

DISTRIBUIÇÃO DE FRUTOS E INTERCEPTAÇÃO LUMINOSA CALCULADAS PARA PLANTAS VIRTUAIS DE *Coffea arabica* EM 3D

Miroslava Rakocevic²; William Martins de Gouveia³

¹ Trabalho financiado pelo Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café – CBP&D/Café

² Pesquisadora Visitante, D.Sc., Bolsista da Fundação Araucária. IAPAR, Londrina-PR. miroslava@iapar.br

³ Graduando em Matemática na UEL, Bolsista do CNPq/PIBIC. IAPAR, Londrina-PR. willmat80@hotmail.com

RESUMO: O acoplamento de modelos tridimensionais (3D) estruturais com os funcionais mostra-se útil na simulação de interceptação luminosa, transpiração, fotossíntese, alocação de carbono e efeito da temperatura, ao considerar diferentes níveis de organização espacial e temporal. Este trabalho teve como objetivo analisar os padrões de distribuição espacial de folhas e frutos considerando a ordem de ramificação, e consequentemente a interceptação luminosa da folhagem de plantas de *Coffea arabica* cultivadas em diferentes arranjos e densidades, com base em plantas virtuais construídas a partir de medições efetuadas em campo. A densidade (6000, 10000 e 14000 plantas ha⁻¹) não afetou o número de frutos, a área foliar (AF) nem a Taxa de Silhueta de Área Total (STAR) nas camadas horizontais do dossel. Aceitando menor rigor na análise estatística, observou-se que as plantas apresentaram maior produção e menor AF no arranjo quadrado do que no retangular. Os frutos apareceram com maior exuberância nos ramos plagiotrópicos de primeira e segunda ordem e nas camadas superiores e medianas. O espaço de camadas superiores foi ocupado por folhagem de primeira ordem de ramificação e poucos frutos, permitindo maior interceptação luminosa e produção para as camadas medianas e inferiores. A eficiência de interceptação foi, em geral, maior nas folhas que se originaram nos plagiotrópicos de primeira e segunda ordem, qualquer que fosse sua posição vertical no dossel. A projeção da copa das plantas virtuais foi superestimada em comparação às medições obtidas no campo, e portanto, uma futura aquisição das informações arquiteturais necessita ser mais detalhada e efetuada no nível de metâmeros.

Palavras-Chave: área foliar, *Coffea arabica*, distribuição de frutos, VegeSTAR, VPlants.

FRUIT DISTRIBUTION AND LIGHT INTERCEPTION CALCULATED FOR 3D VIRTUAL *Coffea arabica* TREES

ABSTRACT: Coupling 3D structural and functional models was shown to be highly useful in simulation of light interception, transpiration, photosynthesis, carbon allocation and temperature effects, considering different levels of spatial and temporal organization. The aim of this work was to analyze the patterns of leaf and fruit space distribution, including the branching order and consequently, the foliage light interception of *Coffea arabica* cultivated in different plantation densities and arrangements, based on the virtual plants constructed from field measurements. The plantation density (6000, 10000 e 14000 plants ha⁻¹) did not influence the fruit number, leaf area (AF) or silhouette to total area ratio (STAR) per layer. Accepting lower statistical rigor was permitted to observe that plants cultivated under a quadrate arrange produced less AF and more fruits compared to a rectangular. The fruits appeared most exuberantly on first and second branching orders of plagiotropics, and in the lower and medium layers. The space of superior layers was occupied by the foliage of the first branching order and the modest fruit appearance, permitting more light interception and fruit production for medium and lower layers. The light interception efficiency was generally higher for leaves originated on first and second orders of plagiotropics, whenever was their vertical position in the plant canopy. The crown projection of virtual plants was overestimated in comparison to the field measurement, which indicates the necessity of more detailed information acquisitions about the plant architecture, on a scale of metamers.

Key words: *Coffea arabica*, fruit distribution, leaf area, VegeSTAR, VPlants.

INTRODUÇÃO

O padrão de monitoramento de radiação interceptada por uma cultura ou floresta, durante certo intervalo de tempo, relaciona-se estreitamente com a produção das mesmas. Devido às medições de interceptação luminosa serem caras, considerando o tempo necessário e o preço de numerosos sensores, muitos laboratórios trabalham com as simulações de interceptação solar usando modelos matemáticos (Zanetti *et al.*, 1999) de interceptação e de estrutura de dossel.

