

# IMPACTOS DA DEFICIÊNCIA HÍDRICA NAS RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS E ESPECTRAIS DO CAFEIEIRO CONSORCIADO COM ESPÉCIES MADEIREIRAS

Helbert Rezende de Oliveira Silveira<sup>1</sup>, Meline de Oliveira Santos<sup>2</sup>, Vânia Aparecida Silva<sup>3</sup>, Regis Pereira Venturin<sup>4</sup>, Margarete Marin Lordelo Volpato<sup>5</sup>, Mayara Fontes Dantas<sup>6</sup>, Gladyston Rodrigues Carvalho<sup>7</sup>, Tesfahun Alemu Setotaw<sup>8</sup>, Filipe Chaves Moreira<sup>9</sup>, João Paulo Rodrigues Alves Delfino Barbosa<sup>10</sup>, Mário Lúcio Vilela de Resende<sup>11</sup>

(Recebido: 25 de setembro de 2015; aceito: 25 de janeiro de 2016)

**RESUMO:** Objetivou-se, nesse estudo, avaliar o efeito do déficit hídrico nas respostas espectrais e ecofisiológicas de cafeeiros consorciados com madeireiras. A cultivar Catuaí Vermelho 99 foi plantada em monocultivo e consorciada com as arbóreas mogno-africano, teca e acrocarpo, distribuídas em dois espaçamentos (9 x 13,6 e 18 x 13,6 m), na linha dos cafeeiros. As avaliações de crescimento das arbóreas e do cafeeiro foram realizadas aos 25 meses após o plantio. As avaliações espectrais e ecofisiológicas nos cafeeiros foram realizadas em quatro épocas (junho, agosto, setembro e dezembro de 2014). O acrocarpo apresentou maior altura, diâmetro de copa e caule. Não houve diferenças entre o crescimento dos cafeeiros consorciados e monocultivo. As diferenças de potencial hídrico, índices espectrais e ecofisiológicas foram mais evidentes nas fases de início (agosto) e de recuperação (dezembro) de deficiência hídrica. Em agosto, cafeeiros em monocultivo apresentaram maior potencial hídrico que cafeeiros consorciados e foram discriminados por apresentarem escores positivos e maiores valores dos índices espectrais NDVI, WBI, ARI1, CRI1, SIPI e FRI. Já em dezembro, maiores valores de potencial hídrico foram encontrados no monocultivo, plantio consorciado com teca em ambos os espaçamentos e acrocarpo no maior espaçamento. Contudo, nessa época, destacou-se cafeeiro consorciado com teca no maior espaçamento, que apresentou escores positivos e valores mais elevados de eficiência do uso da água, eficiência fotoquímica potencial do PSII e índices ARI1, CRI1 e FRI. O consórcio com teca no maior espaçamento apresenta impacto positivo sobre respostas espectrais e ecofisiológicas do cafeeiro, após o período sob deficiência hídrica.

**Termos para a indexação:** *Coffea arabica*, *Khaya ivorensi*, *Tectona grandis*, *Acrocarpus fraxinifolius*.

## IMPACTS OF WATER DEFICIT IN ECOPHYSIOLOGICAL AND SPECTRAL RESPONSES OF COFFEE INTERCROPPED WITH WOODY SPECIES

**ABSTRACT:** The aim of this study was to evaluate the effect of water stress in spectral and ecophysiological responses of coffee trees intercropped with woody species under water deficit. The "Catuaí Vermelho 99" was planted in monoculture and associated with the tree mahogany, teak and acrocarpo distributed in two spacings (9 x 13.6 and 18 x 13.6 m) line of coffee. Evaluations of growth of tree and coffee were performed 25 months after planting. The spectral and ecophysiological evaluations in coffee were held in four moments (June, August, September and December 2014). The acrocarpo presented greater height, crown and stem diameter. There were no differences between the growth of intercropping and monoculture coffee. The differences in water potential, spectral indices and ecophysiological were more evident in the early stages (August) and drought recovery (December). In August, the coffee monoculture showed higher  $\Psi_{pd}$  than intercropped coffee and was discriminated by having positive scores and higher values of spectral indices NDVI, WBI, ARI1, CRI1, SIPI and FRI. On the other hand, in December, the largest  $\Psi_{pd}$  values were found in monoculture, intercropping with teak in both spacing and acrocarpo in greater spacing. However, this time, the highlight was the intercropping coffee with teak in wider spacing, which showed positive scores and higher values of US, potential photochemical efficiency of PSII and indexes (ARI1, CRI1 and FRI). The intercropping with teak in greater spacing has a positive impact on the spectral and ecophysiological coffee's responses after the drought.

**Index terms:** *Coffea arabica*, *Khaya ivorensi*, *Tectona grandis*, *Acrocarpus fraxinifolius*.

## 1 INTRODUÇÃO

No sul de Minas Gerais, variações no clima caracterizadas por episódios de seca ou distribuição irregular de chuvas têm

sido observadas com frequência na região, principalmente nos últimos anos (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2014; MARTINS et al., 2015). Tais condições associadas com extremos de temperatura causam estresse, o que resulta em perda de folhas,

<sup>1,2,3,4,5,6,7</sup>Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais/EPAMIG/URESM - Campus UFLA - Cx. P. 176 - 37.200-000 Lavras - MG - helbert\_rezende@yahoo.com.br, melineoli@hotmail.com, vania.silva@epamig.ufla.br, regis@epamig.br, margarete@epamig.ufla.br, mayarafdantas@gmail.com, carvalho@epamig.ufla.br

<sup>8,9</sup>Universidade Federal de Lavras/UFLA, Cx. P. 3037- 37.200-000 - Lavras - MG - setotaw2006@gmail.com, filipemoreira@necafufla.com.br

<sup>10</sup>Universidade Federal de Lavras/UFLA - Departamento de Biologia/DBI - Cx. P. 3037- 37.200-000 - Lavras - MG - jp.barbosa@dbi.ufla.br

<sup>11</sup>Universidade Federal de Lavras/UFLA - Departamento de Fitopatologia/DFP -Cx. P. 3037- 37.200-000 - Lavras - MG mlucio@dfp.ufla.br

seca de ponteiros, escaldadura, diminuição da fotossíntese, entre outros. Esses sintomas já foram constatados em algumas lavouras do sul de Minas e culminaram em uma redução da safra 2014, ano que apresentou um clima mais atípico (CONAB, 2014). Essa escassez e irregularidade das chuvas no ano de 2014 comprometeram, inclusive, a safra de 2015 (CONAB, 2015).

