

COEFICIENTE DE EXTINÇÃO CALCULADO A PARTIR DAS RECONSTRUÇÕES 3D DE ACESSÃO ‘E083’ DE CAFEIROS CULTIVADOS SOB DOIS REGIMES HÍDRICOS¹

Miroslava Rakocevic^{2,3}, Ricardo Antônio Almeida Pazianotto³, Fabio Takeshi Matsunaga⁴

¹ Trabalho financiado pelo Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café – Consórcio Pesquisa Café

² Pesquisador, PhD, Bolsista Consórcio Pesquisa Café, Embrapa Informática, Campinas-SP, miroslava.rakocevic@colaborador.embrapa.br

³ Analista, MS, Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna-SP, ricardo.pazianotto@embrapa.br

⁴ Professor, MS, Faculdade da Indústria – SENAI, Londrina-PR, fabio.matsunaga@sistemafiep.org.br

RESUMO: Hipótese deste trabalho foi que o regime hídrico pode modificar a arquitetura de plantas, modificando inclinação foliar (λ) e diminuindo índice de área foliar (IAF) no regime hídrico de campo (NI) comparado ao regime irrigado (IRR), o que pode influenciar no coeficiente de extinção de luz (k) que pode variar ao longo de crescimento de cafeeiros. Objetivou-se calcular azimute foliar, λ , área individual foliar (AFI), IAF e k de dossel de uma acessão de cafeeiros de Etiópia, ‘E083’, considerando alguns estágios fenológicos, usando maquetes 3D de plantas. A tendência geral de distribuição de λ foi plagiófila, porém as plantas NI, apresentaram o λ médio maior do que as IRR, o que pode explicar a tendência de evitar a dissipação de energia sob alta irradiância, já que os estresses abióticos foram múltiplos. As plantas NI apresentaram IAF muito menor do IRR, na faixa de diferenciação entre 2.5-3 vezes. A AFI mostrou um constante aumento entre cinco fenofases; em plantas IRR, a AFI média cresceu de 18.9 a 29.5 cm², enquanto nas plantas NI de 15.2 a 27.7 cm². O aumento na AFI devia-se ao aumento de número de folhas de ordens de ramificação superiores, sombreadas e formadas com AFI maior. k de radiação direta mostrou-se maior em plantas NI de que IRR durante fenofase de expansão de frutos e folhas de 2º ano produtivo. Maior k mostrou-se em fenofases que privilegiavam o crescimento vegetativo (expansão de área foliar e frutos) do que o reprodutivo (maturação de frutos e colheita). Nosso trabalho mostrou que algumas respostas morfológicas, como são variações na AFI e inclinação das folhas, têm grande valor para aclimação à alta irradiância e pouca disponibilidade de água.

PALAVRAS-CHAVE: ângulo de elevação, ângulo azimutal, área foliar individual, IAF, VPlants.

EXTINCTION COEFFICIENT CALCULATED FROM 3D MOCK-UPS OF COFFEE ‘E083’ ACCESSION CULTIVATED UNDER TWO WATER REGIMES

ABSTRACT: Hypothesis of this work was that the water regime can modify the plant architecture, modifying leaf elevation (λ) and decreasing leaf area index (LAI) in plants cultivated under the rainfed water regime (NI) compared to the irrigated ones (IRR), which may influence the light extinction coefficient (k) which may vary during coffee growth. The objective was to calculate leaf azimuth, λ , individual leaf area (ILA), LAI and canopy k using 3D plant models of an Ethiopian coffee accession, ‘E083’, considering some phenological stages. The general distribution tendency of λ was plagiophile. The NI plants formed higher average λ than the IRR ones, which may explain the tendency to avoid energy dissipation under high irradiance, since abiotic stresses were multiple. The NI plants presented much lower LAI than IRR ones, in a range of 2.5-3 times. ILA showed a steady increase among five phenophases; in IRR plants, the average ILA increased from 18.9 to 29.5 cm², while in NI plants from 15.2 to 27.7 cm². The increase in ILA was due to the increased number of high branching order leafy shoots, which were shaded and formed leaves of high ILA. k for the direct radiation was higher in NI plants than IRR during fruit and leaf expansion phenophase in 2012-13. Higher k was shown in phenophases that favored vegetative growth (leaf area and fruit expansion) than in those focused in reproductive growth (fruit maturation and harvesting). Our work showed that some morphological responses, as variations in ILA and leaf inclination, had great value for acclimation to high irradiance and low water availability.

KEY WORDS: azimuthal angle, elevation angle, individual leaf area, LAI, VPlants.

INTRODUÇÃO

A quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) que atinge folhas no perfil vertical e horizontal vegetal é extremamente variável. Para expressar a quantidade de folhas, usa-se o índice de área foliar (LAI, IAF em português) que é a área foliar unilateral por unidade de área do solo (m² m⁻²), ou a densidade de área foliar (LAD, DAF em português) que é a área foliar unilateral total por unidade de volume. IAF e DAF podem ser medidos, ou estimados com uso de várias novas técnicas, tais como reconstruções 3D (Rakocevic et al., 2011) ou até de tecnologia óptica de detecção remota que mede propriedades da luz refletida de modo a obter a distância e/ou outra informação a respeito de um determinado objeto distante - LIDAR (Oshio et al., 2015).