Por outro lado, para o melhor entendimento de interações entre as plantas e o seu ambiente, nas últimas décadas foram disponibilizadas ferramentas para modelar plantas virtuais. Sievänen *et al.* (2000) distinguiram três tipos de modelos de plantas virtuais: modelos baseados nos processos (PBM), modelos geométricos (GM) e modelos estruturais-funcionais (FSM). O acoplamento de métodos tridimensionais estruturais (modelos geométricos) com os funcionais mostra-se útil na simulação, não somente de interceptação luminosa (Sinoquet *et al.*, 2007), mas também na simulação de diferentes variáveis ecofisiológicas, como transpiração, fotossíntese, alocação de carbono ou efeito de temperatura, ao considerar diferentes níveis de organização espacial e temporal. Os detalhados modelos estruturais-funcionais usam

os cálculos de radiação dentro do dossel vegetal traçando os raios ou solucionando as equações de transferência radiativa (Sinoquet *et al.*, 2000) usando o método de ordenadas discretas em espaço 3D (Sinoquet *et al.*, 2001).

No início dos anos 80, Reffye (1981) começou as análises matemáticas da probabilidade de distribuição e agrupamento de ramificações secundárias do café robusta. Posteriormente foi analisada a probabilidade da distribuição dos frutos nos ramos plagiotrópicos (Cilas *et al.*, 2006), e a interação com fatores ambientais com uso de GreenLab (Mathieu, 2006). Este trabalho teve como objetivo analisar os padrões de distribuição espacial de folhas e frutos considerando a ordem de ramificação e conseqüentemente, a interceptação luminosa da folhagem de plantas café arábica cultivadas em diferentes arranjos e densidades, com base em plantas virtuais construídas a partir de medições efetuados em campo.

MATERIAL E MÉTODOS

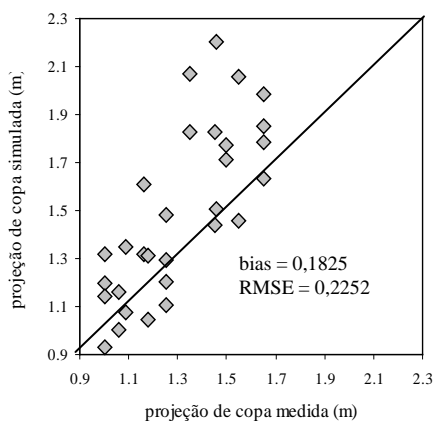
O ensaio de arranjo foi realizado a campo, no ano 2007, na estação experimental do Iapar (Londrina, PR), em área cultivada com plantas *C. arabica* (cv. IAPAR 59), com idade de 14 anos, implantadas a partir de mudas de viveiro, e recepadas com idade de cinco anos. O experimento foi feito com diversos arranjos de plantas, com 24 tratamentos em distribuição espacial, que variou de quadrangular a retangular, com 14000, 12000, 10000, 8000 e 6000 plantas ha^{-1} . Para a construção de maquetes escolheram-se seis tratamentos distintos: 14000 plantas ha^{-1} em arranjo quadrangular (0,84 x 0,84 m) e retangular (2,00 x 0,35 m); 10000 plantas ha^{-1} em arranjo quadrangular (1,00 x 1,00 m) e retangular (3,00 x 0,33 m); 6000 plantas ha^{-1} com arranjo quadrangular (1,29 x 1,29 m) e retangular (3,00 x 0,55 m). Para cada um dos seis tratamentos analisou-se 2 a 5 plantas.

As plantas virtuais (maquetes) foram construídas em VPlants (seguidor de AMAPmod), na plataforma ALEA (Pradal *et al.*, 2004). Detalhes sobre a reconstrução de cafeeiros em três dimensões podem ser vistos no artigo em anais (Rakocevic & Androciolo Filho). As maquetes foliares foram compiladas em PlantGLViewer e importadas no VegeSTAR (Adam *et al.*, 2006), software que permite os cálculos de interceptação luminosa e fotossíntese - com o qual foi calculada a distribuição da área foliar e dos frutos para cada ordem de ramificação nas camadas horizontais do dossel de espessura 10cm, com a interceptação luminosa relativa. Na divisão do dossel usou-se uma opção disponível no VegeSTAR, que diferencia cores virtuais RGB (RedGreenBlue), cada uma em 255 nuances, ao permitir-se mais que 10^7 diferentes nuances virtuais, ou seja, na computação de interceptação luminosa quase é possível identificar uma folha de determinada planta ou de um dossel. Em nossos cálculos, para as folhas que pertencem à ordem de ramificação zero (ortotrópico) atribuiu-se cor virtual verde; para a primeira ordem da ramificação, azul; para a segunda, vermelho; para a terceira, roxa e a quarta, preta. A distribuição de folhas e frutos pelas camadas foi organizada primeiramente com ajuda das múltiplas equações condicionais e uso de funções lógicas como “IF, OR, AND”. A interceptação no software VegeSTAR é determinada a partir da análise das imagens de plantas e a sua síntese. A utilização consiste em calcular a STAR (Taxa de Silhueta de Área Total) das plantas, isto é, a área projetada da folhagem na direção do raio incidente.

