



DANIELLE PEREIRA BALIZA

**CAFEEIROS EM FORMAÇÃO E PRODUÇÃO
EM DIFERENTES NÍVEIS DE RADIAÇÃO:
CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS**

LAVRAS - MG

2011

DANIELLE PEREIRA BALIZA

**CAFEEIROS EM FORMAÇÃO E PRODUÇÃO EM DIFERENTES
NÍVEIS DE RADIAÇÃO: CARACTERÍSTICAS
MORFOFISIOLÓGICAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Rubens José Guimarães

Coorientador

Dr. Rodrigo Luz da Cunha

LAVRAS - MG

2011

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Baliza, Danielle Pereira.

Cafeeiros em formação e produção em diferentes níveis de radiação : características morfofisiológicas / Danielle Pereira Baliza.

– Lavras : UFLA, 2011.

97 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Rubens José Guimarães.

Bibliografia.

1. *Coffea arabica* L. 2. Ecofisiologia. 3. Sombreamento. 4. Sistemas agroflorestais. 5. Radiação solar. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 633.738

DANIELLE PEREIRA BALIZA

**CAFEEIROS EM FORMAÇÃO E PRODUÇÃO EM DIFERENTES
NÍVEIS DE RADIAÇÃO: CARACTERÍSTICAS
MORFOFISIOLÓGICAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 09 de novembro de 2011.

Dr. Rodrigo Luz da Cunha EPAMIG

Dr. Evaristo Mauro de Castro UFLA

Dr. Virgílio Anastácio da Silva UFLA

Dr. Leandro Carlos Paiva IFSULDEMINAS Sul de Minas

Dr. Rubens José Guimarães

Orientador

LAVRAS – MG

2011

A todos os professores, que não só contribuem para a formação profissional de seus alunos, mas também para a formação desses como Seres Humanos. Formando pessoas éticas e comprometidas com o bem-estar das outras pessoas e do meio ambiente.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as oportunidades de aperfeiçoamento que surgem em minha caminhada. Em especial ao meu Anjo da Guarda que sempre me inspira ações e pensamentos, principalmente nos momentos mais difíceis.

Ao meu pai, Lincoln Ribeiro Balisa e a minha mãe Marli Helena Freire, os quais sempre me incentivam na busca pelos meus sonhos, me suportando nos momentos de dificuldades e compartilhando dos momentos felizes.

À minhas irmãs e amigas Michelle e Lívia.

Ao meu esposo Rodrigo que compreende minha ausência em função dos estudos, e me apoia sempre que preciso.

Aos professores, da Escola Cenecista Dulce Oliveira de Perdões e da Universidade Federal de Lavras, que contribuíram para minha formação profissional e pessoal, e me ensinaram as inúmeras possibilidades que se conquistam por meio da Educação.

Ao meu orientador, professor Rubens José Guimarães, que admiro e tenho como exemplo de profissional e de ser humano a ser seguido, agradeço pela orientação, pelas oportunidades, e por confiar em meu trabalho.

Ao professor Samuel Pereira de Carvalho, pela oportunidade da docência voluntária e dos demais trabalhos realizados em conjunto, em nome do qual agradeço aos demais professores com os quais, em momentos do curso tive a oportunidade de realizar trabalhos extras que contribuíram para minha formação profissional.

Ao pesquisador Rodrigo Luz da Cunha, pela coorientação e contribuições significativas neste trabalho.

Ao professor Evaristo Mauro de Castro, pela ajuda em equipamentos, laboratório e principalmente pela contribuição profissional inestimável.

Ao gerente do Polo de Excelência do Café, Edinaldo José Abrahão, pela amizade e valiosas contribuições.

A disponibilidade da pesquisadora Myriane Stella Scalco e dos professores Leandro Carlos Paiva, Virgílio Anastácio da Silva e Renato Mendes Guimarães.

Aos amigos dos Departamentos de Agricultura e Biologia, em especial aos do CEPECAFÉ e do NECAF, por todas as colaborações.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do Café (INCT Café), pelo auxílio financeiro na condução dos experimentos.

A todos que contribuíram para que este trabalho fosse realizado com sucesso, **muito obrigada!!!**

RESUMO

O sombreamento dos cafeeiros tem sido indicado para regiões com condições desfavoráveis de ambiente e manejo. Atualmente, no Brasil há uma grande demanda de conhecimentos sobre este sistema de cultivo. Objetivou-se avaliar os mecanismos morfológicos e fisiológicos de cafeeiros em formação e produção, cultivados sob diferentes níveis de radiação (pleno sol e sob telas plásticas/sombrites com 35, 50, 65 e 90% de sombra). O primeiro experimento foi constituído por cafeeiros em fase de formação, sendo avaliados nas estações seca e chuvosa as características morfofisiológicas e a incidência de cercosporiose. Em condições de alta luminosidade e baixa disponibilidade de água, as folhas do cafeeiro têm maior espessamento da cutícula da face adaxial. O aumento da disponibilidade de radiação provoca aumento da espessura foliar e da densidade estomática, além de redução no tamanho dos estômatos de cafeeiros em fase de formação. Essas modificações favorecem potencialmente o processo fotossintético até o nível com 65% de sombra, sendo o nível com 30% de sombra o mais indicado. A cada 10% de aumento no nível do sombreamento há redução em cerca de 5% na taxa fotossintética e de 10% na incidência da cercosporiose em cafeeiros em fase de formação. O segundo experimento foi realizado em lavoura, em fase de produção, onde foram avaliadas as características de trocas gasosas, teores de clorofilas, teor de nitrogênio e anatomia foliar nas estações chuvosa e seca. Em cafeeiros, em fase de produção, os níveis de radiação pouco modificam o teor total de clorofila e a proporção de clorofilas a/b. O aumento da disponibilidade de radiação provoca aumento da espessura foliar e da densidade estomática, além de redução no tamanho dos estômatos de cafeeiros em fase de produção. Essas modificações favorecem potencialmente o processo fotossintético até o nível com 50% de sombra, sendo mais indicado o nível com cerca de 20% de sombra. A maior taxa fotossintética ocorre nos níveis com 21% e 26% de sombra, em condições de baixa e alta disponibilidade de água no solo, respectivamente.

Palavras-chave: *Coffea arabica*. Sombreamento. Ecofisiologia. Sistemas Agroflorestais.

