

MAQUETES DE PLANTAS ADULTAS DE CAFÉ ARÁBICA, RECONSTRUÍDAS A PARTIR DE MEDIÇÕES MORFOLÓGICAS EM CAMPO

Miroslava Rakocevic²; Armando Androcioli Filho³

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 Pesquisador, M.Sc., IAPAR, Londrina-PR. aafilho@iapar.br

RESUMO: A arquitetura vegetal é definida como qualquer descrição individual baseada na análise da planta em componentes, especificando o seu tipo biológico e/ou sua forma e/ou sua localização e/ou orientação no espaço e/ou a maneira como eles são fisicamente relacionados uns com os outros. O objetivo deste trabalho foi definir parâmetros para a análise arquitetural de plantas adultas de *Coffea arabica*, e modelar a construção de suas maquetes para futuras simulações ecofisiológicas. As plantas foram codificadas e reconstruídas virtualmente com uso de VPlants e representadas em PlantGLViewer. A reconstrução foi feita com base em parâmetros medidos a campo (altura do tronco ortotrópico, número total de entrenós do tronco, posição e comprimento de ramos primários plagiotrópicos, posições de ramos da II-IV ordem, número total de entrenós de ramos plagiotrópicos primários a quaternários, número de entrenós verdes e de pares de folhas), além de diversas premissas. Foi calculado o índice de área foliar (IAF), a partir de maquetes foliares em VegeSTAR, para cafeeiros (cv. IAPAR 59) cultivados em diferentes arranjos e densidades. O arranjo retangular, na densidade de 10000 plantas ha⁻¹, foi o que apresentou os maiores valores de IAF do que quadrangular. Acredita-se que para uma futura análise arquitetural, com a utilização do protocolo desenvolvido a partir do modelo estrutural de cafeeiro adulto, será necessário coletar e correlacionar parâmetros mais precisos (*i.e.* comprimento de cada entrenó, tamanho de folhas, ângulos de inserção de ramos e de folhas) ao longo do desenvolvimento de entidades vegetais e reprodutivas.

Palavras-Chave: arquitetura vegetal, *Coffea arabica*, IAF, VegeSTAR, VPlants.

3D MOCK-UPS OF ADULT PLANTS OF COFFEE ARABICA, RECONSTRUCTED FROM THE FIELD MORPHOLOGICAL MEASURES

ABSTRACT: Plant architecture is defined as any individual description based on decomposition of the plant into components, specifying their biological type and/or their shape, and/or their location/orientation in space and/or the way these components are physically related one with another. The aim of this work was to initiate the search on the important parameters for the architectural analysis of *Coffea arabica* plants and modeling the construction of their 3D mock-ups for the future ecophysiological simulations. Based on some field measured parameters (orthotropic trunk height, total number of internodes on trunk, position and length of primary plagiotropic branches, positions of 2nd to 4th order plagiotropic branches, total internode number on plagiotropic branches of 1st to 4th order, number of green internodes and leaf pares) and on various assumptions, the plants were codified and reconstructed using VPlants and represented in PlantGLViewer. The leaf area index (LAI) was computed from the mock-ups in VegeSTAR, for the coffee plants (cv. IAPAR 59) cultivated under different plant densities and space dispositions. The IAF was superior for rectangular than for quadrate plantation arrange on plantation density of 10000 plants ha⁻¹. In construction of the present structural model was shown the necessity to collect, apply and correlate more precise parameters (*i. e.* each internode length, individual leaf area, branch and leaf insertion angles) during the development of vegetative and reproductive entities.