A quantidade de luz solar diminui, a medida que a luz penetra pelas camadas da vegetação, porque a quantidade de área foliar acumulativa aumenta, o que é expresso pela lei de Beer-Lambert:

$$(I_h = I_0 \cdot e^{-LAI \cdot k}) \quad (1)$$

Na equação (1), h apresenta a altura vertical no dossel em m, i.e. $h = 2$ significa 2 m acima do solo; I_0 apresenta a PAR que chega acima de dossel, I_h apresenta a intensidade de luz alcançando a posição vertical h no dossel; ‘e’ é o logaritmo natural; LAI_h = índice de área foliar cumulativa acima da altura h . A lei Beer-Lambert, aplicada no dossel vegetal, mostra que a quantidade de luz diminui exponencialmente movendo-se de cima para baixo do dossel. O coeficiente k refere-se à capacidade da substância absorver a radiação luminosa, i.e., as substâncias opacas absorvem luz (luz extinta) e têm um alto coeficiente de extinção o qual pode ser calculado resolvendo-se a equação 1:

$$k = -\ln(I/I_0)/LAI \quad (2)$$

O k apresenta a área de sombra projetada pelo dossel em uma superfície plana horizontal dividida pela área de folhas no dossel (Monteith, 1975) – equação 2. No dossel vegetal, além de características de absorção, o k também está influenciado pela estrutura foliar definida por: a) distribuição espacial de área foliar, b) orientação de folhas (ângulos foliares) e c) arranjo espacial de folhas em relação a outras, ou seja, dispersão foliar (Sinoquet & Andrieu, 1993). As informações sobre a estrutura do dossel podem ser obtidas medindo a área, os ângulos ou as posições dos órgãos (Campbell, 1990). Para descrever o dossel, além de medições diretas, existem os métodos indiretos que permitem estimar a estrutura do dossel na base teórica da transferência de radiação através do processo de inversão matemática (Campbell, 1990). A maioria dos dosséis têm uma distribuição de folhas que se aproxima da simetria azimutal e, adicionalmente, podem caracterizar-se pela distribuição de frequências acumuladas dos ângulos foliares (Goudriaan, 1988).

Foram definidos quatro padrões de distribuições foliares que descrevem as tendências geométricas da folhagem vegetal: planófila (arranjo das folhas é principalmente horizontal, com a maior frequência entre 0-30°), erectófila (arranjo das folhas é predominantemente vertical, com a maior frequência entre 61-90°), plagiófila (arranjo das tem sua maior frequência entre 31-60°) e extremófila (existem dois picos de ângulos de inclinação foliar que se encontram a 0° e 90°) - (Goudriaan, 1988, Fig. 1). A suposição de valor constante k e a insuficiência de medições ou estimativas da dinâmica do seu valor podem levar a estimativas incorretas de IAF ou interceptação relativa a uma parte ou todo o período de crescimento (Saitoh et al., 2012).

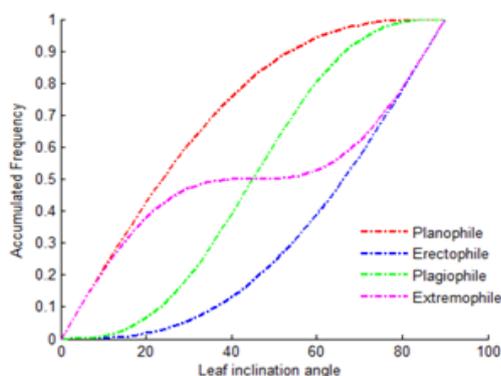


Fig. 1. Frequências teóricas acumuladas de inclinação foliar pelas classes de 10°: planófila, erectófila, plagiófila e extremófila (Goudriaan, 1988).

O valor de k muda em função do ângulo azimutal (Ma et al., 2017). Girar uma folha horizontalmente não tem efeito sobre as estimativas de k , já que ela não alterará a área interceptada de luz efetiva. A descrição de estrutura do dossel vegetal é essencial para a compreensão dos processos associados à radiação solar e a interação entre dossel e radiação. A idade da planta modifica a estrutura vegetal, apresentada por estruturas foliares e de ramos (Niinemets, 2010) e, neste sentido, a descrição geométrica quantitativa do dossel se torna mais complexa, causada pela variabilidade espacial e temporal (Campbell, 1990).