ABSTRACT

The coffee trees shading has been indicated for regions under unfavorable environmental and management conditions. Currently there is in Brazil a great demand for knowledge about this culture system. The aim was to evaluate the morphological and physiological mechanisms of the formation and production of coffee trees grown under different radiation levels (full sunlight and plastic screens/sombrites with 35, 50, 65 and 90% shade). The first experiment was made with coffee trees in formation phase, the morphological-physiological characteristics and the incidence of cercosporiosis evaluated during the dry and rainy seasons. Under high luminosity and low water availability conditions, the coffee leaves have greater thickness of the cuticle adaxial face. The increase of the radiation availability causes the increase of the leaf thickness and stomata density, besides the reduction of the stomata size of coffee trees in formation phase. These changes potentially favour the photosynthesis process up to the 65% shade level, the 30% shade level being the most recommended. At each 10% increase in the shade level, there is reduction of about 5% in the photosynthesis rate and 10% in the cercosporiosis incidence in coffee trees in the formation phase. The second experiment was carried out in crop production phase where the gas exchange characteristics, chlorophyll content, nitrogen content and leaf anatomy in the rainy and dry seasons were evaluated. In coffee trees in production phase the radiation levels change very little in the chlorophyll full content and the a/b chlorophylls proportion. The increase of the radiation availability causes the increase of the leaf thickness and stomata density, besides the reduction in the stomata size of coffee trees in the production phase. These changes potentially favour the photosynthesis process up to 50% shade level, the 20% shade level being the most recommended. The highest photosynthesis rate occurs in 21% and 26% shade levels, under low and high water availability in the soil, respectively.

Keywords: *Coffea arabica*. Shading. Echophysiology. Agroforestry Systems.

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 2

- Figura 1 Densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA) (a), taxa fotossintética (A) (b), condutância estomática (gs) (c) e transpiração (E) (d) em cafeeiros em formação sob diferentes níveis de radiação, durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média..... 43
- Figura 2 Figura 2. Fotomicrografias de seções transversais de folhas de cafeeiros em formação sob diferentes níveis de radiação, na estação seca e chuvosa (A – 90% de sombra em época chuvosa; B – pleno sol em época chuvosa; C – 90% de sombra em época seca; D – pleno sol em época seca). Barra = 50 μm.. 46
- Figura 3 Espessura dos tecidos foliares (limbo foliar (LIM) (a), parênquima paliçádico (PPA) (b), cutícula da face adaxial (CTA) (c), epiderme da face adaxial (EAD) (d) e epiderme da face abaxial (EAB) (e)) de cafeeiros em formação sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média..... 47
- Figura 4 Densidade estomática (DE) (a), diâmetro polar dos estômatos (DPE) (b), diâmetro equatorial dos estômatos (DEE) (c) e relação diâmetro polar e equatorial dos estômatos (DPE/DEE) (d) em cafeeiros em formação, sob diferentes níveis de radiação, durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média..... 51
- Figura 5 Equação de regressão e coeficiente de determinação para as variáveis taxa fotossintética (A) (a), espessura do limbo foliar (LIM) (b), espessura do parênquima paliçádico (PPA) (c) e densidade estomática (DE) (d) em cafeeiros em formação, sob diferentes níveis de radiação, durante a estação seca (○) e chuvosa (●)..... 54
- Figura 6 Equações de regressão e coeficientes de determinação para as variáveis altura de planta (a), número de ramos plagiotrópicos (b) e diâmetro do caule (c) de cafeeiros em formação, sob diferentes níveis de radiação, durante a estação seca (○) e chuvosa (●)..... 56
- Figura 7 Equação de regressão e coeficiente de determinação para a variável área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD), em cafeeiros em formação, sob diferentes níveis de

	radiação.....	58
CAPITULO 3		
Figura 1	Densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA) em cafeeiros em produção, sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média.....	74
Figura 2	Taxa fotossintética (A) (a), condutância estomática (gs) (b), transpiração (E) (c) e eficiência do uso da água (A/E) (d) em cafeeiros em produção, sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média.....	76
Figura 3	Teor de clorofila total (Chl a+b) (a), razão entre clorofilas a/b (Chl a/b) (b) e teor de nitrogênio foliar (N) (c) em cafeeiros em produção, sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média.....	80
Figura 4	Espessura dos tecidos foliares (limbo foliar (LIM) (a), parênquima paliçádico (PPA) (b), cutícula da face adaxial (CTA) (c), epiderme da face adaxial (EAD) (d) e epiderme da face abaxial (EAB) (e)) de cafeeiros em produção sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média.....	82
Figura 5	Fotomicrografias de secções paradérmicas de folhas de cafeeiros em produção, sob diferentes níveis de radiação (A – 90% de sombra; B – pleno sol). Barra = 50 μm.....	85
Figura 6	Densidade estomática (DE) (a), diâmetro polar dos estômatos (DPE) (b), diâmetro equatorial dos estômatos (DEE) (c) e relação diâmetro polar e equatorial dos estômatos (DPE/DEE) (d) em cafeeiros em produção, sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média.....	86
Figura 7	Equação de regressão e coeficiente de determinação para as variáveis taxa fotossintética (A) (a), espessura do limbo foliar (LIM) (b), espessura do parênquima paliçádico (PPA) (c) e densidade estomática (DE) (d) em cafeeiros em produção, sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●).....	88

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL.....	13
1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	Cultivo do cafeeiro em sistema agroflorestal.....	17
2.2	Efeito da luz na fisiologia e anatomia.....	19
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	25
	REFERÊNCIAS.....	27
	CAPÍTULO 2 CAFEEIROS EM FORMAÇÃO EM DIFERENTES NÍVEIS DE RADIAÇÃO: CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS E INCIDÊNCIA DE CERCOSPORIOSE.....	34
1	INTRODUÇÃO.....	37
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4	CONCLUSÃO.....	60
	AGRADECIMENTOS.....	61
	REFERÊNCIAS.....	62
	CAPÍTULO 3 CAFEEIROS EM PRODUÇÃO EM DIFERENTES NÍVEIS DE RADIAÇÃO: CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS.....	66
1	INTRODUÇÃO.....	69
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	71
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
4	CONCLUSÃO.....	91
	AGRADECIMENTOS.....	92
	REFERÊNCIAS.....	93

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

O café (*Coffea arabica* L.) é originário das florestas tropicais da Etiópia (latitude de 6 - 9°N, altitude de 1600 – 2800 m) com temperaturas anuais médias em torno de 20°C, chuvas bem distribuídas durante o ano (1500 – 2500 mm) e estação seca com duração de 2 – 3 meses (DAMATTA, 2004). Em vários países produtores de café, tais como Colômbia, Venezuela, Costa Rica, Panamá e México, o sombreamento dos cafeeiros tem sido muito utilizado pelos cafeicultores (RICCI et al., 2006).