Key words: *Coffea arabica*, LAI, plant architecture, VegeSTAR, VPlants.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento nas ciências de computação e análises de imagens estimulou as pesquisas sobre arquitetura vegetal, as quais foram intensificadas a partir do final da década de 80. Com base no princípio de que a planta é composta por entidades de diferentes tipos, tamanhos e formas (Barthélémy, 1991), a arquitetura vegetal foi definida como qualquer descrição individual baseada na decomposição de plantas em componentes, especificando o seu tipo biológico e/ou sua forma e/ou sua localização/orientação no espaço e/ou a maneira como eles são fisicamente relacionados uns com os outros (Godin, 2000). Ela depende da natureza e do relativo arranjo de cada um dos seus componentes, o que, em cada momento, depende da expressão do equilíbrio entre os processos endógenos de crescimento e de adversidades externas produzidas pelo ambiente. Neste sentido, o objetivo geral da análise arquitetural é contribuir na identificação e na compreensão dos processos endógenos, separando-os da sua expressão de plasticidade, como resultado de influências externas (Barthélémy & Caraglio, 2007). As tendências atuais na arquitetura de espécies arbóreas buscam metodologias para descrever tratos arquiteturais de modo qualitativo de descendentes (Segura *et al.*, 2006).

Tratando os cafés como objeto deste congresso, é interessante enfatizar que os primeiros estudos sobre a arquitetura vegetal foram feitos com café robusta (Reffye, 1981, 1982). A arquitetura vegetal de café arábica é definida pelo modelo de Roux (Halle *et al.*, 1978), que descreve o seu padrão de ramificação, longevidade de ramificações e posição de inflorescências. Uma das especificidades do modelo arquitetural de Roux é a existência de dimorfismo de ramos. O tronco principal é ortotrópico, ereto e radial, com folhas opostas e entrenós de comprimento regular. Cada par de folhas no ortotrópico encontra-se em situação cruzada com o par inferior, que resulta em filotaxia oposta, cruzada ou decussada. Os ramos laterais são plagiotrópicos, e partem do ramo principal com ângulo relativo médio de 42° a 44° (Orosco, 1977) e com a idade tomam uma posição horizontal em função do aumento de peso proporcionado pelo crescimento em comprimento, número de folhas, ramificação e produção. Os ramos plagiotrópicos de *Coffea arabica* também têm um padrão ortogonal – decussado de iniciação de pares de folhas, porém, as torções de internódios e de ângulo dos pecíolos reorientam as folhas, o que resulta em ramos com simetria dorsiventral (Dengler, 1999). As ramificações de primeira ordem são de grande longevidade. Nos ramos de primeira ordem apresentam-se as ramificações (de 2ª, 3ª e 4ª ordem) da forma achatada.

O conhecimento de construção da arquitetura de plantas de café é, até o momento, baseado em trabalhos efetuados na modelagem do crescimento e na mortalidade dos meristemas ortotrópicos e plagiotrópicos do cafeeiro robusta, por processos aleatórios (Reffye, 1981), e na probabilidade de distribuição e agrupamento de ramificações secundárias (Reffye, 1982). Posteriormente foi analisado o ideotipo produtivo de ramos plagiotrópicos de café robusta (Cilas *et al.*, 2006). Devido à necessidade de se conhecer os padrões de desenvolvimento de plantas de café arábica, este trabalho teve como objetivo iniciar a busca de parâmetros importantes na análise arquitetural de café arábica, e construir suas maquetes para futuras simulações ecofisiológicas.

MATERIAL E MÉTODOS

A extração de informações para compreender o funcionamento de plantas foi efetuada usando VPlants (seguidor de AMAPmod), na plataforma ALEA (Pradal *et al.*, 2004), disponível gratuitamente no <http://www-sop.inria.fr/virtualplants/wiki/doku.php?id=software>. As medições morfológicas de café arábica foram usadas para codificar as plantas e preparar os MTG's (*Multiscale Trees Graphs*, ou grafos multi-escalares em árvores) adequados. O MTG apresenta um objeto matemático que traduz a estrutura básica de dados utilizada para a representação arquitetural de uma planta em VPlants (AMAPmod). Todos os dados coletados de uma planta real são inseridos no MTG (por exemplo: todas as ramificações, comprimento e ângulos dos galhos, posição de folhas, frutos), para depois serem lidos no programa AMAPmod na análise topológica e/ou geométrica.

O ensaio de arranjo cafeeiros foi realizado 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 recepidas com idade de cinco anos.