A análise estatística foi feita com o software livre R (versão 2.8.1.). Para testar a veracidade das simulações, foram calculados os valores de bias e RMSE (raiz quadrada de erro médio). No ajuste de distribuição, algumas camadas foram agrupadas, no intuito de apresentar a área foliar suficiente para a comparação. Para análise de distribuição de frutos e folhagem em camadas de 40cm e pela ordem de ramificação usou-se ANOVA do modelo repetitivo (lme). A variância nas figuras está apresentada pelo erro de médias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliou-se primeiro a projeção da copa (diâmetro de copa) medida no campo, em comparação ao de compilação (Figura 1), onde nas planilhas de saída foram considerados os pontos cartesianos nos eixos ‘X’ e ‘Y’ mais distantes, para cada planta reconstruída. O valor de ‘bias’ mostra (Figura 1) que a projeção média de copa estimada é 0,1825 m maior do que a medida. Não houve uma regularidade nos valores superestimados, por isso a RMSE é de valor relativamente distante da linha



1:1 (0,2252). Em média, os valores foram 18,25% superestimados. Há duas razões que podem explicar os valores superestimados. Primeira: deve-se considerar o modelo geral de Roux (Hallé *et al.*, 1978), que descreve as plantas de café. Nele se diferenciam dois tipos de metâmeros – pertencentes ao tronco principal (ortotrópico) e às ramificações laterais - plagiotrópicos. Na aquisição simplificada de informações efetuada no campo, o comprimento de cada entrenó do tronco foi obtido pela divisão do comprimento do tronco pelo número de seus entrenós, por admitir-se que há certa regularidade no comprimento de entrenós no ortótropo. Além disso, usaram-se os comprimentos de entrenós nos ramos plagiotrópicos multiplicados pela constante aleatória de 0,7 em comparação de ancestrais (Rakocevic & Androcioli Filho, nos anais). Segunda: atribuiu-se ângulo de inserção de ramos entre 35-85° no ortótropo, de baixo para cima, mas aos entrenós seguintes atribuiu-se inclinação quase paralela ao solo, de maneira que, na maquete 3D, os ramos virtuais adquiriram disposição mais “aberta” que nas plantas reais.

Figura 1: Comparação entre o diâmetro de planta medido e calculado em VegeSTAR. A raiz quadrada de erro médio (RMSE), o bias e a linha 1:1 são indicadas.