As plantas de *Coffea arabica* são caracterizadas por dimorfismo arquitetural, definido pelo modelo de Roux (Hallé et al., 1978). Elas têm dois tipos de ramos estruturalmente e fisiologicamente diferenciados, o ramo ortotrópico de primeira ordem e os ramos laterais plagiotrópicos, de 2ª a 5ª ordem. Até hoje foram realizados cálculos de inclinações de ramos e de folhas, a partir de informações reais em cafeeiros. O ângulo de inclinação dos ramos com o tronco principal define a variedade do café Arabica ‘Caturra’ como distribuição planófila (Castillo et al., 1996), com predominância de inclinações entre 0 e 30°. Na análise de genótipos cultivados na Colômbia, a maioria daqueles de porte alto apresenta distribuição azimutal esférica e distribuição foliar plagiófila, enquanto os genótipos de porte baixo são de distribuição foliar planófila (Unigarro et al., 2016). Quanto ao ângulo de inclinação dos ramos, a distribuição planófila é predominante nos genótipos de alto e baixo porte, exceção somente a acessão de Etiópia alta (E070) que apresenta distribuição erectófila. Finalmente, em cafeeiros Arábica os cálculos de k são realizadas com base nas inclinações foliares para diversos genótipos em Colômbia.

Os efeitos de déficit hídrico e idade de plantas sobre distribuição de ângulos foliares e do valor k ainda não são conhecidos em café Arábica. A hipótese deste trabalho foi que o regime hídrico pode modificar a arquitetura de plantas, modificando a inclinação foliar e diminuindo IAF no regime hídrico de campo comparado ao regime irrigado, o que pode influenciar na modificação de k , o qual pode variar ao longo do crescimento de cafeeiros. Para testar isso, objetivou-se calcular a azimute e inclinação foliar, área individual foliar, IAF e k de dossel de uma acessão de cafeeiros de Etiópia, ‘E083’, considerando alguns estágios fenológicos durante os primeiros dois anos de produção, usando maquetes 3D de plantas.

MATERIAL E MÉTODOS

Mudas de cafeeiros foram plantadas em 2010 nos campos experimentais do IAPAR, Londrina (-23° 18' 37" S, 51° 09' 46" W, 585 m altitude), Paraná (mais detalhes em Rakocevic & Matsunaga nestes anais). O experimento renovado com acessões de Etiópia foi estabelecido com quatro plantas por cada acessão e tratamento hídrico. Escolheu-se acessão 'E083', caracterizada por folhas alongadas, muita floração e frutos, além de poucas ramificações de terceira e quarta ordem nos anos iniciais. O experimento terminou no fim de julho de 2013, devido a uma geada 'preta' da qual raros indivíduos sobreviveram dentre cerca de 100 acessões avaliadas. Entre os sobreviventes restaram quatro plantas IRR de acessão 'E083'. Entre as plantas NI de 'E083', uma morreu pós o inverno seco de 2012 e todas as outras após a geada de 2013.

A codificação topológica e geométrica de cafeeiros foi realizada em três escalas botânicas – metâmeros, galhos e plantas (Rakocevic & Androciolo-Filho, 2010). As informações foram guardadas em grafos em árvores multiescalares – MTGs (Godin & Caraglio, 1998). Os eixos ortotrópicos são sempre descritos na escala de metâmeros, coletando um número máximo de variáveis: diâmetro apical e basal; comprimento de cada metâmero; tamanho, inclinação (λ , °) e orientação preferencial cardeal das folhas (Norte, Sul, Leste e Oeste); posição, orientação e comprimento total de ramos plagiotrópicos inseridos no eixo ortotrópico. Quatro galhos plagiotrópicos de segunda ordem foram amostrados (Matsunaga et al., 2016), um para cada ponto cardinal, representando cada estrato de espessura de 40 cm do perfil vertical da planta acima do tronco. Os ramos plagiotrópicos amostrados foram descritos em detalhes seguindo a mesma lógica de ramos ortotrópico (mais detalhes em Rakocevic & Matsunaga nestes anais). As plantas foram reconstruídas pela metodologia VPlants, visualizadas em PlantGLViewer (Pradal et al., 2009) e exportadas para o VegeSTAR, um software que permite o cálculo da área foliar e o cálculo da interceptação de luz e fotossíntese (Adam et al., 2006).

A codificação de plantas foi efetuada em cinco períodos que corresponderam às seguintes fases fenológicas de cafeeiros (Camargo & Camargo, 2001), focadas na produção de frutos: 1) expansão de área folia e de frutos durante dias longos, fim de dezembro 2011 - início de janeiro 2012 (FE-11-12), 2) maturação de frutos de primeira produção, no início de dias curtos abril em maio - maio 2012 (FM-12), 3) maturação e coleta de frutos de primeira produção em julho - agosto 2012 durante os dias curtos quando ocorre indução, crescimento e dormência de gemas florais, além de emissão de folhas pequenas de vida curta (FH-12), 4) expansão de área folia e de frutos durante dias longos, dezembro 2012 início de janeiro de 2013, quando ocorreu formação de chumbinhos e a expansão dos frutos de segunda produção (FE-12-13) e 5) maturação e coleta de frutos de segunda produção junho - julho de 2013 (FH-13).