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro repetições e parcelas de 60m² (10m x 6m). O experimento foi constituído de diversos arranjos de plantas no espaço, 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 foram escolhidos os seis tratamentos mais distintos: 14000 plantas ha⁻¹ em arranjo quadrangular **T1** (0,84 x 0,84 m) e retangular **T4** (2,00 x 0,35 m); 10000 plantas ha⁻¹ em arranjo quadrangular **T10** (1,00 x 1,00 m) e retangular **T14** (3,00 x 0,33 m); 6000 plantas ha⁻¹ com arranjo quadrangular **T20** (1,29 x 1,29 m) e retangular **T24** (3,00 x 0,55 m).

Para cada um dos seis tratamentos analisou-se, no ano 2007, 2 a 5 plantas. Os parâmetros morfológicos analisados foram: altura do tronco ortotrópico, diâmetro da projeção da planta no solo, número total de entrenós do tronco, posição do ramo primário plagiotrópico, comprimento de ramos plagiotrópicos de 1ª ordem, posição de ramos secundários, terciários e quaternários, número total de entrenós de ramos plagiotrópicos primários a quaternários, número de frutos em cada nó, número de entrenós verdes e de pares de folhas.

As maquetes foliares foram compiladas em PlantGLViewer e exportadas para os cálculos de interceptação e fotossíntese no software VegeSTAR (Adam *et al.*, 2006, disponível gratuitamente no <http://www2.clermont.inra.fr/piaf/fr/telechargement/telecharger.php>), onde foi calculada a área foliar de cada planta (AFP em m²) e o índice de área foliar (IAF) de cada tratamento. A análise estatística foi feita no software livre R (versão 2.8.1.) de ANOVA do modelo repetitivo (lme). A variância na figura está apresentada pelo erro de médias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A representação espacial de plantas pode-se realizar em diferentes níveis de detalhamento, que varia desde a precisa descrição de cada órgão (folha, metâmero...), até a vestimenta englobada de sistemas de ramificação no nível de plantas inteiras (Godin & Sinoquet, 2005). Apesar da quantidade de informações relativamente limitada sobre o desenvolvimento de entidades vegetais do cafeeiro, construíram-se maquetes no nível de metâmeros, porém com diversas premissas, devido à falta de precisão.

As plantas codificadas foram compiladas no VPlants e representadas em PlantGLViewer. Como vestimenta geométrica de tronco e caules usaram-se cilindros (com cinco ângulos, a partir de biblioteca SMB, Figura 1A). Com comandos disponibilizados para a reconstrução geométrica construiu-se a folha individual de café com 121 polígonos

(Figura 1B). O fruto foi construído a partir de uma esfera ovóide com o pecíolo (Figura 1C). Os elementos foram ajustados para o comprimento/largura/diâmetro de 1 cm, para se obter os atributos relativos.

