demanda de energia, aumentando os custos metabólicos.

Anatomia das raízes

A análise de anatomia da raiz é uma excelente estratégia de acompanhamento do desempenho da planta, tornando possível identificar empecilhos ao seu desenvolvimento. Algumas características anatômicas da raiz, como na estrutura do córtex, camadas de revestimento (RIEGER; LITVIN, 1999) e do sistema vascular, estão diretamente relacionados à fisiologia e crescimento das culturas (WAHL; RYSER, 2000).

Semelhante ao que foi observado nesta pesquisa, um estudo realizado por Lipiec et al. (2012) também demonstrou efeitos significativos da compactação do solo nas mudanças da anatomia das raízes de cereais, no qual os autores observaram deformações e invaginação no córtex e no cilindro vascular. Essa mudança encontrada foi relacionada à forma geral das raízes (circulares ou achatadas), induzida pelo formato dos poros, corroborando também os achados por Alameda et al (2012) que comprovaram alterações anatômicas em raízes de mudas de freixo-comum (*Fraxinus angustifolia* Vahl) em solo compactado. Diferente do presente estudo que utiliza como modelos plantas lenhosas, é de se esperar algumas diferenças anatômicas quando comparado as plantas herbáceas, como a soja.

Ao verificar-se que parte das alterações presentes no córtex estão relacionadas a instalação e atividade do câmbio (EVERT; ESAU, 2013), e que as principais alterações internas da raiz ocorreram na região do cilindro vascular e na porção apical, este trabalho configura-se como promissor para a compreensão dos efeitos da compactação do solo. Ao passo que, ao resultar na inativação dos meristemas apicais, o que se verificou, nas análises

anatômicas e nas observações durante o processo de coleta das amostras, foi o desenvolvimento de numerosas raízes laterais, mas em todas, logo após o início do desenvolvimento, o contato com o solo compactado resultou em danos que limitam o desenvolvimento. É provável, então, que o aumento na emissão de raízes laterais seja uma estratégia que compense os efeitos da compactação (BERGAMIN et al., 2010). Isso foi visto na cultivar Mundo Novo, que apresentou crescimento vegetativo pujante mesmo em maiores níveis de compactação, mas quando observado o sistema radicular, observamos um adensamento de raízes laterais, uma vez que muito cedo no desenvolvimento dessas raízes ocorreu inativação do meristema apical.

Em um estudo recente, Moraes et al. (2020) também identificaram mudanças no cilindro vascular e no córtex da raiz da soja devido a compactação do solo. Esse é um dano que inviabiliza as duas principais funções da raiz, a absorção e a sustentação, uma vez que a desorganização do cilindro vascular impossibilita a conexão entre as células e o processo de diferenciação do câmbio vascular.

Além disso, os trabalhos publicados não se dedicaram a analisar a estrutura da coifa e do meristema apical, como aqui descrito. Isto demonstra que os efeitos na anatomia e desenvolvimento dessas porções do órgão resultam em interferência direta no desenvolvimento das cultivares.

5. CONCLUSÕES

A compactação em altos níveis afeta negativamente o desenvolvimento da cultura do cafeeiro, diminuindo seu crescimento e modificando sua fisiologia, morfologia e anatomia radicular. A partir do grau de compactação de 80% a maioria das variáveis diminuiu consideravelmente.

As cultivares de cafeeiro responderam de forma diferentes aos efeitos dos graus de compactação, sendo que o Catuaí Vermelho apresentou pior desempenho independente do grau de compactação, tanto no crescimento como na fisiologia, enquanto que o Arara e o Paraíso apresentaram melhor desempenho no crescimento e na fisiologia da planta.

Anatomicamente as cultivares de café tiveram respostas semelhantes, na medida em que apresentaram os mesmos danos quando submetidas a níveis altos de compactação, alterando sua organização estrutural para melhor adaptar-se a tal estresse.