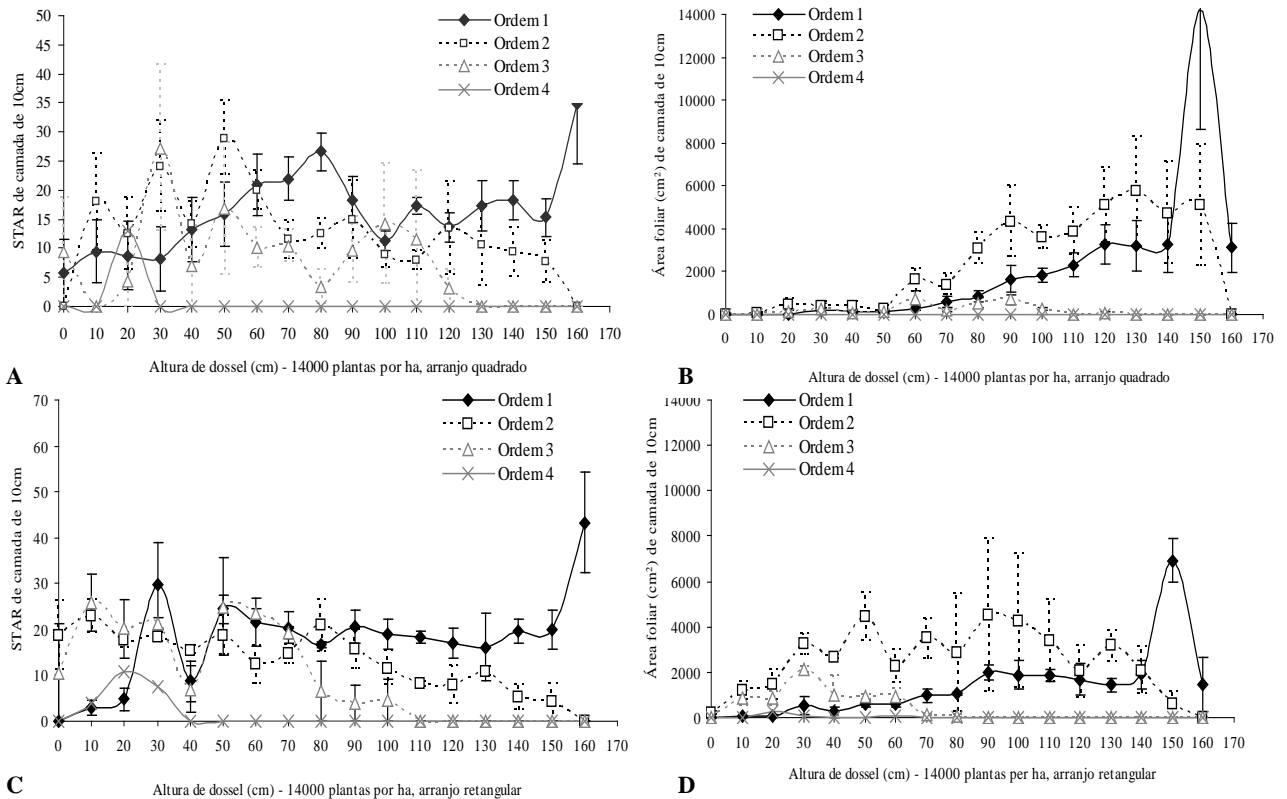


Figura 2: Área foliar e STAR médios estimados em VegeSTAR para as camadas de espessura de 10cm, obtidas a partir de maquetes 3D compiladas para os cafeeiros cultivados em densidade 14000 plantas ha⁻¹. A e B: arranjo quadrado, C e D: arranjo retangular. A folhagem foi diferenciada pela ordem de ramificação (1 a 4).

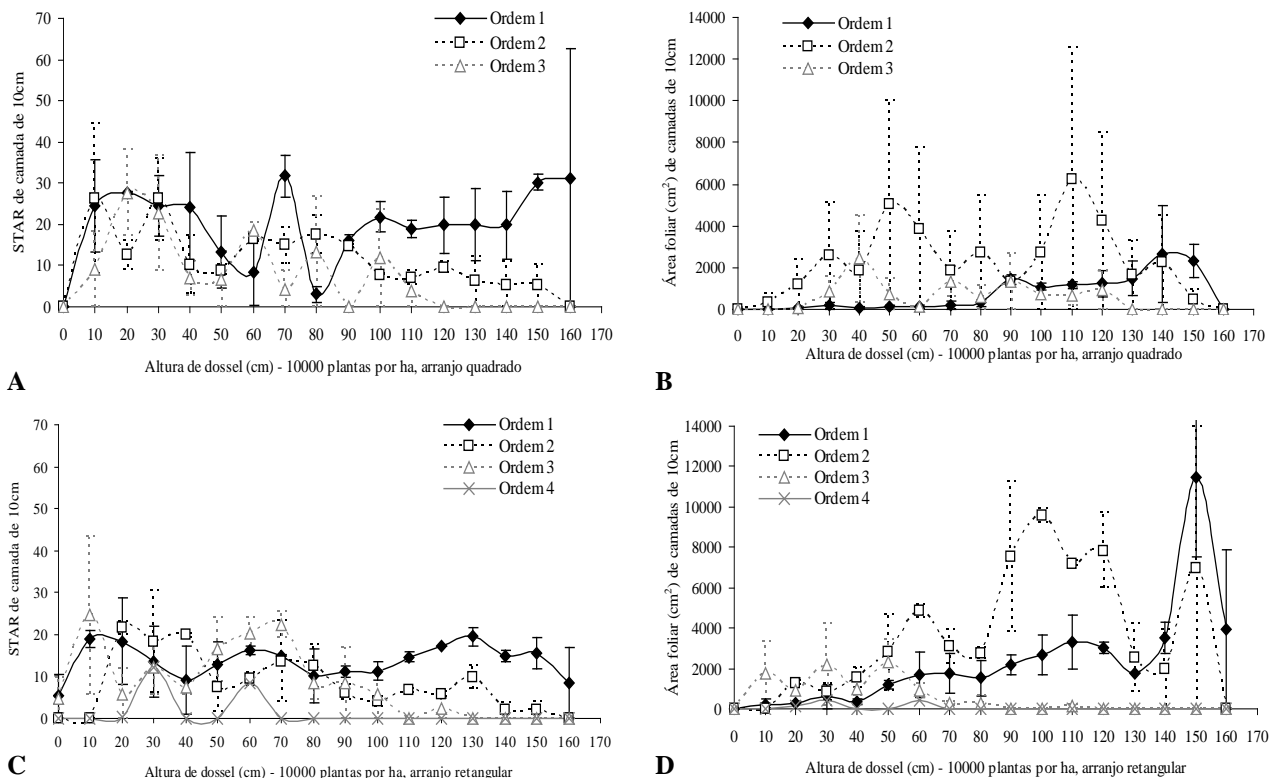


Figura 3: Área foliar e STAR médios estimados em VegeSTAR para as camadas de espessura de 10cm, obtidas a partir de maquetes 3D compiladas para os cafeeiros cultivados em densidade 10000 plantas ha⁻¹. **A e B:** arranjo quadrado, **C e D:** arranjo retangular. A folhagem foi diferenciada pela ordem de ramificação (1 a 4).