Diante dessas adversidades, a arborização pode ser uma estratégia para melhorar as condições microclimáticas do cafezal, pois além do efeito direto na redução da radiação, altera o microclima e o balanço hídrico da lavoura como efeitos indiretos da disponibilidade de água no solo e na atmosfera (GOMES et al., 2008; SILES; HARMAND; VAAST, 2010). O sombreamento protege o cafeeiro contra temperaturas extremas, reduz a bionalidade de produção, a incidência de seca dos ponteiros, minimiza a ocorrência da escaldadura e de desfolha e melhora a qualidade do café (MANCUSO; SORATTO; PERDONÁ, 2010; RICCI; COSTA; OLIVEIRA, 2011).

Diversas plantas têm sido estudadas como alternativas para o cultivo consorciado com café no Brasil, como o ingazeiro [*Inga sessilis* (Vell.) Mart.], a leucena [*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.], o cedro australiano [*Toona ciliata* var. *australis* (F. Muell.) Bahadur] (GUIMARÃES et al., 2014), a seringueira [*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg.] (NASCIMENTO et al., 2006), a teca (*Tectona grandis* L.f.) (MACEDO et al., 2004), a macadâmia (*Macadamia integrifolia* Maiden & Betche) (PERDONÁ et al., 2012; PEZZOPANE et al., 2010), a eritrina (*Erythrina verna* Vell.) (RICCI; COSTA; OLIVEIRA, 2011), a bananeira (*Musa* spp.) (Pezzopane et al., 2007; RICCI; COSTA; OLIVEIRA, 2011), o coqueiro-anão (*Cocos nucifera* L.) (PEZZOPANE et al., 2011), entre outras.

Por outro lado, a intensidade de sombreamento, o tipo de copa da árvore e o uso de material genético apropriado têm se mostrado como fatores limitantes para o sucesso dos sistemas de cultivo consorciados com cafeeiros (BALIZA et al., 2012a, 2012b; CAVATTE et al., 2012; PEZZOPANE et al., 2010). Siles, Harmand e Vaast (2010) observaram que as árvores podem competir com o cafeeiro por recursos como a radiação, nutrientes do solo e água, quando estão em alta densidade de plantio e/ou em épocas com deficiência hídrica. Outro fator a ser considerado no cultivo consorciado que, entretanto, vem sendo

negligenciado nos estudos, se refere ao período em que o sistema se encontra em formação, em pleno crescimento, antes do sombreamento se tornar efetivo. Nesse contexto, não há estudos que relacionem o cultivo consorciado com as alterações fisiológicas e espectrais em cafeeiros, em fase de formação.

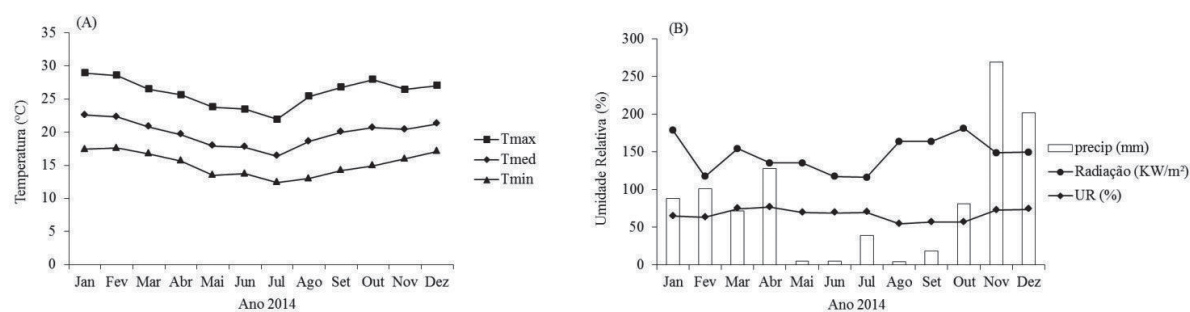
Objetivou-se, no presente estudo, avaliar o efeito do déficit hídrico nas respostas espectrais e ecofisiológicas de cafeeiros consorciados com espécies madeireiras.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em novembro de 2012, em uma propriedade localizada no município de Santo Antônio do Amparo-MG, região produtora de café do sul de Minas, cujas coordenadas são 20° 54' 58,1" S e 44° 51' 13,7" W. A região apresenta altitude de 1089 m, temperatura média de 19,8 °C e precipitação 1670 mm/ano. Já as condições climáticas para a região, no ano de 2014, ano em que foram realizadas as avaliações, foram apresentadas na Figura 1. Os dados foram obtidos por meio de uma estação meteorológica, instalada próxima ao local do experimento.

O experimento foi conduzido em esquema de delineamento em blocos casualizados (DBC), contendo sete tratamentos, com quatro parcelas de seis plantas, onde foram avaliadas duas plantas em cada, que estavam localizadas a 1,95 m à esquerda e à direita da espécie arbórea. Os tratamentos foram constituídos pelos sistemas de cultivo: cafeeiros em monocultivo; cafeeiros consorciados com mogno-africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) no espaçamento de 9 x 13,6 m; cafeeiros consorciados com mogno-africano no espaçamento de 18 x 13,6 m; cafeeiros consorciados teca (*Tectona grandis* L.f.) no espaçamento de 9 x 13,6 m; cafeeiros consorciados com teca no espaçamento de 18 x 13,6 m; cafeeiros consorciados com acrocarpo (*Acrocarpus fraxinifolius* Arn.) no espaçamento de 9 x 13,6 m e cafeeiros consorciados com acrocarpo no espaçamento de 18 x 13,6 m.

As três espécies madeireiras foram implantadas entre as plantas na linha dos cafeeiros, na mesma época que a lavoura de *Coffea arabica* cultivar Catuai 99 (3,40 m x 0,65 m). No espaçamento das entrelinhas foram fixadas três linhas de cafeeiros intercalados às espécies de sombra, num total de 13,6 m, entre as linhas arborizadas. A área experimental recebeu adubações e tratamentos fitossanitários, de acordo com as recomendações para cada cultura.



**FIGURA 1** - Condições climáticas da região de Santo Antônio do Amparo, no ano de 2014. (A) temperaturas máxima, média e mínima. (B) Umidade relativa, precipitação e radiação.