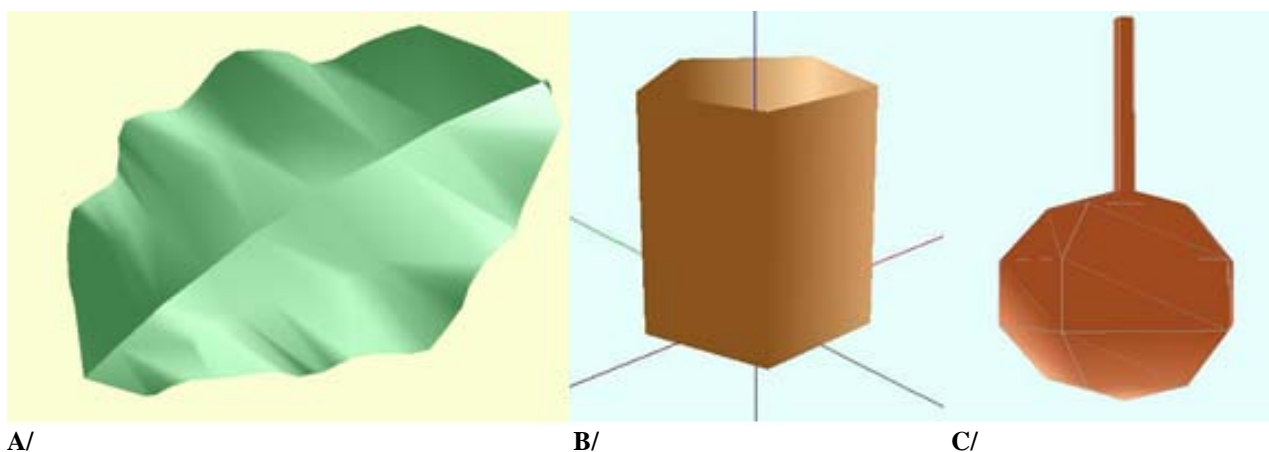


Figura 1: A/ Folha construída em GEOM, B/ Ramo de biblioteca SMB e C/ Fruto construído em GEOM para reconstruções em 3D de plantas inteiras de café.

Os MTG's foram codificados com três escalas de decomposição para as plantas adultas do café: 1/ planta (P); 2 ramos (G); 3/ entrenós (O – pertencente ao tronco ortotrópico e E – nos ramos plagiotrópicos). A modelagem sempre compreende certo grau de simplificação de realidade, o que depende do conhecimento atual, objetivos de modelagem e simulação, e de ferramentas disponíveis (Zeigler *et al.*, 2000). Devido a falta de informações relacionadas à qualidade de cada metâmero, posição e tamanho de folhas, ou inclinação de ramo, foram assumidas as seguintes premissas:

1/ O comprimento de cada entrenó do tronco foi obtido pela divisão do comprimento do tronco pelo número de seus entrenós. Para o último entrenó atribuiu-se o valor de 0,2cm.

2/ Para a reconstrução dos comprimentos de ramos primários até quaternários usaram-se os comprimentos de entrenós do ramo ancestral multiplicados pela constante 0.7 (reduzindo o comprimento dos ramos laterais, sempre que maior é a ordem de ramificação). Esta suposição não foi considerada para os três últimos entrenós, permanecendo estes com 1,0 cm, 0,7 cm e 0,2 cm;

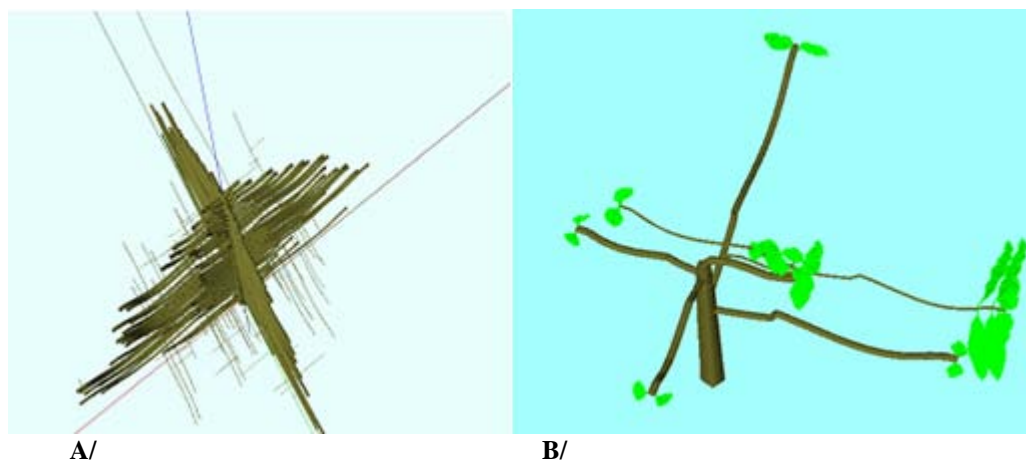


Figura 2. Reconstrução de A/ “esqueleto” de ramos para uma planta de café, aplicando as curvas de Beziér e inclinações de 80 – 35°, no sentido de baixo para acima das plantas; B/ da parte inferior do cafeeiro com as folhas presentes somente nos últimos nós verdes.