6. REFERÊNCIAS

- ALAMEDA, D.; ANTEN, N. P. R.; VILLAR, R. Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress. **Soil and Tillage Research**, v. 120, p. 121–129, 2012.
- ALAMEDA, D.; VILLAR, R. Moderate soil compaction: Implications on growth and architecture in seedlings of 17 woody plant species. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 2, p. 325–331, 2009.
- ALFONSI, W. M. V. et al. Período de incubação da ferrugem do cafeeiro. **Summa Phytopathologica**, v. 45, n. 2, p. 134–140, 2019.
- ALVAREZ, V. V. H. .; RIBEIRO, A. C. Calagem. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. eds. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5 a aproximação. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5 a aproximação. CFSEMG**, p. 43–60, 1999.
- AMPOORTER, E. et al. Impact of mechanized harvesting on compaction of sandy and clayey forest soils: Results of a meta-analysis. **Annals of Forest Science**, v. 69, n. 5, p. 533–542, 2012.
- BASSETT, I. E.; SIMCOCK, R. C.; MITCHELL, N. D. Consequences of soil compaction for seedling establishment: Implications for natural regeneration and restoration. **Austral Ecology**, v. 30, n. 8, p. 827–833, 2005.
- BATISTA, L. A. et al. Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 41, n. 3, p. 475–481, 2010.
- BEJARANO, M. D. et al. Effects of soil compaction and light on growth of *Quercus pyrenaica* Willd. (Fagaceae) seedlings. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 1, p. 108–114, 2010.
- BENERAGAMA, C.; GOTO, K. Chlorophyll *a*: *b* Ratio Increases Under Low-light in “Shade-tolerant” *Euglena gracilis*. **Tropical Agricultural Research**, v. 22, n. 1, p. 12, 2011.
- BERGAMIN, A. C. et al. Compactação em um latossolo vermelho distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 681–691, 2010.
- BERTOLDE, F. Z. et al. Molecular, physiological and morphological analysis of waterlogging tolerance in clonal genotypes of *Theobroma cacao* L. **Tree Physiology**, v. 30, n. 1, p. 56–67, 2010.
- BLANCO, F. F.; FOLEGATTI, M. V. Estimation of leaf area for greenhouse cucumber by linear measurements under salinity and grafting. **International Water and Irrigation**, v. 25, n. 4, p. 34–37, 2005.
- BOTE, A. D. et al. Analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) performance in relation to radiation levels and rates of nitrogen supply I. Vegetative growth, production and distribution of biomass and radiation use efficiency. **European Journal of Agronomy**, v. 92, n. September 2016, p. 115–122, 2018.

- CAMBI, M. et al. Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. **Forest Ecology and Management**, v. 384, p. 406–414, 2017.
- CARDUCCI, C. E. et al. Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 270–278, 2014.
- CARVALHO, C. H. S. (Ed). Cultivares de café: origem, características e recomendações. Brasília: Embrapa Café. **Cultivares de café**, p. 157–226, 2008.
- CARVALHO, F. G. et al. Tolerância ao déficit hídrico em mudas de genótipos de café portadores de genes de diferentes espécies. **Coffee Science**, v. 12, n. 2, p. 9–16, 2017.
- CAVATTE, P. C. et al. Could shading reduce the negative impacts of drought on coffee? A morphophysiological analysis. **Physiologia Plantarum**, v. 144, n. 2, p. 111–122, 2012.
- COLOMBI, T. et al. Root tip shape governs root elongation rate under increased soil strength. **Plant Physiology**, v. 174, n. 4, p. 2289–2301, 2017.
- COLOMBI, T.; KELLER, T. Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. **Soil and Tillage Research**, v. 191, n. April, p. 156–161, 2019.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - (CONAB). ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA - CAFÉ. **Observatório Agrícola**, v. 6, n. 4, p. 1–45, 2020.
- CRUZ, R. DE S. et al. Physiological responses of *coffea arabica* cultivars in association with arbuscular mycorrhizal fungi. **Coffee Science**, v. 15, n. 1, p. 1–8, 2020.
- DAMATTA, F. M. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: A review. **Field Crops Research**, v. 86, n. 2–3, p. 99–114, 2004.
- DEPERON, M. A. et al. Influência de implementos de preparo e de níveis de compactação sobre atributos físicos do solo e aspectos agrônômicos da cultura do milho. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 2, p. 367–376, 2016.
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. **Methods for Assessing Soil Quality**, p. 25–37, 1996.
- EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de solo. 3a ed. Rio de Janeiro: Documentos / Embrapa Solos. **Manual de Métodos de Análise de solo**, 2017.
- EVERT, R. F.; ESAU, K. Anatomia das plantas de Esau: meristemas, células e tecidos do corpo da planta: sua estrutura, função e desenvolvimento. Editora Blucher. 2013.
- FALKER. Automação agrícola. Manual do medidor eletrônico de teor clorofila (ClorofiLOG/CFL 1030). Porto Alegre. **Manual do medidor eletrônico de teor clorofila (ClorofiLOG/CFL 1030)**, p. 33, 2008.
- FARIAS, L. DO N. et al. Morphological and productive characteristics of the dwarf pigeonpea cultivated in compacted soil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 5, p. 497–503, 2013.

- FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, v. 6, p. 36–41, 2008.
- FERREIRA JÚNIOR, L. DE G. et al. Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastes derriçadoras. **Ciencia Rural**, v. 46, n. 2, p. 273–278, 2016.
- GRZESIAK, S. et al. Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. **Environmental and Experimental Botany**, v. 88, p. 2–10, 2013.
- GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Interação entre disponibilidade de água e compactação do solo no crescimento e na produção de feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 38, n. 3, p. 765–773, 2014.
- KELLER, T. et al. Long-Term Soil Structure Observatory for Monitoring Post-Compaction Evolution of Soil Structure. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 4, p. vzt2016.11.0118, 2017.
- KOZLOWSKI, T. T. Scandinavian Journal of Forest Research Soil Compaction and Growth of Woody Plants. n. November 2013, p. 37–41, 2008.
- KRAUS, J. E.; ARDUIN, M. Manual Básico de Métodos em Morfologia Vegetal. Seropédica, Editora Universidade Rural. **Manual Básico de Métodos em Morfologia Vegetal**, 1997.
- LI-COR. LI-3100 Area Meter Service Manual Lincoln, Nebraska-USA. **LI-3100 Area Meter Service Manual Lincoln**, 1995.
- LIPIEC, J. et al. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. **Soil and Tillage Research**, v. 121, p. 74–81, 2012.
- LIU, Q. et al. Can biochar alleviate soil compaction stress on wheat growth and mitigate soil N₂O emissions? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 104, p. 8–17, 2017.
- MAIA, P. L. et al. Agronomic performance of coffee in response to framework pruning in cycles of the “safra zero”. **Coffee Science**, v. 15, n. 1, p. 1–7, 2020.
- MARIOTTI, B. et al. Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 462, n. September 2019, p. 118004, 2020.
- MARTINS, S. C. V. et al. Understanding the low photosynthetic rates of sun and shade coffee leaves: Bridging the gap on the relative roles of hydraulic, diffusive and biochemical constraints to photosynthesis. **PLoS ONE**, v. 9, n. 4, p. 1–10, 2014.
- MASAKA, J.; KHUMBULA, N. The effect of soil compaction levels on germination and biometric characteristics of coffee (*Coffea arabica*) seedlings in the nursery. **International Journal of Agricultural Research**, v. 2, n. 7, p. 581–589, 2007.
- MELO, B. DE; MARCUZZO, K. V.; TEODORO, R. E. F. Desenvolvimento vegetativo e produção de linhagens de cafeeiro em Uberlândia-MG. **Bioscience Journal**, v. 22, n. 1, p. 21–25, 2006.
- MENEZES-SILVA, P. E. et al. Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. **Journal of Experimental Botany**, v. 68,

n. 15, p. 4309–4322, 2017.

MORAES, M. T. DE et al. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 200, n. March 2019, p. 104611, 2020.

MORALES, F. et al. Photosynthesis in poor nutrient soils, in compacted soils, and under drought. In: The leaf: A platform for performing photosynthesis. **Springer**, p. 371–399, 2018.

NASCIMENTO, V. N. et al. Atributos físicos do neossolo regolítico distrófico sob pastagem submetido à colheita mecanizada da forragem e pastejo animal. **Boletim de Indústria Animal**, v. 74, p. 169–175, 2017.

NEVES, L. C. R. DAS et al. Effect of soil compaction and co-inoculation with *Azospirillum brasilense* on the development of peanut plants. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 4, p. 1049–1059, 2020.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J. DE et al. (Eds.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo, Brasília-DF: Documentos Embrapa**, p. 392, 1991.

O'BRIEN, T. P.; MCCULLY, M. E. The study of plant structure principles and select methods. **Termarcarphi, Pty**, p. 358, 1981.

OLLAS, C. DE; DODD, I. C. Physiological impacts of ABA–JA interactions under water-limitation. **Plant Molecular Biology**, v. 91, n. 6, p. 641–650, 2016.

POTOCKA, I.; SZYMANOWSKA-PULKA, J. Morphological responses of plant roots to mechanical stress. **Annals of botany**, v. 122, n. 5, p. 711–723, 2018.

REIS, A. R. DOS et al. Diagnostico da exigencia do cafeeiro em nitrogenio pela utilizacao do medidor portatil de clorofila. **Bragantia**, v. 65, n. 1, p. 163–171, 2006.

RICH, S. M.; WATT, M. Soil conditions and cereal root system architecture: Review and considerations for linking Darwin and Weaver. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 5, p. 1193–1208, 2013.

RIEGER, M.; LITVIN, P. Root system hydraulic conductivity in species with contrasting root anatomy. **Journal of Experimental Botany**, v. 50, n. 331, p. 201–209, 1999.