As avaliações de crescimento foram realizadas aos 25 meses após o plantio e mediuse, tanto dos cafeeiros, quanto das espécies arbóreas, os diâmetros do caule (cm) e da copa (m) e a altura (m). As avaliações ecofisiológicas e espectrais foram realizadas apenas nos cafeeiros, nos meses de junho, agosto, setembro (época com baixa precipitação e ocorrência de deficiência hídrica) e dezembro (época com alta precipitação e disponibilidade hídrica). As medições de potencial hídrico, espectro de reflectância foliar, trocas gasosas e parâmetros de fluorescência da clorofila foram realizadas no mesmo dia, em cada época.

Valores referentes ao potencial hídrico das plantas foram obtidos com auxílio de uma câmara de pressão, tipo Scholander (PMS Instruments-Plant Moisture- Modelo 1000), antes do amanhecer ( $\Psi_{pd}$  - MPa).

Avaliou-se o espectro de reflectância foliar com o auxílio de um mini- espectrômetro foliar CI-710 (CID Bioscience, Camas, WA), que irradia sobre a amostra de folha a luz de um LED azul e de uma lâmpada incandescente, fornecendo saída na faixa do visível ao infravermelho (intervalo 400-1000 nm). Com os valores obtidos, inferiram-se os índices descritos abaixo pelas equações, onde R é o comprimento de onda eletromagnética utilizada:

1) Índice de reflectância fotoquímica - Photochemical reflectance index - PRI  $(R531 - R570)/(R531 + R570)$  (GAMON; PEÑUELAS; FIELD, 1992).

2) Índice de reflectância de senescência - Plant senescence reflectance index - PSRI  $(R680 - R500) / R750$  (MERZLYAK et al., 1999).

3) Índice de vegetação por diferença normalizada - Normalized difference vegetation index - NDVI  $(R800 - R680) / (R800 + R680)$  (ROUSE et al., 1974).

4) Índice de banda de água - Water band index - WBI  $(R900 / R970)$  (PEÑUELAS et al., 1997).

5) Índice de reflectância de antocianinas - Anthocyanin reflectance index - ARI1  $(1/R550) - (1/R700)$  (GITELSON; MERZLYAK; CHIVKUNOVA, 2001).

6) Índice de reflectância de carotenoides - Carotenoid Reflectance Index - CRI1  $(1/R510) - (1/R550)$  (GITELSON et al., 2002).

7) Índice de pigmentos independente de componentes estruturais - Structure-insensitive pigment index - SIPI  $(R800 - R445) / (R800 + R680)$  (PEÑUELAS; BARET; FILELLA, 1995).

8) Índice de reflectância de flavonoides - Flavonol reflectance index - FRI  $(1/R410 - 1/R460) * R800$  (MERZLYAK et al., 2005).

A avaliação de trocas gasosas foi realizada utilizando-se o analisador de gás por infravermelho (LI-6400XT Portable Photosynthesis System, LICOR, Lincoln, USA). O equipamento foi calibrado antes de ser utilizado, conforme as normas de calibração descritas no manual (LICOR BIOSCIENCES, 2012). As medições foram realizadas em folhas completamente expandidas, no 3º ou 4º pares de folhas. As características avaliadas foram: taxa fotossintética líquida ( $A - \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), condutância estomática ( $g_s - \text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) e transpiração ( $E - \text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ). A eficiência instantânea do uso da água (EUA) foi obtida pela relação  $A/E$ . Todas as avaliações foram realizadas entre 9 e 11 horas (horário solar), com utilização de fonte artificial de radiação fotossinteticamente ativa (PAR), em câmara fechada fixada em  $1500 \mu\text{mol}$  de fótons  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Blue + Red LED LI-6400-02B, LICOR, Lincoln, USA). A taxa de assimilação de  $\text{CO}_2$  na câmara foi medida com a concentração ambiente de  $\text{CO}_2$ .

No mesmo horário em que foram feitas as análises de trocas gasosas determinou-se, com o auxílio de um fluorômetro portátil MINI-PAM (Walz Inc.) a eficiência fotoquímica efetiva do PSII ( $\Phi$ PSII) (PSII), quenching fotoquímico (qP), quenching não fotoquímico (qN), o coeficiente de extinção não fotoquímico (NPQ) e a taxa relativa de transporte de elétrons (ETR). O valor de eficiência fotoquímica potencial do PSII (F0/Fm) foi determinado no período noturno, entre 19:00 e 20:00 horas.

Os valores das análises de crescimento em altura, diâmetro do caule e copa e potencial hídrico foram submetidos à análise de variância, no programa estatístico SISVAR 4.3 (FERREIRA, 2011). Os valores médios foram comparados, pelo teste de Scott Knott, a 5% de probabilidade.

As demais variáveis fisiológicas, em cada época de avaliação, foram analisadas através de Análise de Componentes Principais (ACP), pelo programa R (R CORE TEAM, 2014), utilizando o pacote FactoMineR (HUSSON et al., 2014).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aos 25 meses após o plantio, observou-se que as espécies arbóreas apresentaram diferenças quanto ao crescimento com destaque para plantas de acrocarpo que apresentaram maior altura, diâmetro de copa e de caule (Tabela 1). De acordo com Venturin et al. (2014), as plantas de acrocarpo apresentam um crescimento rápido e grande potencial para estabelecimento na região. Para o cafeeiro não foram observadas diferenças significativas para nenhum parâmetro de crescimento, ou seja, o seu desenvolvimento vegetativo não foi alterado pelo cultivo das arbóreas na mesma linha, uma vez que não diferiu significativamente do monocultivo. Pezzopane et al. (2007) também observaram que não houve diferença entre os padrões sazonais de crescimento entre o cafeeiro consorciado com banana 'prata anã' e o cultivo a pleno sol.

Nas análises de potencial hídrico ( $\Psi_{pd}$ ), em junho, os cafeeiros estavam com altos valores e não houve diferenças entre os diferentes tipos de consórcio e o monocultivo (Figura 2). No mês de agosto, já foi possível observar diferentes valores de  $\Psi_{pd}$ , sendo que maiores valores foram encontrados em cafeeiros sob monocultivo, seguido pelo consorciado com mogno-africano, no espaçamento menos adensado (18x13,6 m), o que indica que, em fase inicial de deficiência hídrica, as espécies arbóreas alteram o  $\Psi_{pd}$

de plantas de café. A redução no potencial hídrico, no mês de agosto, pode ser um reflexo direto das condições climáticas, que vinha de um acumulado de quatro meses com baixos índices de precipitação, levando a uma redução da disponibilidade de água no solo.