3/ A inclinação para os ramos primários foi definida em dez níveis (relativa ao tronco), começando em 80° (os galhos plagiotrópicos mais perto do solo) e atingindo até 35° (os galhos plagiotrópicos do topo da planta). Os ramos de cada ordem de ramificação podem obter a forma mais natural seguindo a curva de Bézier, ou a curva polinomial expressa como combinação baricêntrica de alguns pontos representativos, chamados de pontos de controle. Para as plantas de café criaram-se curvas com dez pontos de controle, porém, mais pontos podem ser utilizados, com mais sutileza, a fim de se obter curvaturas mais naturais. Com a inclusão de ramos “falsos” (de comprimento infinitamente curto, de 0,001 cm) conseguiu-se a alteração de aparecimento de ramos primários cruzados (Figura 2A). Para os ramos secundários – quaternários, a inclinação relativa ao galho suporte foi definida sempre com 90°;

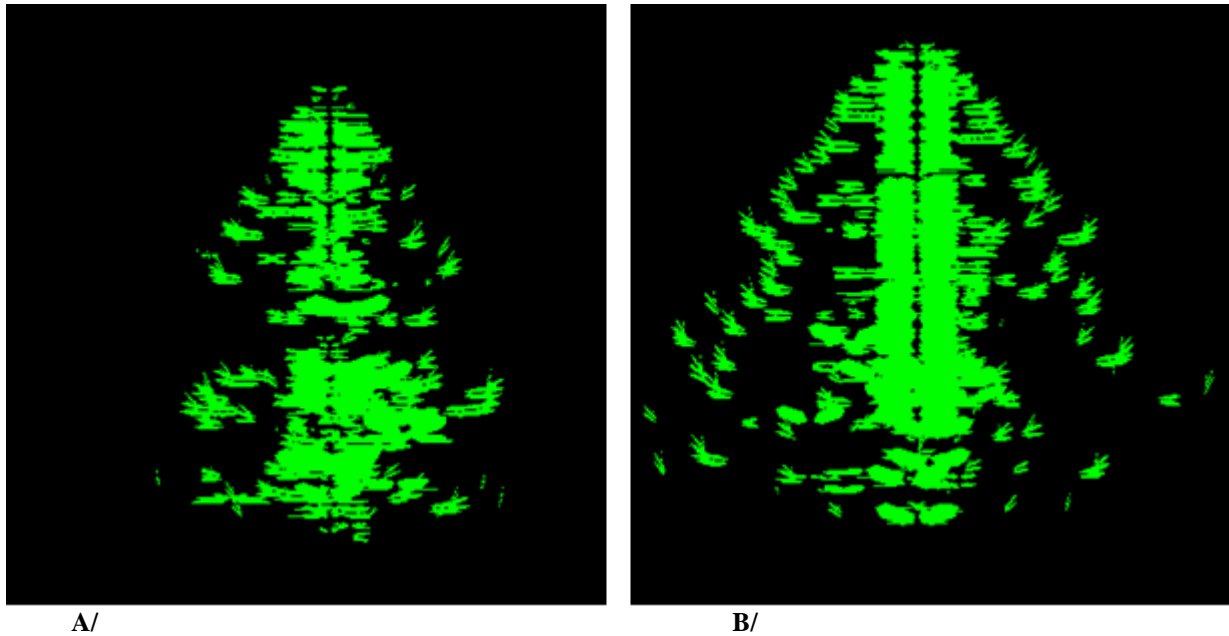


Figura 3. Maquetes de folhagem de cafeeiros reconstruídos para 10000 plantas ha^{-1} visualizados em PlantGLViewer. A/ arranjo quadrangular – T10 e B/ arranjo retangular (T14).