RODRIGUES, W.; MARTINS, L.; TOMAZ, M. Avanços sobre o desempenho de cultivares em diferentes condições de cultivo da cafeicultura capixaba. **Avanços sobre o desempenho de cultivares em diferentes condições de cultivo da cafeicultura capixaba**, p. 1–86, 2018.

SANTINATO, F. et al. Análise económica da colheita mecanizada do café utilizando repetidas operações da colhedora. **Coffee Science**, v. 10, n. 3, p. 402–411, 2015.

SHAH, A. N. et al. Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 11, p. 10056–10067, 2017.

SHUKOR, N.-N. et al. Effects of Soil Compaction on Growth and Physiological Characteristics of *Azadirachta excelsa* Seedlings. **American Journal of Plant Physiology**, v. 10, n. 1, p. 25–42, 2015.

SILVA, F. G. DA et al. Gas exchanges and growth of maize as affected by aeration porosity

and soil compaction¹. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 51, n. 3, 2020.

SILVA, P. E. M. et al. The functional divergence of biomass partitioning, carbon gain and water use in *Coffea canephora* in response to the water supply: Implications for breeding aimed at improving drought tolerance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 87, p. 49–57, 2013.

STERCK, F. et al. Functional traits determine trade-offs and niches in a tropical forest community. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 108, n. 51, p. 20627–20632, 2011.

SZATANIK-KLOC, A. et al. Initial growth and root surface properties of dicotyledonous plants in structurally intact field soil and compacted headland soil. **Soil and Tillage Research**, v. 195, n. August, p. 104387, 2019.

TARDIEU, F. Plant response to environmental conditions: Assessing potential production, water demand, and negative effects of water deficit. **Frontiers in Physiology**, v. 4 FEB, n. February, p. 1–12, 2013.

USDA- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. United States Department of Agriculture. **Produção, suprimento e distribuição**, 2020.

VOLSI, B. et al. The dynamics of coffee production in Brazil. **PLoS ONE**, v. 14, n. 7, p. 1–15, 2019.

WAHL, S.; RYSER, P. Root tissue structure is linked to ecological strategies of grasses. **New Phytol**, n. 148, p. 459–471, 2000.

WOLF, E. C.; REJMÁNKOVÁ, E.; COOPER, D. J. Wood chip soil amendments in restored wetlands affect plant growth by reducing compaction and increasing dissolved phenolics. **Restoration Ecology**, v. 27, n. 5, p. 1128–1136, 2019.

APÊNDICE A – Tabelas de médias

Tabela 1 – Teste de médias de: altura das plantas (ALT), número de folhas (NF), diâmetro do ramo ortotrópico (DRO), massa úmida de folhas (MUF), massa úmida do caule (MUC), entrenós (EM) e área foliar (AF) das cultivares Arara, Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho, Mundo Novo e Paraíso.

Cultivar	Alt	NF	DRO	MFF	MFC	EM	AF
Arara	36,48b	26,15b	8,41ab	30,33ab	14,54b	12,30b	1243,00 a
Catuaí Amarelo	32,26b	25,60bc	7,92b	25,18b	12,16b	10,80c	1018,31 a
Catuaí Vermelho	25,44c	20,90c	6,57c	15,26c	6,23c	10,40c	586,94b
Mundo Novo	61,25a	33,60a	8,94ab	31,77a	25,36a	13,50a	1314,83 a
Paraíso	34,43b	27,90b	8,10b	29,61ab	14,47b	11,30cb	1218,56 a

* Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

Tabela 2 – Médias de altura das plantas (ALT), número de folhas (NF), diâmetro do ramo ortotrópico (DRO), massa úmida de folhas (MUF), massa úmida do caule (MUC), entrenós (EM) e área foliar (AF) das cultivares Arara, Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho, Mundo Novo e Paraíso em cinco graus de compactação (68, 74, 80, 86 e 96%) utilizadas na regressão.