No mês de setembro, os valores de potencial hídrico caracterizaram valores de déficits hídricos considerados moderados, e já não houve diferença entre os cafeeiros cultivados nos diferentes sistemas de cultivo (Figura 2). Isso resultou da baixa precipitação ocorrida na época, somada a um aumento na temperatura e insolação, o que afetou o cafeeiro independentemente do sistema de cultivo a que estava submetido.

Considerando o mês de dezembro, observou-se uma tendência de recuperação do potencial hídrico dos cafeeiros, em que maiores valores foram encontrados no monocultivo, plantio consorciado com teca em ambos os espaçamentos e acrocarpo, no maior espaçamento. Essa recuperação do potencial hídrico observada pode ter sido devido ao aumento no volume de precipitação nos meses de novembro e dezembro, associado a uma leve redução na insolação. Contudo, nos cafeeiros consorciados com mogno-africano e acrocarpo, os potenciais hídricos ainda foram menores do que os cafeeiros em monocultivo e os cultivados consorciados com teca.

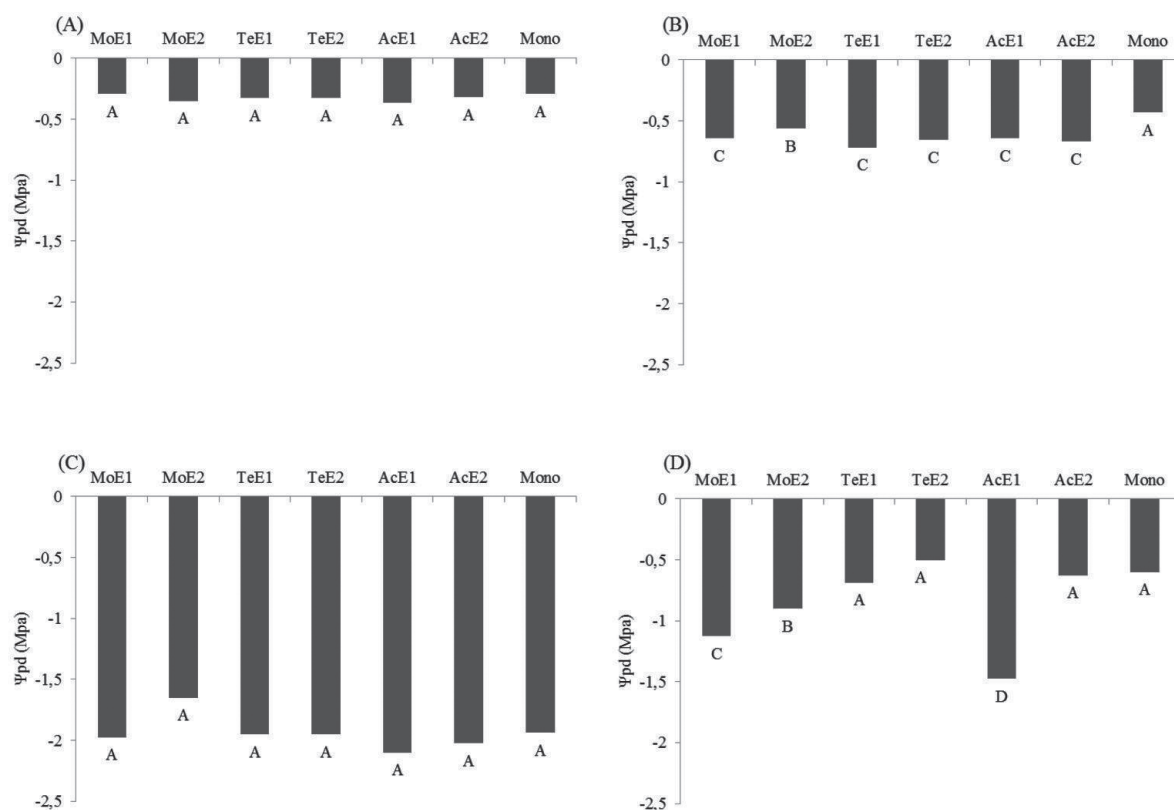
O fato do menor potencial hídrico ter sido encontrado em cafeeiros consorciados com acrocarpo no menor espaçamento, pode estar relacionado ao fato de que plantas dessa espécie arbórea, nessa condição, apresentaram o maior crescimento em altura, e consequentemente um provável maior desenvolvimento de raízes. Um maior volume radicular pode gerar uma grande competitividade pela água disponível no solo, levando a uma queda do potencial hídrico dos cafeeiros cultivados em seu entorno. Além disso, uma vez que o cafeeiro e as arbóreas estavam em fase de formação, o sistema radicular de ambos ainda ocupam a mesma profundidade, o que pode contribuir também para concorrência por água livre no solo. Segundo Siles, Harmand e Vaast (2010), quando o sistema consorciado já está estabelecido, com as plantas atingindo seu crescimento ideal, há uma complementariedade na distribuição entre as raízes do cafeeiro, que são mais superficiais, e das arbóreas consorciadas, que são mais profundas, resultando em uma baixa competitividade por água e nutrientes do solo, aumentando a eficiência em termos de exploração do solo.



**TABELA 1** - Análise de crescimento em diâmetro do caule (cm), altura (m) e diâmetro da copa (m) de espécies arbóreas plantadas em dois espaçamentos entre cafeeiros e de cafeeiros. MoE1= mogno-africano (9 x 13,6 m); MoE2= mogno-africano (18 x 13,6 m); TeE1= teca (9 x 13,6 m); TeE2= teca (18 x 13,6 m); AcE1= acrocarpo (9 x 13,6 m); AcE2= acrocarpo (18 x 13,6 m); Mono= cafeeiro em monocultivo.

Espécies arbóreas	Tratamentos						Mono
	MoE1	MoE2	TeE1	TeE2	AcE1	AcE2	
Diâmetro do caule	4,32b	2,35d	3,51c	3,64c	9,44a	9,24a	
Altura	1,69d	1,58d	2,53c	2,72c	8,19a	7,40b	
Diâmetro da copa	1,33b	1,17b	1,18b	1,25b	1,78a	2,02a	
Cafeeiros	MoE1	MoE2	TeE1	TeE2	AcE1	AcE2	Mono
Diâmetro do caule	2,1a	1,8a	1,9a	1,8a	1,8a	2,0a	2,1a
Altura	0,9a	0,8a	0,9a	0,9a	0,9a	1,0a	0,9a
Diâmetro da copa	1,1a	0,9a	1,0a	1,0a	1,0a	1,1a	1,0a

Médias seguidas pela mesma letra na linha não apresentaram diferenças significativas entre si, pelo teste de Scott Knott, a 5% de probabilidade.