4/ Devido a atribuição do tamanho de cada folha individual, sem se conhecer a sua posição exata, assumiu-se que as folhas sempre estavam presentes em pares, e que todas apresentavam o mesmo tamanho ($87,75cm^2$). Foi atribuído o tamanho menor somente para o último par no ramo ortotrópico (O) ou para os três últimos pares de folhas nos plagiotrópicos (E), com 60 , 15 e $4,5cm^2$ respectivamente. Também, assumiu-se que todas as folhas pertenciam somente aos nós verdes, mais recentemente emitidos em cada ramo. Uma ilustração da reconstrução da parte inferior do cafeeiro está apresentada na Figura 2B.

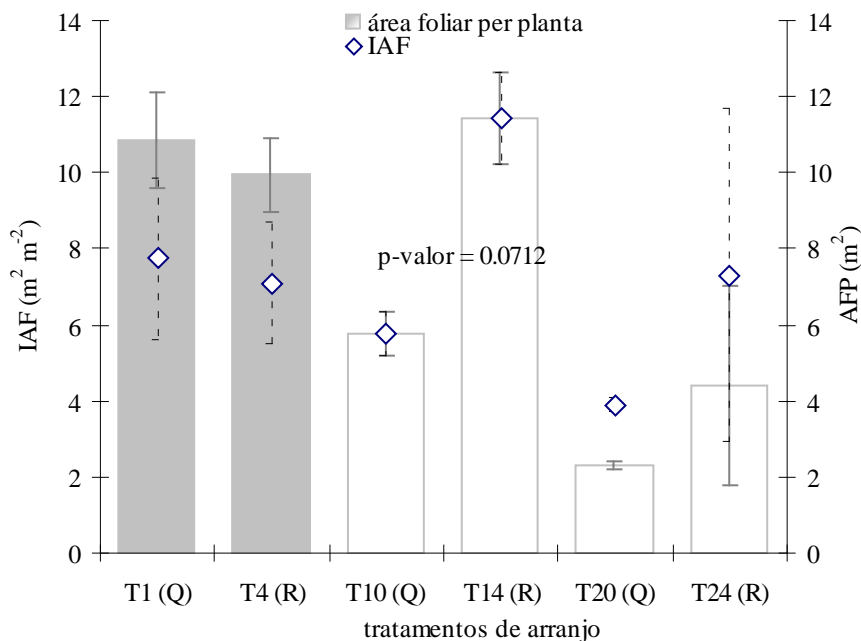


Figura 4. Índice de área foliar (IAF) e área foliar per planta (AFP) compilados em VPlants e VegeSTAR para as densidades 14000 (T1 e T4), 10000 (T10 e T14) e 6000 (T20 e T24) plantas ha^{-1} , de arranjo quadrangular (Q) até retangular (R). O p-valor representado é relativo à análise dos arranjos T10(R) e T14(Q) da densidade 10000 plantas ha^{-1} .

As maquetes de folhagem foram importadas de PlantGLViewer e processadas no VegeSTAR no intuito de compilar a área foliar (Figura 3). Devido à disponibilidade de um número relativamente reduzido de maquetes (2-5 repetições por tratamento) e somente uma avaliação temporal, o IAF e a AFP manifestaram variação muito grande, de maneira que esses parâmetros não foram significativos com a modificação do arranjo (quadrangular vs. retangular) e densidades (Figura 4). Na Figura 4 está representado somente o p-valor relacionado aos parâmetros de folhagem na

densidade 10000 plantas ha⁻¹. Isso se deve ao fato de que o arranjo quadrangular de plantio proporciona menor área foliar por planta e LAI, quando comparado ao arranjo retangular desta densidade, onde os valores absolutos variaram menos em relação as outras densidades.

O fato que mais atrai atenção na análise efetuada é que AFP e IAF apresentaram valores superiores no arranjo retangular na densidade 10000 plantas ha⁻¹, porém, os resultados das pesquisas prévias mostraram uma maior produção de grão de café quando o arranjo da disposição das plantas foi quadrangular (Androcioli Filho *et al.*, 2002). As maquetes da cv. IAPAR 59 foram reconstruídas para as plantas após sete anos de recepa, que foi realizada em 2000. Para as variedades Mundo Novo e Caturra as altas densidades de plantio podem apresentar elevadas produções nas primeiras safras após a recepa, com acentuado decréscimo após sete colheitas (Toledo & Barros, 1999). Neste sentido, após se obter resultados extremamente variáveis, com as plantas que não invadem o espaço de maneira suficientemente agressiva (densidade 6000 plantas ha⁻¹) da cv. IAPAR 59, acredita-se que os cafeeiros devem ser submetidos a nova recepa, para rejuvenescer o cafezal e aumentar a sua capacidade de ocupação de espaço.