Cultivar	Grau de Compactação – GC, %				
	68	74	80	86	92
Altura – ALT, cm					
Arara	31,45	40,20	46,78	27,73	36,25
Catuaí Amarelo	34,03	34,20	34,85	31,05	27,18
Catuaí Vermelho	27,55	27,73	27,08	22,90	21,95
Mundo Novo	65,50	66,18	63,70	64,90	46,00
Paraíso	36,05	36,83	36,10	33,35	29,80
Diâmetro do ramo ortotrópico – DRO, mm					
Arara	8,44	8,55	9,49	6,97	8,62
Catuaí Amarelo	8,16	8,09	8,70	7,47	7,17
Catuaí Vermelho	6,78	6,70	7,03	6,26	6,10
Mundo Novo	8,85	9,30	9,05	9,71	7,79
Paraíso	7,90	7,71	8,55	8,52	7,73
Número de folhas – NF					
Arara	24,25	30,25	27,50	23,75	25,00
Catuaí Amarelo	28,75	26,25	28,00	25,50	19,50
Catuaí Vermelho	25,25	23,00	21,25	16,50	18,50
Mundo Novo	32,75	36,75	38,25	38,75	21,50
Paraíso	29,75	25,75	32,75	29,00	22,25
Número de entre-nós – NE					
Arara	10,50	11,00	10,50	9,25	10,75
Catuaí Amarelo	10,75	11,25	12,00	11,50	11,00
Catuaí Vermelho	11,00	11,00	11,00	10,75	10,25
Mundo Novo	14,00	13,75	13,50	14,25	12,25
Paraíso	12,25	13,00	12,00	12,00	12,00
Massa úmida das folhas – MUF, g					
Arara	33,22	33,77	33,23	23,68	27,73
Catuaí Amarelo	28,95	25,48	31,90	22,11	17,47
Catuaí Vermelho	20,12	17,34	14,26	12,22	12,37

Mundo Novo	33,29	35,99	38,20	33,81	17,56
Paraíso	32,80	30,48	34,70	31,46	18,62
Massa úmida do caule – MUC, g					
Arara	12,54	17,08	19,92	9,13	14,05
Catuai Amarelo	12,84	13,17	14,83	11,26	8,69
Catuai Vermelho	7,52	6,87	6,68	5,05	5,05
Mundo Novo	26,21	29,54	29,14	28,77	13,11
Paraíso	15,29	14,18	16,66	15,73	10,48
Área foliar – AF, cm ²					
Arara	1298,09	1280,22	1608,33	916,30	1112,06
Catuai Amarelo	1176,84	1034,38	1272,16	914,49	693,68
Catuai Vermelho	803,03	627,69	563,67	474,56	465,77
Mundo Novo	1379,62	1482,49	1550,48	1399,72	761,85
Paraíso	1685,83	1150,72	1342,20	1207,93	706,10

Tabela 3 – Teste de médias de: concentração interna de (Ci), transpiração (E), condutância estomática (gs), massa úmida de folhas (MUF), fotossíntese (A) eficiência de utilização de água (EiUA) e eficiência de assimilação de C (EiCi) das cultivares Arara, Catuai Amarelo, Catuai Vermelho, Mundo Novo e Paraíso

Cultivar	Ci	E	gs	A	EiCi	EiUA
Arara	323,55a	1,62a	0,15a	8,71a	0,03c	5,29 a
Catuai Amarelo	318,32a	1,52a	0,13a	9,05a	0,03ab	6,41 a
Catuai Vermelho	304,38a	1,58a	0,12a	9,07a	0,03ab	6,04 a
Mundo Novo	297,97a	1,83a	0,15a	10,57a	0,04a	6,09 a
Paraíso	305,78a	1,71a	0,15a	9,49a	0,03ab	5,90 a

* Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

Tabela 4 – Médias de concentração interna de (Ci), transpiração (E), condutância estomática (gs), massa úmida de folhas (MUF), fotossíntese (A) eficiência de utilização de água (EiUA) e eficiência de assimilação de C (EiCi) das cultivares Arara, Catuai Amarelo, Catuai Vermelho, Mundo Novo e Paraíso em cinco graus de compactação (68, 74, 80, 86 e 96%) utilizadas na regressão.

Cultivar	Grau de Compactação – GC, %				
	68	74	80	86	92
Concentração interna de CO ₂ – Ci, mmol m ⁻² s ⁻¹					
Arara	321,06	304,71	320,68	339,82	331,50
Catuai Amarelo	326,21	317,34	326,69	321,09	300,29
Catuai Vermelho	297,29	304,31	318,15	287,08	315,08
Mundo Novo	298,86	294,58	294,63	306,71	295,07
Paraíso	333,58	312,25	295,19	299,39	288,50
Transpiração – E, mmol m ⁻² s ⁻¹					
Arara	1,82	1,67	1,97	1,23	1,44
Catuai Amarelo	1,59	1,61	1,88	1,23	1,33
Catuai Vermelho	1,71	1,52	1,95	1,46	1,27
Mundo Novo	1,86	1,88	1,94	1,92	1,55
Paraíso	2,02	2,08	1,70	1,87	0,87
Condutância estomática – gs, mmol m ⁻² s ⁻¹					