**FIGURA 2** - Potencial hídrico antemanhã ( $\Psi_{pd}$ ) de cafeeiros consorciados com arbóreas, plantadas em dois espaçamentos, acrescido de uma testemunha a pleno sol, nos meses de junho (A), agosto (B), setembro (C) e dezembro (D). MoE1= mogno-africano (9 x 13,6 m); MoE2= mogno-africano (18 x 13,6 m); TeE1= teca (9 x 13,6 m); TeE2= teca (18 x 13,6 m); AcE1= acrocarpo (9 x 13,6 m); AcE2= acrocarpo (18 x 13,6 m); Mono= cafeeiro em monocultivo.

Nas análises de componentes principais verificou-se que, no mês de junho, as duas primeiras componentes principais explicaram 58,32% da variabilidade das respostas (Figura 3A e 3B). As variáveis de maior peso no primeiro vetor, que explica 36,27% da variabilidade total, foram, em ordem decrescente, os índices de reflectância NDVI, ARI1, CRI1 e SIPI e, por valor negativo, a eficiência fotoquímica efetiva do PSII e a taxa relativa de transporte de elétrons (ETR).

A dissimilaridade entre os cafeeiros cultivados em diferentes sistemas de cultivo foi observada pela dispersão gráfica dos componentes principais, em que os cafeeiros em monocultivo apresentaram maiores valores dos índices NDVI, ARI1, CRI1 e SIPI. Maiores valores de índices de reflectância relacionados a pigmentos, como NDVI, ARI1, CRI1, FRI e SIPI, podem estar ligados ao fato de que cafeeiros em monocultivo estão sujeitos a uma maior exposição à radiação solar, quando comparados aos cultivos consorciados que já apresentam algum sombreamento pelas arbóreas. Uma maior exposição à radiação UV ou visível pode levar a um acúmulo de antocianinas, carotenoides e flavonoides (GITELSON et al., 2002; GITELSON; MERZLYAK; CHIVKUNOVA, 2001; MERZLYAK et al., 2005), consequentemente aumentando esses índices.

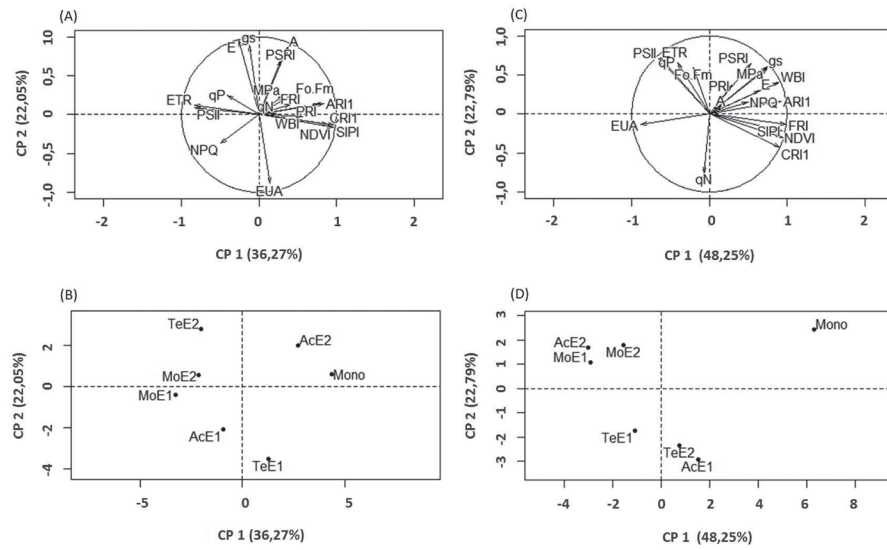
Por outro lado, o segundo vetor (Componente Principal 2 – CP2) explica 22,05% da variabilidade dos dados. Os valores mais altos (positivos) foram obtidos com as variáveis relacionadas às trocas gasosas como fotossíntese (A), condutância estomática (gs) e transpiração (E). Os valores mais baixos (negativos) foram verificados com a eficiência do uso da água (EUA). Nesse caso, destacam-se os cafeeiros consorciados com teca no menor espaçamento que apresentaram maiores valores de EUA, pois apresentaram menores valores de gs e a transpiração, com manutenção das taxas fotossintéticas. De acordo com Damatta et al. (2007), o microclima de um cultivo arborizado promove a redução do déficit de pressão de vapor (DPV), o que favorece a redução de “gs” associada à manutenção de “A”, resultando em maior eficiência do uso da água.

Em agosto, as duas primeiras componentes principais explicaram 71,04% da variabilidade das respostas (Figura 3C e 3D). Na CP1, pôde-se observar que as variáveis mais representativas foram os índices espectrais NDVI, WBI, ARI1,

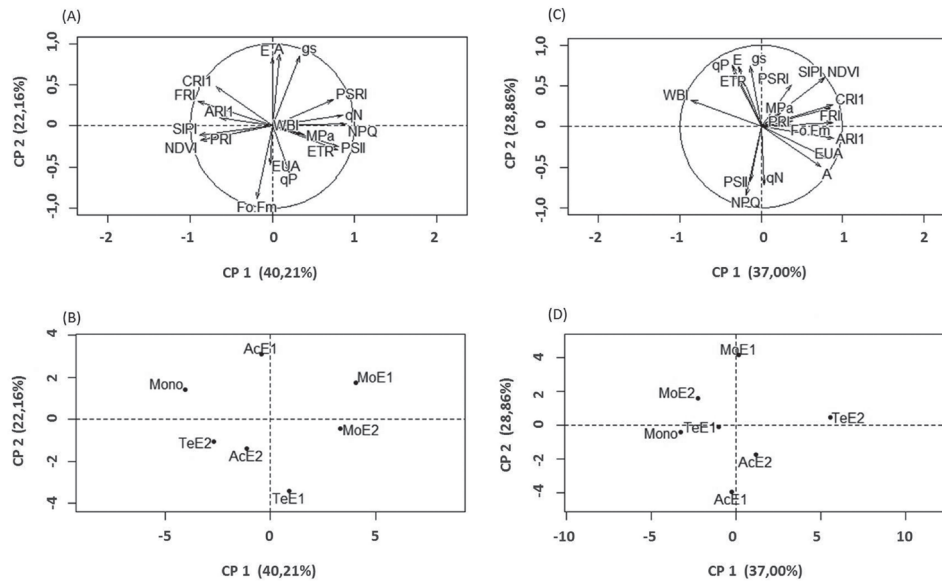
CRI1, SIPI e FRI, enquanto que eficiência de uso da água (EUA) se mostrou negativamente correlacionada (Figura 3C). Os cafeeiros em monocultivo foram os que apresentaram maiores valores para os índices espectrais e menores valores de EUA, destacando-se isoladamente na dispersão gráfica dos componentes principais (Figura 3D).