Cada folha foi construída por 16 triângulos (Rakocevic & Androciolo-Filho, 2010). As inclinações foliares foram extraídas de arquivos relativos às folhas em 3D, resultado do processamento em VPlants, Amostra3DCafe (Matsunaga et al., 2016) e VegeSTAR, com índice 'vgx'. Neles, cada linha apresenta um triangulo foliar, considerando vetor de nervo principal formado para cada folha pelo seu ponto inicial (x_1, y_1, z_1) e ponteira foliar no ponto 9 (x_9, y_9, z_9). Em cafeeiros, muitas folhas foram inclinadas com $\lambda < 0^\circ$. Por isso, os valores α foram transformados em absolutos (0-90°). O azimute foliar apresenta valores entre 0 e 360°, começando por Norte ($x+$ corresponde a 0°) e girando no sentido anti-horário, tendo $y+$ no Oeste caracterizando 90°. Orientação azimutal considerou o mesmo vetor de λ foliar. Para cada folha foi calculada a área individual foliar (cm²). Durante a codificação, no intuito de verificar vivacidade e mortalidade de ramos, foram codificadas as gemas terminais, usando valores virtuais de comprimento e largura de 0.1 cm e λ de 0°. Nos cálculos angulares e de área foliar, as gemas foram excluídas, já que a sua superfície foi infinitivamente pequena e a sua presença ia distorcer o dimensionamento médio foliar real.

Em cálculos de k teórico (k') foi usada metodologia já aplicada em cafeeiros Arábica (Unigarro et al., 2016). Em cada árvore calculou-se o número de folhas horizontais, com a inclinação $< 45^\circ$ (N_h), e verticais ($> 45^\circ$, N_v), o que permitiu o cálculo de x , o que o parâmetro de distribuição dos ângulos λ (Campbell, 1990):

$$x = \pi \cdot N_h / 2 \cdot N_v \quad (3)$$

O x tem valor 0.1 - 0.9 para distribuição vertical; está entre 1 e 10 para horizontal; tem valor 1 para uma distribuição esférica. Em cálculos de k teórico (k') e x em cafeeiros Arábica foi usada metodologia que diferencia k' para radiação direta (Campbell, 1986), que deriva o parâmetro x usando a equação (3) e o ângulo zenital θ . Nesta metodologia se assume que todos os elementos do dossel são perfeitamente escuros (corpo preto) e distribuídos aleatoriamente. Variando o ângulo zenital diário para cinco fenofases, obtém-se os coeficientes de extinção para radiação direta (k'_{dir}):

$$k'_{dir} = k(\theta, x) = (x + \tan^2 \theta)^{1/2} / (x + 1.774(x + 1.182)^{-0.733}) \quad (4)$$

Foi realizada ANOVA considerando um experimento inteiramente casualizado e utilizando o software R (R Core Team, 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A λ média foi diferente entre plantas irrigadas e não irrigadas (Fig. 2). As folhas de plantas NI que foram expostas aos diversos períodos de seca, apresentaram λ média por planta maior do que as IRR, exceto na fase de maturação de frutos em 2012. As plantas sob dois regimes hídricos apresentaram a tendência geral de angulação plagiófila pelo λ médio (Fig. 2) e tendo sua maior frequência entre 31-60° (Fig. 3). A distribuição acumulada de λ foi diferente entre plantas IRR e NI com exceção de FM-2012. As plantas NI apresentaram uma constância nos valores de λ (Fig. 2), com a tendência de construção de copas de distribuições erectófilas (Fig. 3, comparar com Fig. 1). Dentro do dossel de cafeeiros adultos, muitas folhas estão parcialmente ou completamente sombreadas. As que se encontram no estrato inferior recebem

apenas 0.5-1.5% da radiação solar que chega acima do dossel (Rakocevic et al., 2019). O ângulo maior em plantas NI do que IRR pode explicar a tendência de evitar a dissipação de energia sob alta irradiância, já que os estresses abióticos foram múltiplos, de alta irradiância e estresse hídrico.

Os λ foliares em três estratos de perfil vertical de variedade Colombiana ‘Castillo’ na classe de ângulos entre 30° a 60° têm as maiores frequências, com valores entre 45 e 50% (Unigarro et al., 2017). A proporção de ângulos entre 30° e 60° em todo o dossel é relativamente igual em toda a árvore predominante nos perfis de dossel médio e superior. A distribuição de inclinação foliar geralmente plagiófila (Fig. 2 e 3) constrói o sombreamento que permite evitar a saturação com irradiações relativamente altas. Cafeeiros são espécie de sombra de floresta úmida e a fotossíntese foliar pode ficar saturada quando a irradiância é na escala de 600 - 700 μmol fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (DaMatta et al., 2007). As copas erectófilas (tendência de cafeeiros sob seca) permitem maior penetração de irradiância de maneira mais uniforme dentro do dossel e, neste sentido, maior λ em plantas NI do que em IRR indica adaptação de evitar a alta irradiância em folhas de estratos superiores, além de maior aproveitamento de luz dentro de copas.im.