As lavouras cafeeiras sombreadas no México, na América Central e na Colômbia são plantadas em solos vulcânicos, férteis e levemente ácidos e porosos, que permitem a produção de café de alta qualidade. Essas lavouras encontram-se em altitudes marginais para o cultivo da cultura em pleno sol, e pelas suas condições climáticas torna-se indispensável o uso do sombreamento por meio de sistemas agroflorestais (JARAMILLO-BOTERO; MARTINEZ; SANTOS, 2006).

O uso de sistemas agroflorestais pode induzir vantagens sócioeconômicas, principalmente para os pequenos e médios produtores rurais (BEER et al., 1998; DAMATTA, 2004; SAES; SOUZA; OTANI, 2003; SANTOS et al., 2000). No cultivo de cafeeiros com espécies arbóreas, o cafeeiro cresce e produz sob a sombra dessas espécies, o que proporciona reduções significativas nos custos de produção por área, por permitir a exploração de outro produto comercial (frutas, látex, madeira, lenha entre outros) numa mesma área de cultivo, diminui a dependência de insumos externos devido à maior ciclagem de nutrientes decorrente da queda de folhas e galhos, além de permitir que o produto seja diferenciado, abrindo novas opções de mercado e de preços (DAMATTA, 2004; DAMATTA et al., 2007; GROSSMAN, 2003; LIMA et al., 2010; SAES; SOUZA; OTANI, 2003).

No Brasil, o café é tradicionalmente cultivado em pleno sol. Cafeicultores alegam que o sombreamento da lavoura cafeeira geralmente diminui a produtividade, aumenta a mão de obra, dificulta a mecanização, entre outras razões, motivos pelos quais estima-se que as lavouras a pleno sol representem mais de 90% das lavouras existentes (RICCI; FERNANDES; CASTRO, 2002). É o caso das regiões Sudeste e Sul, onde o sombreamento é menos frequente, sendo as espécies arbóreas geralmente utilizadas para proteger o cafeeiro das geadas ou cultivadas pelo seu alto valor econômico. Enquanto que nas regiões Norte e Nordeste do País, o café sombreado encontra-se mais difundido (JARAMILLO-BOTERO; MARTINEZ; SANTOS, 2006).

Beer et al. (1998), Damatta (2004) e Damatta et al. (2007) mencionam que o sombreamento de cafeeiros apenas se justifica quando o cultivo se faz em áreas consideradas marginais à cafeicultura, como em baixas altitudes, regiões muito frias ou muito quentes, com seca prolongada ou com ocorrência de ventos fortes, ou seja, em condições adversas que possam limitar a exploração bem sucedida da cultura do café. No entanto, em outros estudos conduzidos em plantios envolvendo o cafeeiro e espécies arbóreas, os resultados obtidos, em geral, demonstram que existem vantagens para o cafeeiro e para o ambiente, mesmo em ótimas condições para a cafeicultura (BARBOSA, 2005; JARAMILLO-BOTERO; MARTINEZ; SANTOS, 2006; SCHALLER et al., 2003; SOTO-PINTO; PERFECTO; CABALLERO-NIETO, 2002).

Atualmente, no Brasil existe uma grande controvérsia sobre a produção de café em sistemas agroflorestais e há uma grande demanda de conhecimento sobre esse assunto (JARAMILLO-BOTERO; MARTINEZ; SANTOS, 2006). Nesses sistemas de cultivo, o nível de sombreamento sobre os cafeeiros não deve ser excessivo para não reduzir a produtividade dos mesmos e nem muito baixo para uma proteção eficaz contra condições ambientais adversas (KANTEN; VAAST, 2006). Praticamente inexiste uma associação clara entre a

porcentagem de sombreamento e o real bloqueio de radiação fotossinteticamente ativa (JARAMILLO-BOTERO; MARTINEZ; SANTOS, 2006). Assim, torna-se necessário conhecer a influência dos diferentes níveis de sombreamento para se determinar níveis ótimos de radiação solar, ou seja, níveis que proporcionem melhor desenvolvimento e produção dos cafeeiros em ambientes sombreados.

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar os mecanismos morfológicos e fisiológicos de cafeeiros em formação e produção, cultivados sob diferentes níveis de radiação (pleno sol, 35, 50, 65 e 90% de sombra).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultivo do cafeeiro em sistema agroflorestal

Em condições naturais, o cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no seu centro de origem é encontrado sob sombreamento. Os primeiros cultivos com café procuraram manter o sombreamento simulando o habitat natural da espécie. No entanto, em muitas situações, o cafeeiro crescia e produzia melhor sem sombra. Dessa forma, o sombreamento foi sendo abandonado em várias regiões (CHAVES et al., 2008; DAMATTA et al., 2007), ao mesmo tempo em que as cultivares foram melhoradas geneticamente para apresentar alta produção em condições de pleno sol (DAMATTA, 2004; GOMES et al., 2008; KANTEN; VAAST, 2006).

No Brasil, na década de 1950 o sombreamento dos cafeeiros foi abandonado na maior parte das regiões produtoras (DAMATTA, 2004), ficando restrito à proteção das mudas implantadas em campo (GRANER; GODOY JÚNIOR, 1967), e em lavouras instaladas nas regiões Norte e Nordeste. No começo da década de 1960 foram eliminadas grandes áreas de café com o objetivo de diminuir a superprodução e posteriormente, na década de 1970, algumas dessas áreas nas regiões Norte e Nordeste foram substituídas por café a pleno sol. Esses cafeeiros rapidamente se converteram em improdutivos devido às condições climáticas dessas regiões e enquanto muitos agricultores desistiram da cultura, outros voltaram a cultivar o café sombreado (MATSUMOTO; VIANA, 2004). Nas décadas de 1970 e 1980, a cafeicultura manejada a pleno sol, estendeu-se para o Sul de Minas e Triângulo Mineiro, estado de Minas Gerais, onde encontrou condições climáticas muito favoráveis para sua produção econômica, tornando-se o Estado com maior produção de café, no Brasil (MATIELLO et al., 2002). Nessas regiões, os cafezais mantidos a pleno sol

encontravam elevada potencialidade de produção, ao mesmo tempo em que demandavam maior quantidade de nutrientes (CAMARGO, 1985; FAHL et al., 1994). Os cafeicultores que buscavam explorar toda essa potencialidade e aumentar a produtividade utilizavam cada vez mais insumos e práticas de manejo que encareciam o produto final (LIMA et al., 2010).