A menor eficiência de uso da água nos cafeeiros em monocultivo decorre do maior déficit de pressão de vapor na lavoura que, além de gerar decréscimos na gs e transpiração, diminui também a fotossíntese. Como consequência da redução de A, há queda na utilização fotoquímica da irradiância incidente, o que pode resultar na formação de espécies reativas de oxigênio (DAMATTA et al., 2007). Nesse contexto, pode ocorrer a ativação da síntese de pigmentos, como estratégia de proteção contra danos oxidativos. Como os pigmentos determinam os valores de índices espectrais, isso pode explicar porque menores valores de eficiência do uso da água estão correlacionados com maiores valores de índices espectrais, nessa época. Evidências adicionais para essas colocações surgiram a partir das observações de que, por outro lado, os cafeeiros consorciados com mogno-africano, em ambos os espaçamentos, e aqueles consorciados com acrocarpo no maior espaçamento apresentaram padrão oposto de respostas fisiológicas, ou seja, menores valores para os índices espectrais e maiores valores de EUA. Além disso, a análise da CP2 indicou que os cafeeiros consorciados com mogno, em ambos os espaçamentos, e com acrocarpo no maior espaçamento apresentaram também maiores scores dos parâmetros  $\Phi$ PSII e ETR, indicando maior eficiência fotoquímica.

Apesar dos maiores valores de EUA, o potencial hídrico estava menor nos cafeeiros consorciados do que nos cafeeiros monocultivo. Inclusive, os cafeeiros consorciados apresentaram menores valores de WBI, que é um índice relacionado ao conteúdo de água na folha, sendo que menores valores indicam menores potenciais hídricos (GAALLEN; FLANAGAN; PEDDLE, 2007; NAGY; TAMÁS, 2013; PEÑUELAS et al., 1997). Isso sugere que, se por um lado, o cultivo consorciado aumentou a eficiência de uso da água, por outro lado, pode ter promovido a competição pela água disponível no solo, o que resultou em menores valores de potencial hídrico nos cafeeiros.



**FIGURA 3** - Biplot para os dois primeiros eixos da análise de componentes principais para os dados dos sete tratamentos, em função dos parâmetros ecofisiológicos avaliados em junho e agosto. (A, C) Os coeficientes de correlação para todos os parâmetros, nos meses de junho e agosto, respectivamente, foram representados pelos vetores. (B, D) A segregação dos sete tratamentos estudados, baseada nos parâmetros ecofisiológicos avaliados nos meses de junho e agosto, respectivamente. MoE1= mogno-africano (9 x 13,6 m); MoE2= mogno-africano (18 x 13,6 m); TeE1= teca (9 x 13,6 m); TeE2= teca (18 x 13,6 m); AcE1= acrocarpo (9 x 13,6 m); AcE2= acrocarpo (18 x 13,6 m); Mono= cafeeiro em monocultivo.



**FIGURA 4** - Biplot para os dois primeiros eixos da análise de componentes principais para os dados dos sete tratamentos, em função dos parâmetros ecofisiológicos avaliados em setembro e dezembro. (A, C) Os coeficientes de correlação para todos os parâmetros, nos meses de setembro e dezembro, respectivamente, foram representados pelos vetores. (B, D) A segregação dos sete tratamentos estudados, baseada nos parâmetros ecofisiológicos avaliados nos meses de setembro e dezembro, respectivamente. MoE1= mogno-africano (9 x 13,6 m); MoE2= mogno-africano (18 x 13,6 m); TeE1= teca (9 x 13,6 m); TeE2= teca (18 x 13,6 m); AcE1= acrocarpo (9 x 13,6 m); AcE2= acrocarpo (18 x 13,6 m); Mono= cafeeiro em monocultivo.

No mês de setembro, as duas primeiras componentes principais explicaram 62,37% da variabilidade das respostas (Figura 4A e 4B). Com base na CP1, observou-se que os parâmetros fotoquímicos  $\Phi$ PSII,  $q_N$  e NPQ apresentavam elevados scores com valores positivos, enquanto que negativamente correlacionados estavam os índices espectrais NDVI, SIPI e FRI (Figura 4A). Nesse ponto, destacaram-se os cafeeiros em monocultivo que apresentaram menores valores para os parâmetros fotoquímicos  $\Phi$ PSII,  $q_N$  e NPQ, com maiores valores de NDVI, SIPI e FRI. Por outro lado, uma situação contrária foi encontrada para cafeeiros consorciados com mogno-africano, em ambos os espaçamentos. Para a CP2, maiores valores positivos de scores foram apresentados pelos parâmetros fotossíntese, condutância estomática e transpiração, sobressaindo, nesse caso, com maior valor, os cafeeiros consorciados com acrocarpo no menor espaçamento. O parâmetro mais significativo negativamente foi a eficiência fotossintética potencial ( $F_0/F_m$ ) que destacou os cafeeiros consorciados com teca no menor espaçamento.

Apesar de, no mês de setembro, não terem sido verificadas diferenças entre o potencial hídrico dos cafeeiros consorciados em relação ao monocultivo, no mês anterior, constatou-se menor manutenção do status hídrico, verificada pelos menores valores de potencial hídrico, indicando um progresso mais rápido da deficiência hídrica nos cafeeiros consorciados. O progresso rápido do estresse por seca pode levar à alterações nos parâmetros fotoquímicos para proteger as folhas dos danos decorrentes do excesso de excitação das clorofilas sob deficiência hídrica (POMPELI et al., 2010) e prevenir a formação de radicais livres (MURCHIE; LAWSON, 2013). Isso pode se justificar porque maiores valores de  $q_N$  (quenchings não-fotoquímico) foram encontrados em plantas consorciadas com mogno-africano; e indica que parte da radiação absorvida foi dissipada em forma de calor, nesses cafeeiros (HENRIQUES, 2009; LI et al., 2013).