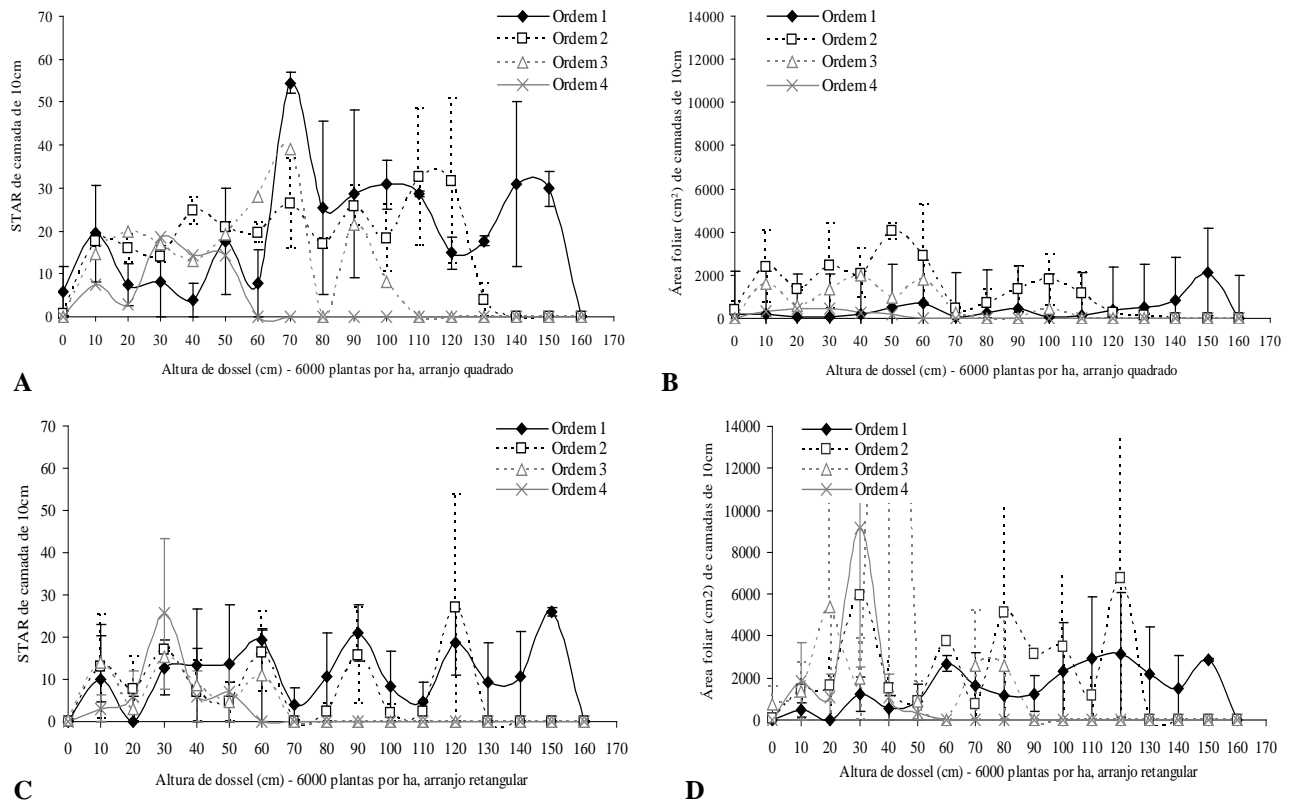


Figura 4: Área foliar e STAR médios estimados em VegeSTAR para as camadas de espessura de 10cm, obtidas a partir de maquetes 3D compiladas para os cafeeiros cultivados em densidade 6000 plantas ha⁻¹. **A e B:** arranjo quadrado, **C e D:** arranjo retangular. A folhagem foi diferenciada pela ordem de ramificação (1 a 4).

Tabela 1: ANOVA de modelo repetitivo para a distribuição de frutos, área foliar (AF) e STAR calculados para camadas de 40cm de espessura de cafeeiros cultivados em diferentes densidades (14, 10 e 6 mil plantas ha⁻¹) e arranjos (quadrado e retangular). Valores compilados a partir de maquetes 3D.

	GL	p-valor FRUTOS	p-valor AF	p-valor STAR
densidade	2	0.1145	0.8725	0.5902
arranjo	1	0.0773	0.0437	0.0554
camada (1-4)	3	<.0001	0.0053	<.0001
ordem de ramificação	3	<.0001	<.0001	<.0001
densidade x arranjo	2	0.3198	0.0199	0.0002
densidade x camada	6	0.0183	0.002	0.7689
arranjo x camada	3	0.2838	0.2892	0.1663
densidade x ordem	6	0.2722	0.0163	0.4408
arranjo x ordem	3	0.0548	0.7866	0.2349
camada x ordem	9	<.0001	<.0001	<.0001
densidade x arranjo x camada	6	0.2467	0.2797	0.2087
densidade x arranjo x ordem	6	0.1274	0.4069	0.4849
densidade x camada x ordem	18	0.2276	0.6311	0.6569
arranjo x camada x ordem	9	0.0517	0.7917	0.9763
densidade x arranjo x camada x ordem	18	0.9113	0.1748	0.2936

destaca quando se tratam das camadas de 150 – 170 cm de altura e densidades maiores - 10000 e 14000 plantas ha⁻¹ (Figuras 2 e 3, Tabela 1, interação da densidade com a ordem de ramificação). A área foliar originada nos ramos