No Norte da América Latina, a recuperação da antiga prática do sombreamento começou nos anos noventa, quando a crise do preço internacional do grão forçou os países produtores a desenhar estratégias de recuperação econômica. Uma das propostas foi incentivar a expansão do café sombreado com o objetivo de reduzir a produção e os custos por área (LYNGBÆK; MUSCHLER; SINCLAIR, 2001). Também foram consideradas outras vantagens como a geração de serviços ambientais e a melhoria das condições socioeconômicas dos agricultores, através da produção de cafés especiais, que têm preços diferenciados dos mercados de *commodities* (JARAMILLO-BOTERO; MARTINEZ; SANTOS, 2006).

Atualmente, o uso de sistemas de cultivo agrícola que favoreçam a conservação dos recursos naturais e a diversidade de produção representa uma alternativa para os produtores que visam menores custos por área e uma produção sustentável. Dentre esses sistemas de produção destacam-se os sistemas agroflorestais (OLIVEIRA et al., 2006).

Existem vários tipos de produção de café em sistema agroflorestal. No Brasil, o café sombreado apresenta baixa diversidade de espécies arbóreas. As espécies mais utilizadas são a grevilea (*Grevillea robusta* A. Cunn) e a seringueira (*Hevea brasiliensis* Mull. Arg.), embora outras espécies venham sendo estudadas. Na região de Vitória da Conquista, no estado da Bahia, a grevilea tem sido muito utilizada pelo seu efeito protetor contra ventos secos (MATSUMOTO; VIANA, 2004). Nessas condições, o espaçamento mais indicado para plantar as grevileas é de 6 x 12 m, maiores espaçamentos causam

queda na produção dos cafeeiros, pela eliminação do efeito positivo das árvores. No Paraná, cafeeiros consorciados com bananeira apresentaram aumento na produção com o aumento da distância das fruteiras, possivelmente pela redução da competição entre as espécies (CAMARORI et al., 2005). No norte desse Estado foi observado o efeito protetor da grevilea contra geadas, quando plantadas mais de 71 árvores por hectare. Esses cafeeiros apresentaram maior produção que os plantados a pleno sol (BAGGIO et al., 1997). No Paraná foi observada queda significativa na produção do café, a partir do sexto ano, quando se inicia a sangria da seringueira. Contudo, isso pode representar uma interessante sincronia de renda para os agricultores (PEREIRA et al., 2001).

No Distrito Federal, os cafeeiros adensados, consorciados com Mogno (*Swietenia macrophylla* King.) têm apresentado alta produção (MELO; GUIMARÃES, 2000). Por outro lado, cafeeiros sob mata nativa apresentam produção extremamente baixa em Minas Gerais (CAMPANHA et al., 2004).

Esses sistemas de produção diferem em relação às espécies arbóreas que podem ser cultivadas com o cafeeiro, além das diversas possibilidades de arranjo e manejo que podem ser adotados. Devido à grande diversidade e complexidade desses sistemas, verifica-se uma grande dificuldade em sistematizar e comparar os estudos com café sombreado no Brasil (BARBOSA, 2005).

2.2 Efeito da luz na fisiologia e anatomia

Uma variedade de fatores ambientais, especialmente a disponibilidade de luz, pode causar modificações nas características estruturais e funcionais das folhas, culminando com alterações no padrão de crescimento e produção das plantas. Plantas que apresentam plasticidade morfofisiológica, ou seja, capacidade de aclimação a diferentes condições de ambiente, são capazes de responder diferencialmente a níveis de radiação no ambiente por meio de modificações nas características bioquímicas e morfológicas (GOMES et al.,

2008; OGUCHI; HIKOSAKA; HIROSE, 2005; PANDEY; KUSHWAHA, 2005).

Folhas de sol e sombra têm algumas características contrastantes. Em ambientes com abundância de luz (folhas de sol), as folhas tendem a ter mais rubisco e um *pool* de componentes do ciclo da xantofila maior que as folhas de sombra. Já as folhas expostas à baixa luminosidade (folhas de sombra), têm mais clorofila por cento de reação, a razão entre clorofila *b* e clorofila *a* é mais alta e geralmente elas são mais finas do que as folhas de sol (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Características anatômicas contrastantes também podem ser encontradas em folhas expostas a regimes de radiação diferentes. As folhas de sol apresentam-se com maior número de tricomas e maior deposição de cera epicuticular. Essas mudanças adaptativas favorecem o aumento da reflexão da luz pela superfície foliar, reduzindo a absorção luminosa. O aumento da intensidade luminosa proporciona aumento na espessura da folha, especialmente, quando acarretado pelo alongamento ou adição de células do parênquima paliçádico, relacionadas à redução na resistência do mesofilo ao dióxido de carbono e correlacionadas com o aumento de fatores que limitam potencialmente o processo fotossintético, como a atividade enzimática, transporte de elétrons e condutância estomática. Diversos trabalhos também indicam diferenças nos níveis de intensidade luminosa influenciando mudanças significativas na densidade estomática, número e tamanho das células epidérmicas, tamanho dos espaços intercelulares, esclerificação de tecidos e na disposição e na quantidade de tecido vascular formado. Dentre esses fatores, os estômatos apresentam grande importância em estudos anatômicos, uma vez que o aumento da frequência estomática em folhas expostas a elevada radiação pode ser um mecanismo importante de adaptação das espécies a condições mais áridas (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009).

Essas modificações morfológicas e bioquímicas estão associadas a funções específicas, como a fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2009). A fotossíntese pode variar de acordo com o ambiente onde a planta se encontra, e, as duas principais limitações ambientais para a taxa fotossintética são a disponibilidade de CO₂ e de luz (ZHOU; HAN, 2005).