Na avaliação do mês de dezembro, as duas primeiras componentes principais explicaram 65,86% da variabilidade das respostas (Figura 4C e 4D). Na CP1, pôde-se observar que as variáveis com scores positivos mais elevados foram EUA, eficiência fotoquímica potencial do PSII ( $F_0/F_m$ ), e os índices de reflectância ARI1, CRI1 e FRI, enquanto que WBI se mostrou negativamente relacionado (Figura 4C). Maiores valores para as

variáveis mais representativas positivamente na CP1 foram encontrados em cafeeiros consorciados com teca no maior espaçamento e, os menores, nos cafeeiros em monocultivo. Nesse tempo, evidencia-se o cafeeiro consorciado com teca no maior espaçamento que, embora tenha apresentado potencial hídrico semelhante ao monocultivo, proporcionou maior eficiência de uso da água, pela melhoria das condições microclimáticas. Nessa época de recuperação hídrica, observou-se que a correlação entre índices espectrais e eficiência do uso da água foi positiva e, portanto, os cafeeiros consorciados com teca no maior espaçamento apresentaram também maiores valores de índices espectrais relativos aos pigmentos que os demais cafeeiros, inclusive o monocultivo. Isso não ocorreu porque o monocultivo passou a apresentar menores valores de ARI, CRI1 e FRI, e sim porque o cafeeiro consorciado com teca aumentou esses valores nesse período. Portanto, após recuperação hídrica, esses cafeeiros consorciados com teca, que apresentaram melhores condições fisiológicas, apresentaram disponibilidade de assimilados para ativação da síntese de pigmentos, como estratégia para minimizar estresse oxidativo ocasionado por novos ciclos de seca (BHARGAVA; SWANTAN, 2012).

Nessa mesma fase de recuperação hídrica, ao analisar a CP2, observou-se que a variável mais representativa foi a condutância estomática ( $g_s$ ), estando a variável NPQ inversamente relacionada. Destacaram-se, por essa componente, as diferenças entre os cafeeiros consorciados com mogno-africano no menor espaçamento, e cafeeiros consorciados com acrocarpo, no menor espaçamento. Os cafeeiros consorciados com mogno-africano no menor espaçamento apresentaram maior condutância estomática e menores valores de NPQ. Já para os cafeeiros consorciados com acrocarpo no menor espaçamento, houve maior valor de NPQ e menores de condutância estomática. De acordo com o potencial hídrico, os cafeeiros consorciados com acrocarpo no menor espaçamento apresentaram menor recuperação hídrica do que os cafeeiros consorciados com mogno africano no menor espaçamento. Sob potenciais hídricos mais baixos e menores valores de condutância estomática, as irradiâncias podem se tornar superiores às necessárias para saturar a fotossíntese, o que pode resultar em perda de eficiência fotoquímica e aumento nos valores de NPQ. Isso indica que, nos cafeeiros consorciados com acrocarpo no menor espaçamento houve maior dissipação do excesso de energia não absorvida pela fase fotoquímica da fotossíntese (MISHRA et al., 2012).



De maneira geral, as variáveis que mais contribuem para a variabilidade das respostas do cafeeiro, submetido aos diferentes tipos de consórcio com madeiras na fase de formação variaram, de acordo a intensidade e recuperação do déficit hídrico. Isso evidencia também a complexidade das respostas ecofisiológicas e espectrais em virtude da plasticidade fisiológica do cafeeiro às variações ambientais. Corroborando com essas observações sobre a plasticidade do cafeeiro, Baliza et al. (2012a) constataram que diferentes níveis de sombreamento e modificações sazonais (período chuvoso e seco) promovem alterações nas características fisiológicas do cafeeiro.

Nesse contexto, foi possível identificar que os índices espectrais NDVI, WBI, SIPI, ARI, CRI, FRI explicaram variações existentes entre os cafeeiros cultivados em monocultivo e demais sistemas de consórcio. Os parâmetros de eficiência fotoquímica, qN e NPQ e eficiência de uso da água também foram importantes para discriminação dos cafeeiros em diferentes sistemas de cultivo, principalmente sob deficiência hídrica.

O mês em que foi possível evidenciar a separação entre os cafeeiros em monocultivo dos demais cafeeiros consorciados foi agosto, época em que a deficiência hídrica nas plantas estava iniciando e as condições climáticas foram caracterizadas por altas temperaturas associadas com baixa umidade relativa do ar, baixa precipitação e alta intensidade de radiação. Nessa época, os cafeeiros consorciados exibiram respostas à deficiência hídrica inicial como, aumento eficiência de uso da água e aumento nos valores de dissipação fotoquímica, evidenciando competição por água do cafeeiro com as arbóreas. Essas respostas destacaram, principalmente, os cafeeiros em sistemas consorciados com mogno-africano, em ambos os espaçamentos. Durante o período inicial de déficit hídrico, o aumento na eficiência do uso da água e nos parâmetros de dissipação fotoquímica pode indicar uma tentativa de proteger os centros de reação contra danos oxidativos (CAVETTE et al., 2012; LI et al., 2013).

Já na fase de recuperação hídrica das plantas, os dados indicaram que o cultivo consorciado com acrocarpo no menor espaçamento exibiu respostas negativas, enfatizando uma competição por água entre o acrocarpo e o cafeeiro. Por outro lado, o sistema consorciado com teca no maior espaçamento foi destaque nessa época de retorno da precipitação, pois apresentou parâmetros fisiológicos que sugerem melhoria das condições microclimáticas e hídricas das plantas, em relação ao monocultivo.

#### 4 CONCLUSÕES

O consórcio com teca no maior espaçamento apresenta impacto positivo sobre as respostas espectrais e ecofisiológicas do cafeeiro, após um período de deficiência hídrica.

#### 5 AGRADECIMENTOS

Ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café – Consórcio Pesquisa Café, ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Café – INCT/CAFÉ, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e à Fundação Neumann do Brasil.

#### 6 REFERÊNCIAS

BALIZA, D. P. et al. Physiological characteristics and development of coffee plants under different shading levels. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v. 7, n. 1, p. 37-43, jan./mar. 2012a.

\_\_\_\_\_. Trocas gasosas e características estruturais adaptativas de cafeeiros cultivados em diferentes níveis de radiação. *Coffee Science*, Lavras, v. 7, n. 3, p. 250-258, set./dez. 2012b.

BHARGAVA, S.; SWANTAN, K. Drought stress adaptation: metabolic adjustment and regulation of gene expression. *Plant Breeding*, Hoboken, v. 132, n. 1, p. 21-32, 2012.