Nas Figuras 2-4 estão representados STAR e área foliar calculados no VegeSTAR para as camadas finas de 10cm de folhagem de cafeeiros em 3D. As folhas foram diferenciadas pela sua origem nos ramos plagiotrópicos da ordem de 1 a 4. Apesar da análise restrita, devido ao número de plantas medidas, pode ser concluído que as ramificações de terceira e quarta ordem aparecem somente na parte mediana e inferior de copa, ou seja, abaixo de 70-80 cm., em todas as densidades e arranjos. Nenhum ramo de ordem 4 apareceu na densidade de 10000 plantas ha⁻¹ no arranjo quadrado (Figura 3B). A folhagem de ordem 4 está mais presente quando a densidade é menor e o arranjo é retangular (Figura 4D).

A folhagem originada nos ramos de primeira ordem predomina somente nos estratos superiores das plantas, o que se

plagiotrópicos de segunda ordem de ramificação foi mais importante na construção de todas as plantas de sete anos de idade (Figuras 2B-4B).

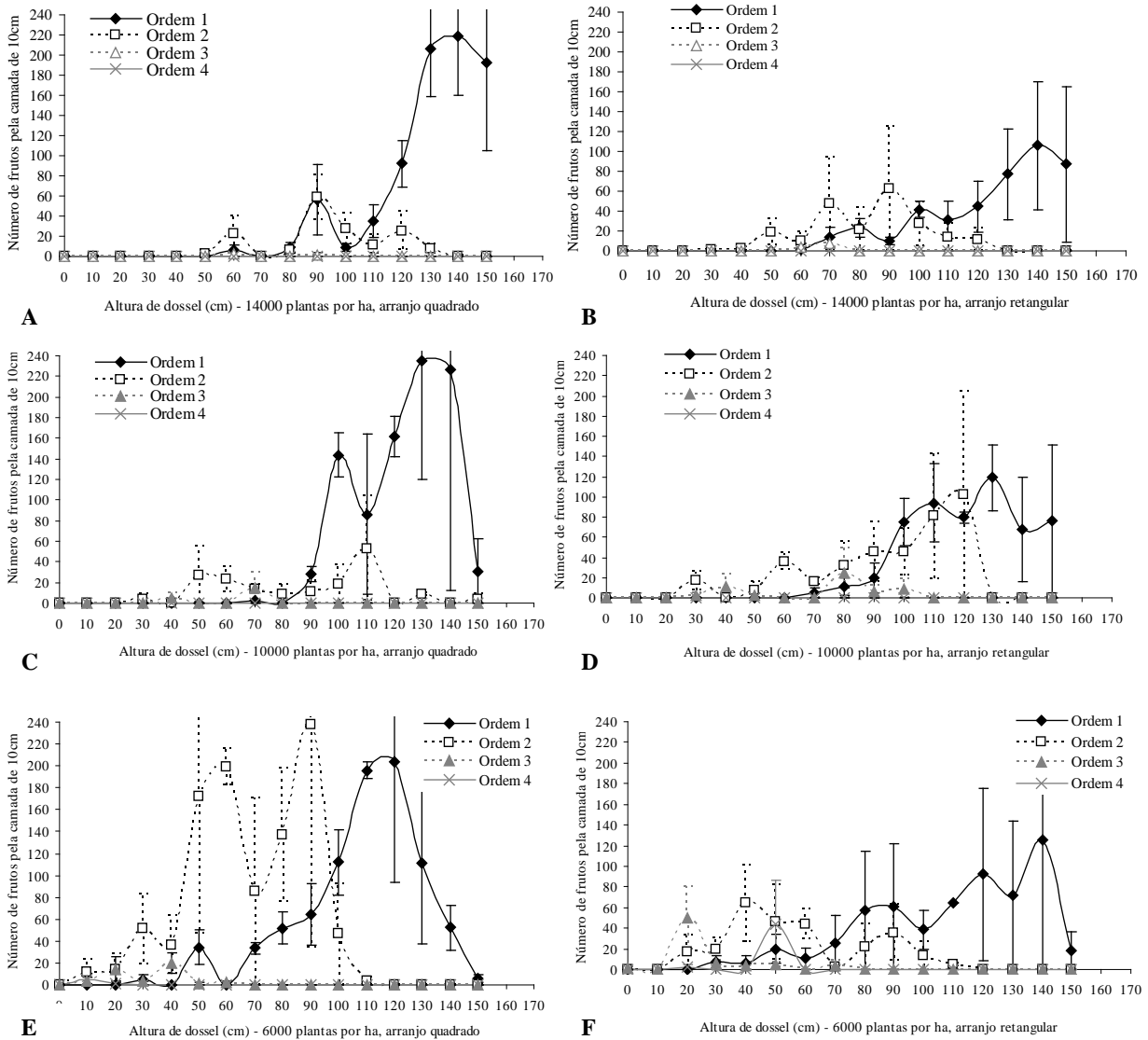


Figura 5: Distribuição de frutos estimada em VegeSTAR em camadas finas de 10cm, obtidas a partir de maquetes 3D para os cafeeiros cultivados com **A/** 14000 plantas ha⁻¹, arranjo quadrado **B/** arranjo retangular; **C/** 10000 plantas ha⁻¹, arranjo quadrado **D/** arranjo retangular; **E/** 6000 plantas ha⁻¹, arranjo quadrado **F/** arranjo retangular. Origem de frutos ou diferenciada pela ordem de ramificação (1 a 4).

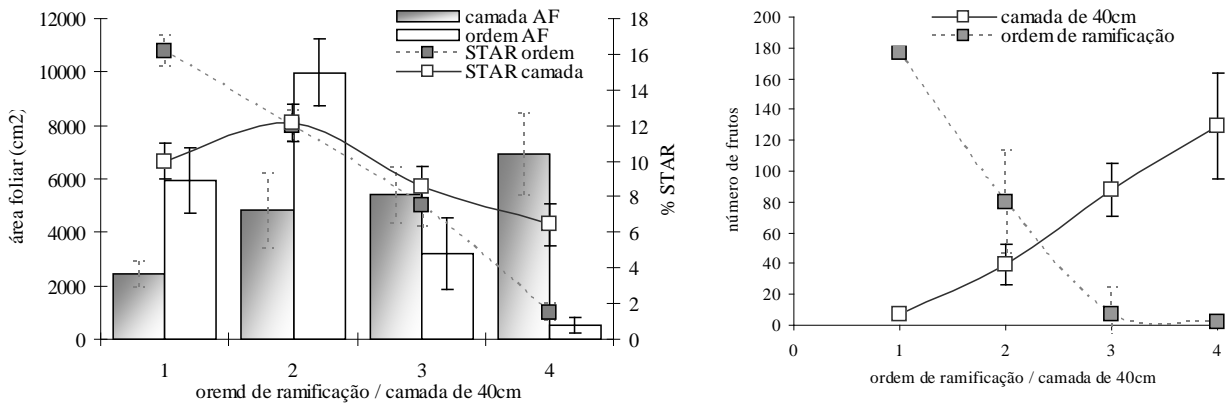


Figura 6: A/ Área foliar (AF) e STAR médios; B/ Número médio de frutos atribuídos aos ramos plagiotrópicos, separados pela ordem de ramificação (1-4) e camadas de 40cm de espessura de dossel (1: 0-40cm, 2: 41-80cm etc).