Arara	0,16	0,14	0,20	0,14	0,13
Catuaí Amarelo	0,15	0,13	0,17	0,12	0,11
Catuaí Vermelho	0,14	0,13	0,16	0,10	0,09
Mundo Novo	0,15	0,15	0,16	0,15	0,12
Paraíso	0,20	0,18	0,15	0,14	0,06
Fotossíntese – A, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$					
Arara	8,99	9,84	10,33	7,17	7,21
Catuaí Amarelo	9,68	8,43	10,93	7,97	8,27
Catuaí Vermelho	10,41	9,70	10,16	8,35	6,71
Mundo Novo	10,73	11,84	10,95	10,31	9,03
Paraíso	10,69	10,92	10,68	9,82	5,35
Eficiência de utilização de água – EiUA, $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$					
Arara	4,92	6,73	5,35	5,07	4,40
Catuaí Amarelo	6,70	6,00	5,75	7,21	6,40
Catuaí Vermelho	6,54	7,14	5,36	5,97	5,19
Mundo Novo	5,83	6,52	5,88	6,25	5,96
Paraíso	5,50	5,40	6,53	5,51	6,58
Eficiência de assimilação de C – EiCi, $\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}$					
Arara	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
Catuaí Amarelo	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Catuaí Vermelho	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
Mundo Novo	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03
Paraíso	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02

Tabelas 5 – Teste de médias dos índices de clorofila a e b das cultivares Arara, Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho, Mundo Novo e Paraíso

Cultivar	Clorofila a	Clorofila b
Arara	46,39b	23,53bc
Catuaí Amarelo	46,75ab	24,70ab
Catuaí Vermelho	48,06ab	26,61ab
Mundo Novo	45,85b	18,65c
Paraíso	49,55a	29,81a

*Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

Tabela 6 – Médias dos índices de clorofila a e b das cultivares Arara, Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho, Mundo Novo e Paraíso em cinco graus de compactação (68, 74, 80, 86 e 96%) utilizadas na regressão.

Cultivar	Grau de Compactação – GC, %				
	68	74	80	86	92
Índice de clorofila a					
Arara	50,19	48,39	45,19	44,43	43,75
Catuaí Amarelo	46,96	46,84	42,80	47,34	49,80
Catuaí Vermelho	47,91	47,9	48,08	47,66	48,76
Mundo Novo	46,65	44,16	46,50	44,93	47,01
Paraíso	49,64	48,53	49,26	49,84	50,49

Índice de clorofila <i>b</i>					
Arara	28,68	27,63	20,61	22,20	18,51
Catuaí Amarelo	21,73	21,2	22,84	25,29	32,44
Catuaí Vermelho	24,51	24,84	25,66	27,49	30,53
Mundo Novo	20,29	15,54	19,60	17,29	20,51
Paraíso	30,38	25,51	27,46	30,85	34,86

Tabela 7 – Teste de médias de: comprimento da raiz (CR), área de superfície de raiz (ASR), volume de raiz (VR), diâmetro de raiz fina (DRF), diâmetro de raiz grossa (DRG), Massa úmida da raiz (MUR) e Massa seca da raiz (MSR) das cultivares Arara, Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho, Mundo Novo e Paraíso

Cultivar	CR	AS	VR	DRF	DRG	MUR	MSR
Arara	2946,03a	433,40ab	5,16ab	698,32ab	19,24 a	37,37 b	4,35 a
Catuaí Amarelo	2689,17ab	405,50ab	4,91ab	684,66ab	19,04 a	46,61ab	5,04 a
Catuaí Vermelho	2329,05b	343,98b	4,08b	572,12b	15,31 a	22,41c	2,76b
Mundo Novo	2604,22ab	391,82ab	4,75ab	677,31ab	18,77 a	45,50ab	5,60 a
Paraíso	2953,64a	448,80a	5,48a	796,51a	14,57a	50,56a	5,53 a

* Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

Tabela 8 – Médias de comprimento da raiz (CR), área de superfície de raiz (ASR), volume de raiz (VR), diâmetro de raiz fina (DRF), diâmetro de raiz grossa (DRG), Massa úmida da raiz (MUR) e Massa seca da raiz (MSR) das cultivares Arara, Catuaí Amarelo, Catuaí Vermelho, Mundo Novo e Paraíso em cinco graus de compactação (68, 74, 80, 86 e 96%) utilizadas na regressão.