CAVETTE, P. C. et al. Could shading reduce the negative impacts of drought on coffee?: a morphophysiological analysis. *Physiologia Plantarum*, Hoboken, v. 144, n. 2, p. 111-122, Feb. 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Quarto levantamento:** dezembro 2014. Brasília, 2014. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14\\_12\\_22\\_09\\_53\\_55\\_b\\_boletim\\_dezembro\\_2014.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_12_22_09_53_55_b_boletim_dezembro_2014.pdf)>. Acesso em: 16 mar. 2015.

\_\_\_\_\_. **Terceiro levantamento:** setembro 2015. Brasília, 2015. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15\\_09\\_30\\_11\\_17\\_06\\_boletim\\_cafe\\_setembro\\_2015.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_09_30_11_17_06_boletim_cafe_setembro_2015.pdf)>. Acesso em: 27 nov. 2015.

DAMATTA, F. M. et al. Ecophysiology of coffee growth and production. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, Campos dos Goytacazes, v. 19, p. 485-510, 2007.

- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.
- GAALLEN, K. E. van; FLANAGAN, L. B.; PEDDLE, D. R. Photosynthesis, chlorophyll fluorescence and spectral reflectance in *Sphagnum moss* at varying water contents. **Oecologia**, New York, v. 153, n. 1, p. 19-28, Aug. 2007.
- GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 41, n. 1, p. 35-44, July 1992.
- GITELSON, A. A. et al. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. **Photochemistry and Photobiology**, Hoboken, v. 75, n. 3, p. 272-281, Mar. 2002.
- GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N.; CHIVKUNOVA, O. B. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. **Photochemistry and Photobiology**, Hoboken, v. 74, n. 1, p. 38-45, July 2001.
- GOMES, I. A. C. et al. Alterações morfofisiológicas em folhas de *Coffea arabica* L. cv. "Oeiras" sob influência do sombreamento por *Acacia mangium* Willd. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 1, p. 109-105, jan./fev. 2008.
- GUIMARÃES, G. P. et al. Stocks and oxidizable fractions of soil organic matter under organic coffee agroforestry systems. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 132-141, jan./mar. 2014.
- HENRIQUES, F. S. Leaf chlorophyll fluorescence: background and fundamentals for plant biologists. **The Botanical Review**, New York, v. 75, n. 3, p. 249-270, Sept. 2009.
- HUSSON, F. et al. **FactoMineR**: multivariate exploratory data analysis and data mining with R. R package version 1.28. 2014.
- LI, G. L. et al. Response of chlorophyll fluorescence parameters to drought stress in sugar beet seedlings. **Russian Journal of Plant Physiology**, New York, v. 60, n. 3, p. 337-342, May 2013.
- LI-COR BIOSCIENCES. **Using the LI-6400 / LI6400 XT**. Portable Photosynthesis System, 2012. Disponível em: <<https://app.boxenterprise.net/s/s8zyqu2vwndny903qutg>>. Acesso em: 10 jan. 2014.
- MACEDO, R. L. G. et al. Estabelecimento de *Tectona grandis* L.f. (Teca) em sistemas agroflorestais com *Coffea arabica* L. em Lavras-MG. **Agrossilvicultura**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 71-80, 2004.
- MANCUSO, M. A. C.; SORATTO, R. P.; PERDONÁ, M. J. Produção de café sombreado. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 9, n. 1, p. 31-44, jan./jun. 2013.
- MARTINS, E. et al. Influência das condições climáticas na produtividade e qualidade do café produzido na região do sul de Minas Gerais. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 4, p. 499-506, out./dez. 2015.
- MERZLYAK, M. N. et al. Apple flavonols during fruit adaptation to solar radiation: spectral features and technique for non-destructive assessment. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 162, n. 2, p. 151-160, Feb. 2005.
- \_\_\_\_\_. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologia Plantarum**, Hoboken, v. 106, n. 1, p. 135-141, May 1999.
- MISHRA, K. B. et al. Engineered drought tolerance in tomato plants is reflected in chlorophyll fluorescence emission. **Plant Science**, Shannon, v. 182, p. 79-86, Jan. 2012.
- MURCHIE, E. H.; LAWSON, T. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 64, n. 13, p. 3983-3998, Oct. 2013.
- NAGY, A.; TAMÁS, J. Noninvasive water stress assessment methods in orchards. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 44, p. 366-376, 2013.
- NASCIMENTO, E.A. et al. Alterações morfofisiológicas em folhas de café ( *Coffea arabica* L.) consorciado com seringueira ( *Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 852-857, maio/jun. 2006.
- PEÑUELAS, J.; BARET, F.; FILELLA, I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica**, Dordrecht, v. 31, p. 221-230, 1995.
- PEÑUELAS, J. et al. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v. 18, n. 13, p. 2869-2875, 1997.

- PERDONÁ, M. J. et al. Crescimento e produtividade de noqueira-macadâmia em consórcio com café arábica irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 11, p. 1613-1620, nov. 2012.
- PEZZOPANE, J. R. M. et al. Alterações microclimáticas em cultivo de café conilon arborizado com coqueiro-anão-verde. **Revista Ciência Agronômica**, Campinas, v. 42, n. 4, p. 865-871, out./dez. 2011.
- \_\_\_\_\_. Avaliações fenológicas e agronômicas em café arábica cultivado a pleno sol e consorciado com banana prata anã. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 701-709, 2007.
- \_\_\_\_\_. Condições microclimáticas em cultivo de café conilon a pleno sol e arborizado com noqueira macadâmia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 6, p. 1257-1263, jun. 2010.
- POMPELLI, M. F. et al. Photosynthesis and photoprotection in coffee leaves is affected by nitrogen and light availabilities in winter conditions. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 167, n. 13, p. 1052-1060, Sept. 2010.
- R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2014. Software.
- RICCI, M. S. F.; COSTA, J. R.; OLIVEIRA, N. G. Utilização de componentes principais para analisar o comportamento do café a pleno sol e sombreado. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 44-54, jan./abr. 2011.
- ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1974, Greenbelt. **Proceedings...** Greenbelt: NASA SP-351, 1974. p. 301-317.
- SILES, P.; HARMAND, J. M.; VAAST, P. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 78, n. 3, p. 269-286, Mar. 2010.
- VENTURIN, N. et al. Desempenho silvicultural de *Acrocarpus fraxinifolius* Wight em função de diferentes espaçamentos e idades. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 4, p. 629-636, out./dez. 2014.