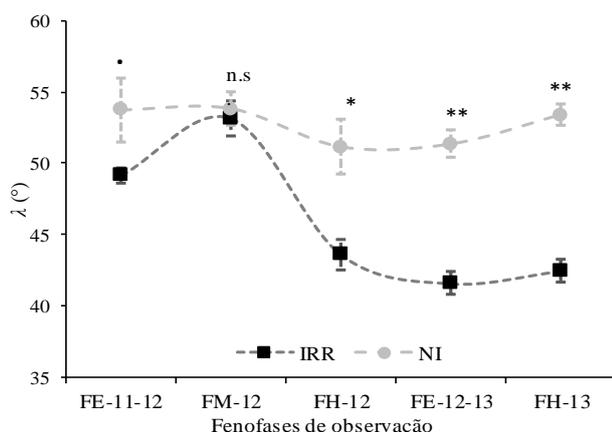


Fig. 2. Média \pm erro padrão de inclinação foliar (λ , °) de plantas de café Arábica, observadas em cinco fenofases: expansão de área foliar e frutos, verão 2011-2012 (FE-11-12), maturação de frutos 2012 (FM-12), fim de coleta de frutos 2012 (FH-12), expansão de área foliar e frutos, verão 2012-2013 (FE-12-13) e fim de coleta de frutos 2013 (FH-13). Plantas foram cultivadas sob irrigação (IRR) e regime hídrico de campo (NI).

As plantas não irrigadas formaram um IAF muito menor do que as IRR (Fig. 4A). A evolução de IAF constantemente privilegiou as plantas irrigadas na faixa de diferenciação entre 2.5-3 vezes. O IAF de plantas NI não crescia significativamente entre as três primeiras observações. A área foliar individual (AFI) tinha o crescimento no tempo de observações, mostrando um constante aumento de ‘E083’ entre a fase FE-11-12 até a FH-13 (Fig. 4B); em plantas IRR, a AFI média cresceu de 18.9 a 29.5 cm^2 , enquanto nas plantas NI de 15.2 a 27.7 cm^2 . No primeiro ano de produção, de FE-11-12 até a coleta de frutos em 2012, a diferenciação de AFI foi significativa entre plantas IRR e NI, porém no início de segundo ano produtivo, na fase FE-2012-13, o tamanho da folha média equalizou entre dois tratamentos hídricos e de novo diferenciou na FH-13 quando as folhas de plantas sob IRR apresentaram-se maiores do que NI. O aumento na AFI deve-se ao aumento do número de folhas de ordens de ramificação superiores (3ª e 4ª), que foram sombreadas e encontraram-se dentro da copa das árvores, atingindo tamanho significativamente maior do que as folhas expostas a luz plena, de 2ª ordem e no início de observações (análises não apresentadas).