A eficiência da interceptação luminosa foi, em geral, maior para as folhas dos ramos plagiotrópicos de primeira (Figura 2C, 3A, 4A e 4C) e segunda ordem (2A e 3C), qualquer que fosse sua posição pela vertical no dossel (Figura 6A, Tabela 1). Nas camadas inferiores, praticamente em todos arranjos e densidades, apresentou-se STAR de alto valor calculado para a folhagem de quarta ordem (por exemplo 27.18% na camada 20-30cm - Figura 2A, e 25,66 % na camada 30-40cm - Figura 4C), e de terceira ordem (27,58% na camada 10-20cm - Figura 3A), o que atribuiu eficiência na interceptação luminosa com relativa uniformidade na vertical das plantas, o que, por sua vez, significa que a folhagem dispersa é característica para ocupar e aproveitar o espaço de maneira “inteligente”.

Apesar de idade avançada das plantas, os frutos apareceram com exuberância nos ramos plagiotrópicos de primeira e segunda ordem (Figura 5) e nas camadas superiores (Figuras 5A-D) e medianas (Figuras 5E-D). A distribuição de frutos nas camadas superiores relacionam-se com a reações fotomorfogenéticas na indução floral, que é maior quanto maior a razão vermelho:vermelho-distante, o que ocorre no ambiente com menor sombreamento foliar (Cockburn *et al.*, 1996).

A densidade não afetou o número de frutos pelas camadas, AF, nem STAR, porém aceitando-se menor rigor na análise estatística, observou-se que o arranjo influenciou as variáveis avaliadas (Tabela 1), previamente observado por Androcioli-Filho *et al.* (2002). O efeito mais pronunciado atribuiu-se à ordem de ramificação e nas camadas horizontais do dossel (Tabela 1, Figuras 1-6). A distribuição de frutos foi mais regular quanto maior o espaço individual (6000 plantas ha⁻¹, ou Figuras 5E-F). De forma sintética, o número de frutos caiu gradualmente com a ordem de ramificação e aumentou significativamente com a altura no dossel (Figura 6B e Tabela 1), e o espaço das camadas superiores foi ocupado por folhagem de primeira ordem e poucos frutos, permitindo maior interceptação luminosa e produção nas camadas inferiores (Figura 6).