As plantas que crescem sob luz solar plena apresentam aumentos na fotossíntese, quando comparadas com as plantas que crescem à sombra (TAIZ; ZEIGER, 2009). No entanto, uma elevada incidência de luz, acima da capacidade de utilização pela fotossíntese, pode resultar na produção excessiva de NADPH e ATP, levando as plantas a uma condição de estresse conhecida como fotoinibição (BARBER; ANDERSON, 1992). Assim, quando expostas ao excesso de luz, as folhas devem dissipar o excedente de energia luminosa absorvido, de modo que ele não prejudique o aparelho fotossintético (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Em cultivos de cafeeiros sombreados, observa-se que as plantas devem adaptar-se à baixa disponibilidade de radiação e, por isso, em geral, apresentam menores taxas fotossintéticas (ARAUJO et al., 2008; CHAVES et al., 2008; FAHL et al., 1994; FRIEND, 1984; GOMES et al., 2008; MORAIS et al., 2003; NASCIMENTO et al., 2006). Porém, alguns autores apontam que cafeeiros sob sombra apresentam maiores taxas fotossintéticas (FREITAS et al., 2003; KUMAR; TIESZEN, 1980; PAIVA, 2001). Kumar e Tieszen (1980), por exemplo, verificaram que a taxa fotossintética de plantas sombreadas é quase o dobro das plantas em pleno sol. Essa modificação pode ser explicada, pelo menos em parte, por Damatta (2004) para quem desde que a abertura estomática não seja limitante, a taxa de fotossíntese líquida do cafeeiro parece ser maior a pleno sol que à sombra, sendo as folhas sombreadas limitadas pela baixa disponibilidade de radiação e não pela condutância estomática.

O cafeeiro apresenta irradiância de saturação normalmente baixa, entre 300 a 600 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (FAHL et al., 1994; KUMAR; TIESZEN, 1980). No entanto, em folhas de cafeeiros a pleno sol uma vez que atinja a irradiância de saturação, a fotossíntese prosseguirá sem decréscimos substanciais até cerca de 1200 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (KUMAR; TIESZEN, 1980) ou mesmo 1.400 $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (RAMALHO et al., 2000). Isso pressupõe que o *Coffea arabica* L. tenha mecanismos para dissipar, termicamente ou por vias não fotoquímicas, o excesso de energia incidente, o que explicaria, em parte, a plasticidade relativamente elevada de sua maquinaria fotossintética às variações da luminosidade (DAMATTA, 2004; DAMATTA; RENA, 2002).

A pleno sol, os cafeeiros bem adubados devem dissipar satisfatoriamente o excesso de energia que recebem e, portanto, danos fotooxidativos conhecidos como escaldadura, caso ocorrentes, devem afetar apenas marginalmente a produção do cafezal, concentrando-se principalmente na folhagem mais exposta à radiação (DAMATTA; RENA, 2002). Isso explicaria, pelo menos em parte, o sucesso do cultivo do café a pleno sol, ainda que a espécie seja originalmente de ambientes sombreados. Por outro lado, sob certas condições, a ocorrência de escaldadura pode ser bastante expressiva, sendo agravada por adubação inadequada, carga pesada de frutos, déficit hídrico e extremos de temperaturas, ou qualquer outro fator que leve ao depauperamento da planta, culminando, em última análise, com a abscisão da folha. Nessas condições, a incidência de bicho-mineiro, cercóspora e ferrugem usualmente aumentam, também levando à abscisão foliar. Desse modo, não somente a folhagem exposta, mas também as folhas mais internas da copa passam a receber mais irradiância superior à necessária para saturar a fotossíntese, o que potencializa ainda mais a abscisão das folhas. Em muitos casos, o ramo seca ou pouco cresce, acarretando quebra de produção na colheita seguinte. O sombreamento, nesse contexto, poderia

minimizar, sobretudo, a ocorrência da escaldadura, especialmente se associado à irrigação (DAMATTA; RENA; CARVALHO, 2008).

Além de ter potencialmente maior taxa fotossintética em folhas de sol do que em folhas sombreadas, o cafeeiro exhibe outras modificações bioquímicas indicativas de adaptação a altas radiações, como por exemplo: redução da área foliar específica, aumento da irradiância de saturação, cloroplastos com menos *grana* e menos tilacóide por *granum* (FAHL et al., 1994), aumento na quantidade e na atividade da Rubisco (RAMALHO et al., 1999) e reversão da fotoinibição relativamente rápida (DAMATTA; MAESTRI, 1997).

Estudos com folhas de cafeeiros expostas a regimes de luz diferentes demonstram sua aclimatação a essas variações por meio das modificações de suas características anatômicas (GOMES et al., 2008; MORAIS et al., 2004; NASCIMENTO et al., 2006; PAIVA, 2001; VOLTAN; FAHL; CARELLI, 1992).

Voltan, Fahl e Carelli (1992) avaliaram três níveis de luminosidade (0, 50 e 80% de sombra), sobre a anatomia foliar de mudas cafeeiras cultivadas em viveiro, verificaram que, em condições de maior intensidade luminosa ocorreu um espessamento foliar promovido principalmente pela expansão de células do mesofilo. Ocorreu também um aumento do número de estômatos por unidade de área foliar.

Trabalhando também com mudas de café em viveiro, Paiva (2001) não observou diferenças na espessura da epiderme e do parênquima paliçádico entre os diferentes níveis de radiação (0, 30, 50 e 90% de sombra). Verificou aumento dos espaços entre as células com o aumento do sombreamento. E, em relação ao número de estômatos, as maiores médias ocorreram a pleno sol, 30 e 50% de sombra, sem diferença significativa entre eles, sendo os menores valores apresentados a 90% de sombra.

Gomes et al. (2008), Morais et al. (2004) e Nascimento et al. (2006) em trabalhos com cafeeiros consorciados com *Cajanus cajan*, *Hevea brasiliensis* e *Acacia mangium*, respectivamente, verificaram que os cafeeiros em monocultivo apresentaram médias superiores de espessura dos parênquimas paliçádico e lacunoso, do limbo foliar, além de maior número de estômatos. Já Oliveira et al. (2004), avaliando o consórcio de cafeeiros com *Hevea brasiliensis* na fase de estabelecimento do plantio, em geral não verificaram influência do sistema de cultivo na anatomia foliar dos cafeeiros.

Estudos que associem as estruturas anatômicas com suas respectivas funções podem ajudar no esclarecimento dos mecanismos associados à plasticidade morfológica de cafeeiros, quando submetidos em diferentes ambientes e níveis de radiação. Para o cafeeiro, embora existam trabalhos que estudam a influência da intensidade luminosa na anatomia foliar (GOMES et al., 2008; MORAIS et al., 2004; NASCIMENTO et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2004; PAIVA, 2001; VOLTAN; FAHL; CARELLI, 1992) são poucos os estudos que associam as características anatômicas com suas funções fisiológicas (GOMES et al., 2008; MORAIS et al., 2004; NASCIMENTO et al., 2006; PAIVA, 2001). Mesmo assim, os estudos que fazem essa associação foram realizados em viveiros ou com cafeeiros consorciados com espécies arbóreas em campo, nos quais não foi possível avaliar a partir de qual nível o sombreamento passou a ser desvantajoso para o desenvolvimento dos cafeeiros, em condições de campo.

3. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O sombreamento de cafeeiros por meio de consórcio com espécies arbóreas possibilita a instalação de cafezais em áreas consideradas marginais à cafeicultura, como em baixas altitudes, regiões muito quentes ou muito frias, com seca prolongada ou com ocorrência de geadas e ventos fortes. Além disso, este sistema de cultivo pode diminuir a dependência de insumos externos devido à maior reciclagem de nutrientes decorrente da queda de folhas e galhos, além de favorecer a conservação dos recursos naturais da propriedade, tais como solo, água e biodiversidade. Agricultores que têm investido em cultivos alternativos, têm produzido cafés de melhor qualidade (SOUZA et al., 2011), que possuem mercados mais rentáveis que o café cultivado a pleno sol. Além disso, ao promover-se a diversificação da produção, há a garantia de maior estabilidade econômica e sustentabilidade de seus sistemas produtivos (LIMA et al., 2010).

No entanto, no Brasil existe uma grande dificuldade para sistematizar e comparar as experiências de café sombreado (JARAMILLO-BOTERO; MARTINEZ; SANTOS, 2006), o que resulta em controvérsia, principalmente, sobre a produção de café em sistemas sombreados (DAMATTA; RENA, 2002). Para que ocorra o aperfeiçoamento desse sistema de produção são necessários mais estudos, sendo fundamental a definição de níveis de radiação que favoreçam o desenvolvimento e a produtividade dos cafeeiros, em ambiente sombreado (LIMA et al., 2010).

Considerando-se que 90-95% da massa seca das plantas derivam-se da fotossíntese, não é difícil perceber que a produção depende, direta ou indiretamente, da magnitude das taxas fotossintéticas, apesar de, em muitos casos, não se observar relação linear e clara entre produção e taxas de fotossíntese (DAMATTA; RENA, 2002). A disponibilidade de luz no ambiente provoca modificações na anatomia foliar das plantas que podem limitar ou

favorecer potencialmente o processo fotossintético (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). Espera-se que estudos que relacionem as estruturas anatômicas com suas respectivas funções fisiológicas auxiliem na recomendação dos níveis de radiação a serem utilizados em ambientes sombreados, uma vez que a quantidade de radiação incidente é importante para o desenvolvimento da estrutura interna das folhas do cafeeiro que podem favorecer as características fisiológicas necessárias para otimizar o desenvolvimento e a produtividade dessa cultura, em ambiente sombreado.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, W. L. et al. Limitations to photosynthesis in coffee leaves from different canopy positions. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 46, n. 10, p. 884-890, 2008.

BAGGIO, A. J. et al. Productivity of southern coffee plantations shaded by different stockings of *Grevillea robusta*. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 37, n. 2, p. 111-120, June 1997.

BARBER, J.; ANDERSON, B. Too much of a good thing: light can be bad for photosynthesis. **Trends in Biochemical Science**, Oxford, v. 17, n. 2, p. 61-66, Apr. 1992.

BARBOSA, J. P. R. A. D. **Aspectos ecofisiológicos de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) em produção arborizados com diferentes leguminosas no Sul de Minas Gerais**. 2005. 104 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

BEER, J. et al. Shade management in coffee and cacao plantations. **Agroforestry Systems**, Amsterdam, v. 38, n. 1/3, p. 139-164, Jan./Mar. 1998.

CAMARGO, A. P. Clima e a cafeicultura no Brasil. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 11, n. 126, p. 13-16, 1985.

CAMPANHA, M. M. et al. Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 63, n. 1, p. 75-82, Jan. 2004.

CARAMORI, P. H. et al. Influência da consorciação com banana nas duas primeiras produções de café no norte do Paraná. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4., 2005, Londrina. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2005. 1 CD-ROM.

CASTRO, E. M. de; PEREIRA, F. J.; PAIVA, R. **Histologia vegetal: estrutura e função de órgãos vegetativos**. Lavras: UFLA, 2009. 234 p.

CHAVES, A. R. M. et al. Seasonal changes in photoprotective mechanisms of leaves from shaded and unshaded Field-grown coffee (*Coffea arabica* L.) trees. **Trees**, Santa Monica, v. 22, n. 3, p. 351-361, May 2008.

DAMATTA, F. M. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. **Field Crops Research**, Phoenix, v. 86, n. 2/3, p. 99-114, 2004.

DAMATTA, F. M. et al. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 19, n. 4, p. 485-510, July/Aug. 2007.

DAMATTA, F. M.; MAESTRI, M. Photoinhibition and recovery of photosynthesis in *Coffea arabica* and *C. canephora*. **Photosynthetica**, Praha, v. 34, n. 3, p. 439-446, June 1997.

DAMATTA, F. M.; RENA, A. B. Ecofisiologia de cafezais sombreados e a pleno sol. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **O estado da arte de tecnologias na produção de café**. Viçosa, MG: UFV, 2002. p. 93-136.

DAMATTA, F. M.; RENA, A. B.; CARVALHO, C. H. S. Aspectos fisiológicos do crescimento e da produção do cafeeiro. In: CARVALHO, C. H. S. (Ed.). **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: EMBRAPA Café, 2008. p. 59-68.

FAHL, J. I. et al. Nitrogen and irradiance levels affecting net photosynthesis and growth of young coffee plants (*Coffea arabica* L.). **Journal of Horticultural Science**, Ashford, v. 69, n. 1, p. 161-169, Mar. 1994.

FREITAS, R. B. et al. Influência de diferentes níveis de sombreamento no comportamento fisiológico de cultivares de café (*Coffea arabica* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 4, p. 804-810, jul./ago. 2003.

FRIEND, D. J. C. Shade adaptation of photosynthesis in *Coffea arabica*. **Photosynthesis Research**, Dordrecht, v. 5, n. 4, p. 325-334, Aug. 1984.

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. 109-115, jan./fev. 2008.

GRANER, E. A.; GODOY JÚNIOR, C. **Manual do cafeicultor**. Piracicaba: ESALQ, 1967. 320 p.