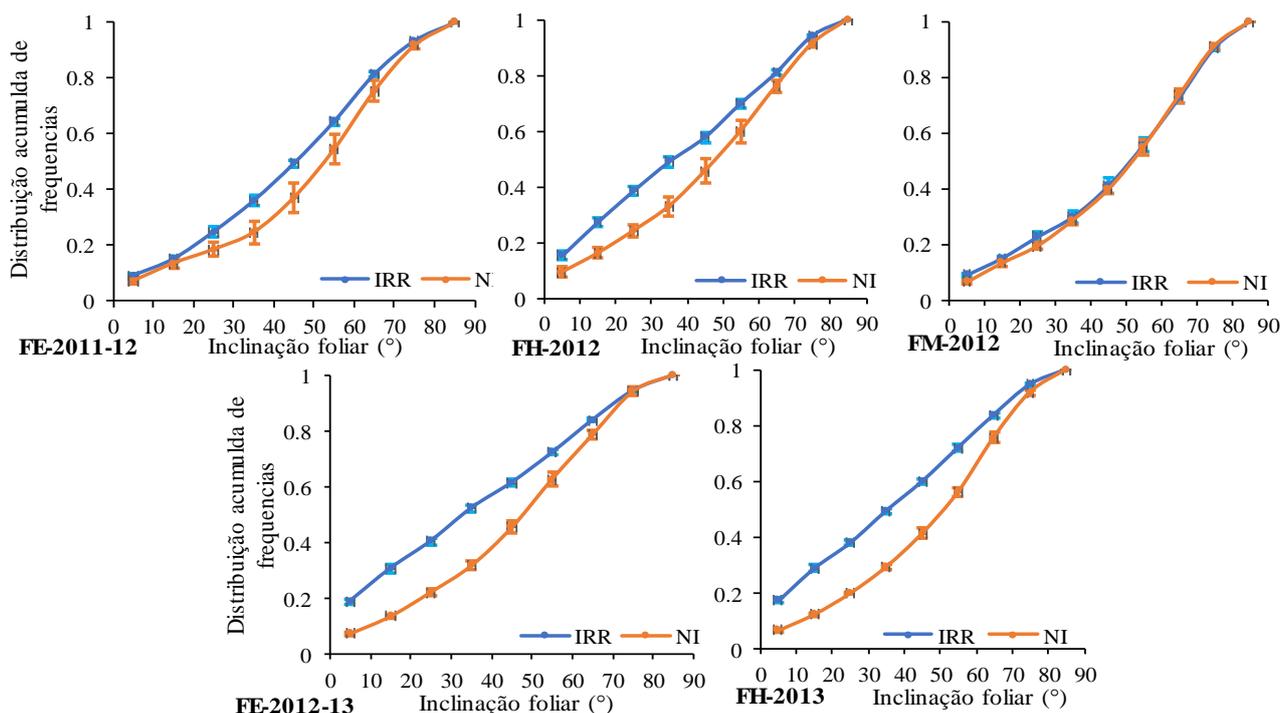


Fig. 3. Média \pm erro padrão de frequência acumulada de inclinação de folhas pelas classes de 10° de plantas de café Arábica, observadas em cinco fenofases: expansão de área foliar e frutos, verão 2011-2012 (FE-11-12), maturação de frutos 2012 (FM-12), fim de coleta de frutos 2012 (FH-12), expansão de área foliar e frutos, verão 2012-2013 (FE-12-13) e fim de coleta de frutos 2013 (FH-13). Plantas foram cultivadas sob irrigação (IRR) e regime hídrico de campo (NI).

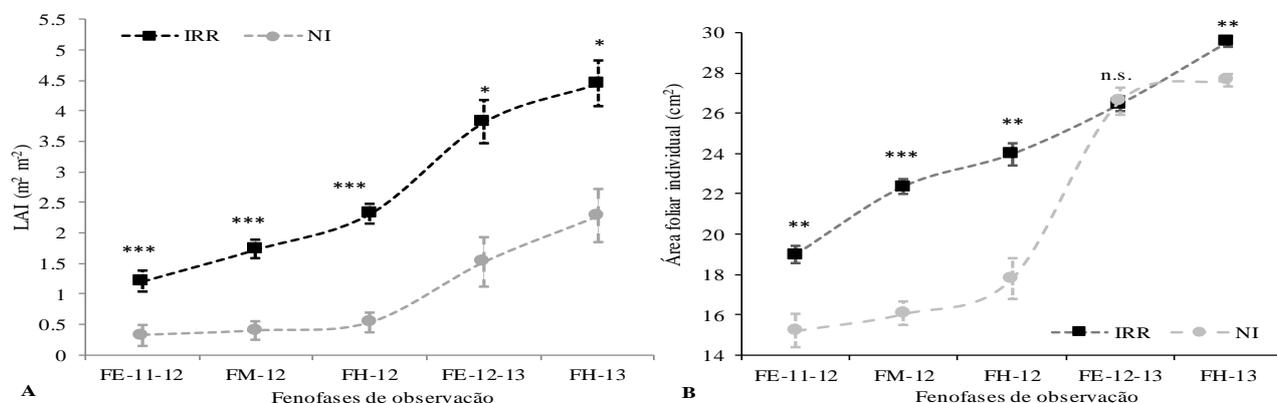


Fig. 4. A/ Índice de área foliar de plantas (IAF ou LAI, $m^2 m^{-2}$) e B/ área de folha individual (AFI, cm^2) observados em cinco fenofases durante primeiros dois anos de produção: expansão de área foliar e frutos, verão 2011-2012 (FE-11-12), maturação de frutos 2012 (FM-12), fim de coleta de frutos 2012 (FH-12), expansão de área foliar e frutos, verão 2012-2013 (FE-12-13) e fim de coleta de frutos 2013 (FH-13). Plantas foram cultivadas sob irrigação (IRR) e regime hídrico de campo (NI).

As folhas foram distribuídas em todos os ângulos azimutais no dossel, em todas as fenofases observadas (Fig. 5), inclinando para os pontos cardiais (0° , 90° , 180° e 270°), já que foram codificadas por método que registra a sua presença nestas quatro situações. A distribuição azimutal equilibrada permitiu o cálculo de coeficiente k' (Tabela 1). O k' de radiação direta foi calculado para θ médio diário. Ele foi maior em fenofases de crescimento predominante vegetativo e mostrou-se diferenciado entre dois regimes hídricos de cultivo de cafeeiros na fenofase FE-12-13 (Tabela 1), sendo maior em plantas NI do que IRR. Coeficiente k' de cafeeiros Colombianos de porte baixo o valor de k' foi estimado entre 0.84 a 0.92 para a radiação direta, enquanto de porte alto é estimado entre 0.63 a 0.86 considerando a radiação direta (Unigarro et al., 2016), o que corresponde aos valores de 'E083' (Tabela 1).