Cultivar	Grau de Compactação – GC, %				
	68	74	80	86	92
Comprimento da raiz – CR, cm					
Arara	3818,70	3785,50	3203,43	2392,06	1530,49
Catuaí Amarelo	3126,23	3446,45	3112,84	2785,06	975,29
Catuaí Vermelho	3199,03	3741,50	2924,17	1216,25	564,30
Mundo Novo	3678,60	3841,59	2353,06	2045,86	1101,97
Paraíso	3509,04	3999,29	4016,64	2344,28	898,95
Área de superfície de raiz – ASR, cm ²					
Arara	538,02	543,61	464,40	374,77	246,17
Catuaí Amarelo	477,94	517,48	465,67	410,19	156,22
Catuaí Vermelho	497,33	517,48	413,06	183,53	93,90
Mundo Novo	504,48	563,46	366,70	325,66	198,80
Paraíso	513,41	597,74	607,09	378,98	146,77
Volume de raiz – VR, cm ³					
Arara	6,08	6,33	5,41	4,79	3,19
Catuaí Amarelo	5,87	6,25	5,58	4,87	1,99
Catuaí Vermelho	6,17	6,06	4,70	2,22	1,26
Mundo Novo	5,53	6,58	4,60	4,18	2,86
Paraíso	6,01	7,19	7,32	4,97	1,91
Diâmetro de raiz fina – DRF, mm					

Arara	833,27	836,20	725,04	625,01	472,06
Catuai Amarelo	770,86	884,53	789,90	672,30	305,72
Catuai Vermelho	843,41	869,47	664,70	308,98	174,05
Mundo Novo	758,58	935,19	650,02	616,12	426,66
Paraíso	835,36	1065,53	1066,24	734,23	281,22
Diâmetro de raiz grossa – DRG, mm					
Arara	22,31	20,73	19,02	22,74	11,42
Catuai Amarelo	35,27	20,35	19,06	14,01	6,51
Catuai Vermelho	33,19	15,47	11,77	8,58	7,55
Mundo Novo	17,80	27,49	21,19	13,58	13,80
Paraíso	18,87	19,86	17,92	8,83	7,33
Massa úmida da raiz – MUR, g					
Arara	45,81	53,33	36,21	27,75	23,73
Catuai Amarelo	56,57	48,35	52,30	49,16	26,67
Catuai Vermelho	33,71	27,00	24,43	15,22	10,70
Mundo Novo	53,28	53,23	51,58	48,42	20,98
Paraíso	57,25	54,99	56,48	54,03	30,05
Massa seca da raiz – MSR, g					
Arara	6,03	5,82	4,22	2,81	2,88
Catuai Amarelo	6,40	5,59	5,36	5,25	2,63
Catuai Vermelho	3,98	3,39	2,86	2,08	1,51
Mundo Novo	6,13	6,90	7,13	5,51	2,33
Paraíso	5,10	6,23	5,20	6,05	5,09

APÊNDICE B – Tabela de porcentagem de comprimento raiz por camada

Tabela – Porcentagem do comprimento das raízes de cultivares de café arábica após divisão da coluna de solo em três camadas (C1, C2 e C3) por grau de compactação (GC) e blocos.

Cultivar	GC	Bloco	Comprimento em cada camada (%)		
			1	2	3
Arara	68	1	25,44	47,76	26,80
Arara	68	2	35,04	34,06	30,90
Arara	68	3	33,06	36,68	30,26
Arara	68	4	34,57	35,21	30,22
Arara	74	1	30,90	34,06	0,00
Arara	74	2	52,78	28,48	18,74
Arara	74	3	33,65	44,99	21,36
Arara	74	4	42,72	25,08	32,20
Arara	80	1	49,54	32,46	17,99
Arara	80	2	22,55	27,21	50,23
Arara	80	3	37,24	34,29	28,47
Arara	80	4	31,13	37,10	31,77
Arara	86	1	35,06	42,01	22,94
Arara	86	2	33,13	54,39	12,48
Arara	86	3	100,00	0,00	0,00
Arara	86	4	44,88	45,02	10,10
Arara	92	1	44,30	44,36	11,28
Arara	92	2	100,00	0,00	0,00
Arara	92	3	39,98	46,70	13,33
Arara	92	4	100,00	0,00	0,00
Catuaí Amarelo	68	1	24,80	38,76	36,44
Catuaí Amarelo	68	2	37,17	27,65	35,18
Catuaí Amarelo	68	3	30,97	36,70	32,33
Catuaí Amarelo	68	4	35,47	32,79	31,74
Catuaí Amarelo	74	1	32,75	37,56	29,69
Catuaí Amarelo	74	2	25,87	25,87	10,33
Catuaí Amarelo	74	3	37,52	30,83	31,65
Catuaí Amarelo	74	4	44,15	33,62	22,23
Catuaí Amarelo	80	1	29,52	48,15	22,33
Catuaí Amarelo	80	2	44,31	31,02	24,67
Catuaí Amarelo	80	3	34,20	34,28	32,24
Catuaí Amarelo	80	4	31,67	42,99	25,34
Catuaí Amarelo	86	1	40,05	41,17	18,79
Catuaí Amarelo	86	2	41,03	39,72	19,25
Catuaí Amarelo	86	3	55,16	44,84	0,00
Catuaí Amarelo	86	4	100,00	0,00	0,00
Catuaí Amarelo	92	1	100,00	0,00	0,00
Catuaí Amarelo	92	2	100,00	0,00	0,00
Catuaí Amarelo	92	3	100,00	0,00	0,00
Catuaí Amarelo	92	4	100,00	0,00	0,00
Catuaí Vermelho	68	1	26,23	44,03	29,74
Catuaí Vermelho	68	2	36,74	38,07	25,19
Catuaí Vermelho	68	3	27,55	27,63	44,82
Catuaí Vermelho	68	4	24,50	40,39	35,11
Catuaí Vermelho	74	1	17,10	33,85	49,05
Catuaí Vermelho	74	2	22,75	41,52	35,73
Catuaí Vermelho	74	3	50,35	40,33	9,32
Catuaí Vermelho	74	4	54,53	23,20	22,28