GROSSMAN, J. M. Exploring farmer knowledge of soil processes in organic coffee systems of Chiapas, Mexico. **Geoderma**, Amsterdam, v. 111, n. 3/4, p. 267-287, Mar./Apr. 2003.

JARAMILLO-BOTERO, C.; MARTINEZ, H. E. P.; SANTOS, R. H. S. Características do café (*Coffea arabica* L.) sombreado no norte da América latina e no Brasil: análise comparativa. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 94-102, 2006.

KANTEN, R. V.; VAAST, P. Transpiration of arabica coffee and associated shade tree species in sub-optimal, low-altitude conditions of Costa Rica. **Agroforestry Systems**, Amsterdam, v. 67, n. 2, p. 187-202, Apr. 2006.

KUMAR, D.; TIESZEN, L. L. Photosynthesis in *Coffea Arabica*: I., effects of light and temperature. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 16, n. 1, p. 13-19, 1980.

LIMA, P. C. et al. Arborização de cafezais no Brasil. In: REIS, P. R.; CUNHA, R. L. (Ed.). **Café arábica: do plantio à colheita**. Lavras: EPAMIG, 2010. p. 863-895.

LYNGBAEK, A. E.; MUSCHLER, R. G.; SINCLAIR, F. L. Productivity and profitability of multistrata organic versus conventional coffee farms in Costa Rica. **Agroforestry Systems**, Amsterdam, v. 53, n. 22, p. 205-213, Nov. 2001.

MATIELLO, J. B. et al. **Cultura de café no Brasil: novo manual de recomendações**. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2002. 388 p.

MATSUMOTO, S. N.; VIANA, A. E. S. Arborização de cafezais na região nordeste. In: MATSUMOTO, S. N. (Org.). **Arborização de cafezais no Brasil**. Vitória da Conquista: ABEU, 2004. p. 168-195.

MELO, J. T. de; GUIMARÃES, D. P. A cultura do café em sistemas consorciados na região do cerrado. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Resumos Expandidos...** Brasília: EMBRAPA Café; Belo Horizonte: MINASPLAN, 2000. p. 1010-1013.

MORAIS, H. et al. Características fisiológicas e de crescimento de cafeeiro sombreado com guandu e cultivado a pleno sol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1131-1137, out. 2003.

_____. Modifications on leaf anatomy of *Coffea arabica* caused by shade of Pigeonpea (*Cajanus cajan*). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 47, n. 6, p. 863-871, Nov./Dec. 2004.

NASCIMENTO, E. A. do et al. Alterações morfofisiológicas em folhas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) consorciado com seringueira (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 852-857, maio/jun. 2006.

OGUCHI, R.; HIKOSAKA, K.; HIROSE, T. Leaf anatomy as a constraint for photosynthetic acclimation: differential responses in leaf anatomy to increasing growth irradiance among three deciduous trees. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 28, n. 7, p. 916-927, July 2005.

OLIVEIRA, C. R. M. et al. Crescimento e características anatômicas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) e seringueira (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.) em diferentes sistemas de cultivo: monocultivo e consórcio. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 2, p. 350-357, mar./abr. 2004.

_____. Trocas gasosas de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) e seringueiras (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) em diferentes sistemas de cultivo na região de Lavras, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 197-206, mar./abr. 2006.

PAIVA, L. C. **Produção de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em diferentes níveis de sombreamento e seus reflexos na implantação**. 2001. 55 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

PANDEY, S.; KUSHWAHA, R. Leaf anatomy and photosynthetic acclimation in *Valeria jatamansi* L. grown under high and low irradiance. **Photosynthetica**, Praha, v. 43, n. 1, p. 85-90, Jan. 2005.

PEREIRA, J. P. et al. Consorciação da seringueira e cafeeiro em fase terminal, efeito no desenvolvimento vegetativo da seringueira e produção do cafeeiro. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2., 2001, Vitória. **Anais...** Brasília: EMBRAPA Café, 2001. 1 CD-ROM.

RAMALHO, J. D. C. et al. Photosynthetic acclimation of high light conditions in mature leaves of *Coffea arabica* L.: role of xanthophylls, quenching mechanisms and nitrogen nutrition. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 27, n. 1, p. 43-51, Jan. 2000.

RAMALHO, J. D. C. et al. High irradiance impairments on photosynthetic electron transport, ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase and N assimilation as a function of N availability in *Coffea arabica* L. plants. **Journal of Plant Physiology**, Munich, v. 154, n. 3, p. 319-326, 1999.

RICCI, M. S. F. et al. Cultivo orgânico de cultivares de café a pleno sol e sombreado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 4, p. 569-575, abr. 2006.

RICCI, M. S. F.; FERNANDES, M. C. A.; CASTRO, M. C. **Cultivo orgânico do café: recomendações técnicas**. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2002. 101 p.

SAES, M. S. M.; SOUZA, M. C.; OTANI, M. N. Strategic alliances and sustainable coffee production: the shaded system of Baturite, state of Ceará, Brazil. **International Food and Agribusiness Management Review**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 19-29, 2003.

SANTOS, A. J. dos et al. Viabilidade econômica do sistema agroflorestal Grevílea x Café na região norte do Paraná. **Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 89-100, jan./mar. 2000.

SCHALLER, M. et al. Species and site characteristics that permit the association of fast-growing trees with crops: the case of *Eucalyptus degulata* as coffee shade in Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 175, n. 1/3, p. 205-215, Jan./Mar. 2003.

SOTO-PINTO, L.; PERFECTO, I.; CABALLERO-NIETO, J. C. Shade over coffee: its effects on berry borer, leaf rust and spontaneous herbs in Chiapas, México. **Agroforestry Systems**, Amsterdam, v. 55, n. 1, p. 37-45, Jan. 2002.

SOUZA, A. J. J. et al. Qualidade de bebida em café arborizado e a pleno sol, submetido a manejo de via úmida e via seca. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIEIRAS, 37., 2011, Poços de Caldas. **Anais...** Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2011. p. 279-281.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 4th ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 715 p.

VOLTAN, R. B. Q.; FAHL, J. I.; CARELLI, M. L. C. Variação na anatomia foliar de cafeeiros submetidos a diferentes intensidades luminosas. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 4, n. 2, p. 99-105, 1992.

ZHOU, Y. M.; HAN, S. J. Photosynthetic response and stomatal behaviour of *Pinus koraiensis* during the fourth year of exposure to elevated CO₂ concentration. **Photosynthetica**, Amsterdam, v. 43, n. 3, p. 445-449, 2005.