CONCLUSÕES

A densidade de plantio não afetou o número de frutos nas camadas horizontais do dossel, AF, nem STAR, porém aceitando-se menor rigor na análise estatística, observou-se que o arranjo influenciou as variáveis avaliadas. O efeito mais pronunciado atribuiu-se à ordem de ramificação e à distribuição nas camadas horizontais do dossel pela altura de plantas. O número de frutos caiu gradualmente com a ordem de ramificação e aumentou significativamente com a altura no dossel.

A estimativa da projeção da copa ter sido maior do que a real mostra claramente a necessidade de se obterem informações reais sobre o número e o tamanho dos entrenós, diferenciando as qualidades do tronco ortotrópico e das ramificações plagiotrópicas. A premissa de que comprimento dos entrenós é igual também deve ser examinada nos experimentos. Acreditamos que as plantas, após sete anos de crescimento, tiveram as marcas de crescimento (como cicatrizações de posição de nós) que em muitos casos tornaram-se pouco visíveis (as medições feitas em 2007 contaram com o reconhecimento de cicatrizações) e a noção sobre do comprimento no nível de metâmero ficou distorcida, devido à impossibilidade de reconstruir o histórico nesse nível de precisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, B.; DONES, N.; SINOQUET, H. 2006. VegeSTAR3.2. - **Software** qui calcule l'interception lumineuse et la photosynthèse. UMR PIAF INRA-UBP, Clermont-Ferrand.
- ANDROCIOLI FILHO, A.; CARAMORI, P. H.; CARNEIRO FILHO F. Influência da forma de disposição das plantas na área sobre a produtividade em lavouras de café adensado. II Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil. v3. **Anais...** Vitória-ES, 2002, Brasília - DF, Embrapa-Café, 2002, p.1384-1387.
- CILAS, C.; BAR-HEN, A.; MONTAGNON, C.; GODIN, C. Definition of architectural ideotypes for good yield capacity in *Coffea canephora*. **Annals of Botany**, Oxford, v.97, n.3, p.405-411, mar. 2006.
- COCKBURN, W.; WHITELAM, G. C.; BROAD, A.; SMITH, J. The participation of phytochrome in the signal transduction pathway of salt stress responses in *Mesembryanthemum crystallinum* L. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.47, n. 298, p. 647-653, mai. 1996.
- MATHIEU, A. Essai sur la modélisation des interactions entre la croissance et le développement d'une plante: cas du modèle 'GreenLab'. **PhD Thesis**, Ecole Centrale de Paris, France, 2006.
- PRADAL, C.; DONES, N.; GODIN, C.; REUILLE, P. B. de; BOUDON, F.; ADAM, B.; SINOQUET, H. 2004. ALEA: A software for integrating analysis and simulation tools for 3D architecture and ecophysiology. 4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models. **Proceedings...** (Ed.) C. Godin *et al.*, Montpellier-France. 2004, p. 406.
- REFFYE, P. de. Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. I. Etude du fonctionnement des méristèmes et de la croissance des axes végétatifs. **Café, Cacao, Thé**, Paris, v. 25, n.2, p. 83-104, abr./jun. 1981.
- SIEVÄNEN, R.; NIKINMAA, E.; NYGREN, P.; OZIER-LAFONTAINE, H.; PERTTUNEN, J.; HAKULA, H. Components of functional-structure tree models. **Annals of Forest Science**, v. 57, n. 5/6, p. 399-412, jun.-set. 2000.
- SINOQUET, H.; RAKOCEVIC, M.; VARLET-GRANCHER C. Comparison of models for daily light partitioning in multispecies canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 101, n. 4, p. 251-263, abr. 2000.

- SINOQUET, H.; LE ROUX, X.; ADAM, B.; AMEGLIO, T.; DAUDET, F.A. RATP: a model for simulating the spatial distribution of radiation absorption, transpiration and photosynthesis within canopies—application to an isolated tree crown. **Plant Cell and Environment**, v. 24, n.4, 395–406, dez. 2001.
- SINOQUET, H.; STEPHAN, J.; SONOHAT, G.; LAURI, P. É.; MONNEY, Ph. Simple equations to estimate light interception by isolated trees from canopy structure features: assessment with three-dimensional digitized apple trees. **New Phytologist**, Oxford, v. 175, n.1, p. 94–106, abr. 2007.
- ZANETTI, P.; DELFINE, S.; ALVINO, A. A mathematical approach for estimating light absorption by a crop from continuous radiation measurements and restricted absorption data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 22, n.1, p. 71–81, jun. 1999.