Catuaí Vermelho	80	1	37,84	44,16	18,00
Catuaí Vermelho	80	2	44,90	32,03	23,07
Catuaí Vermelho	80	3	28,45	40,16	31,39
Catuaí Vermelho	80	4	39,33	26,07	34,60
Catuaí Vermelho	86	1	69,78	30,22	0,00
Catuaí Vermelho	86	2	61,07	38,93	0,00
Catuaí Vermelho	86	3	73,66	26,34	0,00
Catuaí Vermelho	86	4	100,00	0,00	0,00
Catuaí Vermelho	92	1	100,00	0,00	0,00
Catuaí Vermelho	92	2	100,00	0,00	0,00
Catuaí Vermelho	92	3	100,00	0,00	0,00
Catuaí Vermelho	92	4	100,00	0,00	0,00
Mundo Novo	68	1	39,15	30,99	29,86
Mundo Novo	68	2	37,61	26,49	35,89
Mundo Novo	68	3	45,15	30,41	24,44
Mundo Novo	68	4	26,92	43,17	29,91
Mundo Novo	74	1	39,15	30,99	29,86
Mundo Novo	74	2	23,71	32,27	44,02
Mundo Novo	74	3	28,14	40,75	31,11
Mundo Novo	74	4	24,71	33,27	43,02
Mundo Novo	80	1	27,90	29,76	42,34
Mundo Novo	80	2	30,31	49,38	20,31
Mundo Novo	80	3	40,93	30,95	28,12
Mundo Novo	80	4	31,95	29,44	38,61
Mundo Novo	86	1	100,00	0,00	0,00
Mundo Novo	86	2	41,66	32,51	25,83
Mundo Novo	86	3	44,41	35,52	20,07
Mundo Novo	86	4	45,15	29,98	24,87
Mundo Novo	92	1	100,00	0,00	0,00
Mundo Novo	92	2	100,00	0,00	0,00
Mundo Novo	92	3	100,00	0,00	0,00
Mundo Novo	92	4	65,68	34,32	0,00
Paraíso	68	1	28,24	49,22	22,53
Paraíso	68	2	26,31	33,12	40,57
Paraíso	68	3	28,24	49,22	22,53
Paraíso	68	4	31,72	28,72	39,56
Paraíso	74	1	37,35	38,40	24,25
Paraíso	74	2	22,46	42,87	34,67
Paraíso	74	3	34,58	47,74	17,68
Paraíso	74	4	53,60	28,70	17,71
Paraíso	80	1	21,00	38,89	40,10
Paraíso	80	2	32,89	27,18	39,93
Paraíso	80	3	27,47	39,06	33,47
Paraíso	80	4	20,55	36,09	43,37
Paraíso	86	1	43,75	36,95	19,30
Paraíso	86	2	47,60	32,87	19,53
Paraíso	86	3	45,04	38,03	16,93
Paraíso	86	4	44,36	38,46	17,18
Paraíso	92	1	100,00	0,00	0,00
Paraíso	92	2	100,00	0,00	0,00
Paraíso	92	3	100,00	0,00	0,00
Paraíso	92	4	100,00	0,00	0,00

* 1, 2 e 3 são as camadas 1, camada 2 e camada 3 respectivamente, obtidas com a divisão do solo em três partes para a coleta separadamente das raízes e posteriormente escaneamento e obtenção do comprimento.