CONCLUSÕES

Devido à estreita relação biológica entre a área foliar e produção de grãos, necessita-se de uma análise mais detalhada da correlação entre distribuição de frutos e crescimento de plantas, considerando o desenvolvimento vegetal, ou seja, com análise em uma escala espaço-temporal mais ampla. Em futura análise arquitetural, usando o protocolo que estamos desenvolvendo neste modelo estrutural de cafeeiro adulto, será necessário coletar, analisar e correlacionar parâmetros mais precisos (*i.e.* comprimento de cada entrenó no tronco ortotrópico e nos ramos plagiotrópicos, tamanho exato de folhas, de inserção de ramos e de folhas) ao longo do desenvolvimento de formas vegetais (ramos plagiotrópicos e folhagem) e reprodutivas (distribuição de frutos), no entendimento das leis endógenas e do impacto do ambiente na construção das formas de cafeeiro.

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.
- BARTHÉLÉMY, D. Levels of organization and repetition phenomena in seeds plants. **Acta Biotheoretica**, Amsterdam, v.39, n.3-4, p.309-323, dez.1991.
- BARTHÉLÉMY, D.; CARAGLIO, Y. Plant architecture: a dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant Form, structure and ontogeny. **Annals of Botany**, Oxford, v.99, n.3, p.375-407, mar. 2007.
- 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.
- COSTES, E.; GUÉDON Y. Modelling branching patterns on 1-year-old trunks of six apple cultivars. **Annals of Botany**, Oxford, v.89, n.5, p.513-524, maio 2002.
- DENGLER N. G. Anisophylly and dorsiventral shoot symmetry. **International Journal of Plant Sciences**, Chicago, v.160, n.S6, p.67-80, nov. 1999.
- GODIN, C. Representing and encoding plant architecture: a review. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, France, v.57, n.5, p.413-438, jun. 2000.
- GODIN, C.; SINOQUET, H. Functional-structural plant modelling. **New Phytologist**, Oxford, v. 166, n. 3, p. 705-708, jun. 2005.
- HALLÉ, F.; OLDEMAN, R.A.A.; TOMLINSON, P.B. **Tropical trees and forests - An Architectural Analysis.** Berlin: Springer-Verlag. 1978, 441p.
- OROZCO C., F.J. Estudio genético del carácter erecta en plantas de la variedad caturra de *C. arabica*. **Cenicafé**. v. 28, n. 3, p. 75-81, jul./sept. 1977.
- 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.
- REFFYE, P. de. Modèle mathématique aléatoire et simulation de la croissance et de l'architecture du caféier Robusta. III. Étude de la ramification sylleptique des rameaux primaires et de la ramification proleptique des rameaux secondaires. **Café, Cacao, Thé**, Paris, n.26, v.2, p.77-96, 1982.
- SEGURA, V.; CILAS, C.; LAURENS, F.; COSTES, E. Phenotyping progenies for complex architectural traits: a strategy for 1-year-old apple trees (*Malus x domestica* Borkh.). **Tree Genetics & Genomes**. v. 2, n. 3, p. 140-151, jul. 2006.

TOLEDO, S. V. de; BARROS, I. de. Influência da densidade de plantio e sistema de podas na produção de café. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.34, n.8, p.1379-1384, ago. 1999.

ZEIGLER, B. P.; PRAEHOFER, H.; KIM, T. G. **Theory of modeling and simulation: integrating discrete event and continuous complex dynamic systems**. Academic Press, 2nd edition, 2000, 510p.