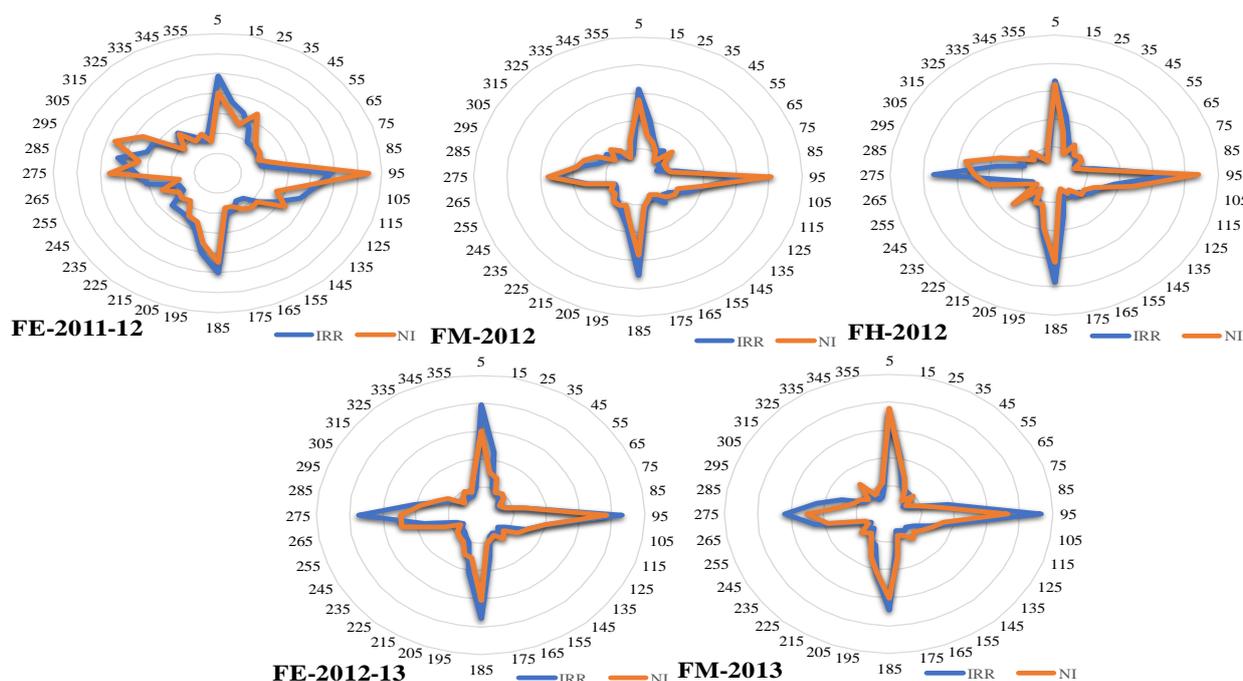


Fig. 5. Frequência de área distribuição de ângulos azimutais observados em cinco fenofases durante primeiros dois anos de produção: expansão de área foliar e frutos, verão 2011-2012 (FE-11-12), maturação de frutos 2012 (FM-12), fim de coleta de frutos 2012 (FH-12), expansão de área foliar e frutos, verão 2012-2013 (FE-12-13) e fim de coleta de frutos 2013 (FH-13). Plantas de café Arábica foram cultivadas sob irrigação (IRR) e regime hídrico de campo (NI).

Tabela 1. Médias \pm erro padrão de coeficiente k teórico (k') para radiação direta em cinco fenofases relacionadas a primeiras duas produções de cafezal: expansão de área foliar e frutos, verão 2011-2012, FE-11-12; maturação de frutos 2012, FM-12; fim de coleta de frutos 2012, FH-12; expansão de área foliar e frutos, verão 2012-2013, FE-12-13; fim de coleta de frutos 2013, FH-13. As plantas foram irrigadas (IRR) ou cultivadas sob regime hídrico do campo (NI).

Fenofase	FE-11-12	FM-12	FH-12	FE-12-13	FH-13
IRR	0.698 \pm 0.004 aA	0.581 \pm 0.004 cA	0.574 \pm 0.005 cdA	0.638 \pm 0.007 bB	0.557 \pm 0.002 dA
NI	0.706 \pm 0.003 aA	0.581 \pm 0.005 bA	0.583 \pm 0.002 bA	0.713 \pm 0.003 aA	0.553 \pm 0.005 cA

As letras minúsculas apresentam diferenças entre fenofases, enquanto as maiúsculas entre dois regimes hídricos.

A aclimação em episódios repetidos de seca depende de uma reprogramação orquestrada do metabolismo vegetal, envolvendo processos fisiológicos (Menezes-Silva et al., 2017). Nosso trabalho mostrou que algumas respostas morfológicas, como são variações na área foliar específica e inclinação das folhas, têm grande valor para aclimação à mudança da irradiância e seca, até maior do que a plasticidade fisiológica (ver Rakocevic & Matsunaga nestes anais).

CONCLUSÕES

- As plantas sob dois regimes hídricos apresentaram a tendência geral de angulação plagiófila pelo λ médio, porém as NI, que foram expostas aos diversos períodos de seca, apresentaram o λ médio maior do que as IRR, exceto na fase de maturação de frutos em 2012. O ângulo maior em plantas NI do que IRR pode explicar a tendência de evitar a dissipação de energia sob alta irradiância, já que os estresses abióticos foram múltiplos.
- As plantas NI construiriam IAF muito menor do que IRR, na faixa de diferenciação entre 2.5-3 vezes.
- AFI mostrou um constante aumento entre cinco fenofases; em plantas IRR, a AFI média cresceu de 18.9 a 29.5 cm², enquanto nas plantas NI de 15.2 a 27.7 cm². O aumento na AFI deve-se ao aumento de número de folhas de ordens de ramificação superiores (3^a e 4^a), que foram sombreadas e formadas com AFI maior.
- k' de radiação direta mostrou-se maior em plantas NI do que IRR durante expansão de frutos e folhas em 2012-13, promovendo crescimento vegetativo. Maior k' mostrou-se em fenofases que privilegiavam o crescimento vegetativo (expansão de área foliar e frutos) do que o reprodutivo (maturação de frutos e colheita).

AGRADECIMENTOS

Autores agradecem ao IAPAR, onde o experimento de campo foi desenvolvido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPBELL, G.S. (1986). Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution (1986) *Agricultural and Forest Meteorology* 36:317—321.

- CAMPBELL, G.S. (1990). Derivation of an angle density-function for canopies with ellipsoidal leaf angle distributions. *Agricultural and Forest Meteorology* 49 (3):173–176.
- CASTILLO, E.; ARCILA, J.; JARAMILLO, A.; SANABRIA, R.J. (1996). Estructura del dosel e interceptación de la radiación solar en café *Coffea arabica* L., var. Colombia. *Cenicafé* 47(1): 4-15.
- DaMATTA, F.M.; Ronchi, C.P.; Maestri, M.; Barros, R.S. (2007). Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 19(4), 485-510.
- GOUDRIAAN, J. (1988). The bare bones of leaf-angle distribution in radiation models for canopy photosynthesis and energy exchange. *Agricultural and Forest Meteorology* 43(2):155-169.
- HALLÉ, F.; OLDEMAN, R.A.A.; TOMLINSON, P.B. (1978). Tropical trees and forests - An Architectural Analysis. Berlin: Springer-Verlag, 441p.
- MA, L.; ZHENG, G.; EITEL, J.U.H.; MAGNEY, T.S.; MOSKAL, L.M. (2017). Retrieving forest canopy extinction coefficient from terrestrial and airborne lidar. *Agricultural and Forest Meteorology* 236:1–21.
- MATSUNAGA, F.T., TOSTI, J.B., ANDROCIOFI-FILHO, A., BRANCHER, J.D., COSTES, E., RAKOCEVIC, M. (2016). Strategies to reconstruct 3D *Coffea arabica* L. plant structure. *SpringerPlus* 5: 2075.
- MENEZES-SILVA, P.E.; SANGLARD, L.M.V.P.; ÁVILA, R.T.; MORAIS, L.E.; MARTINS, S.C.V.; NOBRES, P.; PATREZE, C.M.; FERREIRA, M.A.; W.L.; FERNIE, A.R.; DaMATTA, F.M. (2017). Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. *Journal of Experimental Botany* 68(15): 4309–4322.
- MONTEITH, J.L. (1975). Principles of Environmental Physics. Edward Arnold, London.
- NIINEMETS, U. (2010). A review of light interception in plant stands from leaf to canopy in different plant functional types and in species with varying shade tolerance. *Ecological Research* 25(4), 693–714.
- OSHIO, H.; ASAWA, T.; HOYANO, A.; MIYASAKA, S. (2015). Estimation of the leaf area density distribution of individual trees using high-resolution and multi-return airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment* 166:116–125.
- RAKOCEVIC, M.; ANDROCIOFI-FILHO, A. (2010). Morphophysiological characteristics of *Coffea arabica* L. in different arrangements: Lessons from a 3D virtual plant approach. *Coffee Science* 5(2):54-166.
- RAKOCEVIC, M.; MATSUNAGA, F.T.; PAZIANOTTO, R.A.; JOHANN, A.L. (2019). Light interception over the vertical profile and responses to drought of one wild accession of Ethiopian Arabic coffee. In: 3rd Agriculture and Climate Change Conference, Budapest, Hungary, P015.
- SAITOH, T.M.; NAGAI, S.; NODA, H.M.; MURAOKA, H.; NASAHARA, N. (2012). Examination of the extinction coefficient in the Beer-Lambert law for an accurate estimation of the forest canopy leaf area index. *Forest Science and Technology* 8(2):67-76.
- SINOQUET, H.; ANDRIEU B. (1993). The geometrical structure of plant canopies: characterization and direct measurements methods. In: VARLET-GRANCHER, C. et al. (eds). Crop structure and light microclimate characterization and applications. INRA, Paris, p. 131–158.
- UNIGARRO, C.A.M.; JARAMILLO, A.R.; FLÓREZ, C.P.R. (2017). Evaluation of six leaf angle distribution functions in the Castillo® coffee variety. *Agronomía Colombiana* 35(1), 23-28.
- UNIGARRO, C.A.M.; JARAMILLO, A.R.; IBARRA, L.N.R.; FLÓREZ, C.P.R. (2016). Estructura del dosel y coeficientes de extinción teóricos en genotipos de café arábico en Colombia. *Acta Agronómica* 65(4):383-389.