CAPITULO 2

**CAFEEIROS EM FORMAÇÃO EM DIFERENTES NÍVEIS DE
RADIAÇÃO: CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS E
INCIDÊNCIA DE CERCOSPORIOSE**

RESUMO

Diferenças na disponibilidade de radiação podem causar modificações na estrutura e funcionalidade das folhas do cafeeiro. Objetivou-se avaliar os mecanismos morfofisiológicos e a incidência de cercosporiose em cafeeiros em formação, sob diferentes níveis de radiação. Após o plantio em campo, os cafeeiros foram submetidos a cinco níveis de radiação (pleno sol e sob telas plásticas/sombrites com 35, 50, 65 e 90% de sombra). As avaliações das características morfofisiológicas e da incidência de cercosporiose foram iniciadas 10 meses após a instalação do ensaio em campo. Em condições de alta luminosidade e baixa disponibilidade de água, as folhas do cafeeiro têm maior espessamento da cutícula da face adaxial. O aumento da disponibilidade de radiação provoca aumento da espessura foliar e da densidade estomática, além de redução no tamanho dos estômatos de cafeeiros em fase de formação. Essas modificações favorecem potencialmente o processo fotossintético até o nível com 65% de sombra, sendo o nível com 30% de sombra o mais indicado. A cada 10% de aumento no nível do sombreamento há redução em cerca de 5% na taxa fotossintética e de 10% na incidência da cercosporiose em cafeeiros em fase de formação. Esses resultados demonstram que a quantidade de radiação incidente é importante para o desenvolvimento da estrutura interna das folhas do cafeeiro que podem favorecer características fisiológicas necessárias para otimizar o crescimento dessa cultura, em ambiente sombreado.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L. Plasticidade fenotípica. Fotossíntese.

ABSTRACT

Differences in the radiation availability may cause changes in the structure and functionality of coffee trees leaves. The aim of this paper was to evaluate the morphological mechanisms and the cercosporiosis incidence in coffee trees in formation under different radiation levels. After planted in the field, the coffee tree underwent five different radiation levels (full sunlight and plastic screens/sombrites at 35, 50, 65 and 90% shade levels). The evaluation of the morphological characteristics and cercosporiosis incidence begun 10 months after the installation in the test field. Under high luminosity and low water availability conditions, the coffee leaves have greater thickness of the cuticle adaxial face. The increase of the radiation availability causes the increase of the leaf thickness and stomata density, besides the reduction of the stomata size of coffee trees in formation phase. These changes potentially favour the photosynthesis process up to the 65% shade level, the 30% shade level being the most recommended. At each 10% increase in the shade level, there is reduction of about 5% in the photosynthesis rate and 10% in the cercosporiosis incidence in coffee trees in the formation phase. These results show that the amount of incident radiation is important for the development of the coffee leaves internal structure that may favor the physiological characteristics needed to optimize this culture growth under shade.

Keywords: *Coffea arabica* L. Phenotypical Plasticity. Photosynthesis.

1 INTRODUÇÃO

O cafeeiro (*Coffea arabica* L.) é originário das florestas tropicais da Etiópia, onde pode ser encontrado sob a proteção de árvores. Na América Central a utilização de sistemas agroflorestais na cafeicultura é uma técnica antiga e muito difundida. No Brasil, embora haja predomínio do cultivo a pleno sol, o uso de sistemas arborizados pode ser uma estratégia sustentável e economicamente viável, principalmente, aos pequenos agricultores que podem obter com esse tipo de cultivo redução dos custos de produção por área, além da renda alternativa das espécies arbóreas cultivadas com o cafeeiro (DAMATTA et al., 2007; GOMES et al., 2008; KANTEN; VAAST, 2006; MORAIS et al., 2003).

Os maiores benefícios com o uso do sombreamento estão sendo obtidos em lavouras cafeeiras instaladas em áreas marginais, como por exemplo, em baixas altitudes, regiões muito frias ou muito quentes, com seca prolongada ou com ocorrência de ventos fortes, ou seja, condições adversas que limitam a exploração bem sucedida da cultura (DAMATTA, 2004; DAMATTA et al., 2007). Contudo, nesses ambientes, o nível de sombreamento não deve ser excessivo que possa reduzir a produtividade e nem muito baixo para uma proteção eficaz do café contra condições ambientais adversas (CARELLI et al., 1999; KANTEN; VAAST, 2006). Sendo necessários mais estudos que comprovem a influência dos diferentes níveis de sombreamento sobre o desenvolvimento e a produção do cafeeiro em ambientes sombreados.

Adaptações morfológicas de plantas da mesma espécie submetidas às diferentes condições de radiação solar estão associadas a características anatômicas e fisiológicas distintas. Geralmente, o aumento no nível de radiação solar proporciona aumentos na espessura da folha devido ao desenvolvimento dos parênquimas paliçádico e esponjoso, o qual é induzido pela alta intensidade

de radiação, acarretando um aumento da área do mesófilo, alteração na quantidade, distribuição, tamanho, forma e mobilidade dos estômatos, além de redução dos teores de clorofilas, aumento na atividade da rubisco, redução da área foliar específica e aumento da taxa fotossintética (BATISTA et al., 2010; CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009; GOMES et al., 2008; LARCHER, 2000).

Para o cafeeiro são poucos os estudos que associam as modificações nas estruturas anatômicas com as suas respectivas funções (GOMES et al., 2008; MORAIS et al., 2004; NASCIMENTO et al., 2006; PAIVA, 2001). Mesmo assim, os estudos que fazem essa associação foram realizados em viveiros ou com cafeeiros consorciados com espécies arbóreas em campo, nos quais não foi possível avaliar a partir de qual nível o sombreamento passou a ser desvantajoso para o desenvolvimento dos cafeeiros, em condições de campo.

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar os mecanismos morfológicos e a incidência de cercosporiose em cafeeiros em formação sob diferentes níveis de radiação (pleno sol e sob telas plásticas/sombrites com 35, 50, 65 e 90% de sombra).

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Setor de Cafeicultura do Departamento de Agricultura (DAG) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), localizada no município de Lavras, MG, cujas coordenadas geográficas são: 21° 14' S e 45° 00' W, com altitude média de 918 m. A temperatura média anual dessa região é de 19,4 °C e as médias anuais de temperatura, máxima e mínima, de 26,1 e 14,8 °C, respectivamente, com precipitação anual de 1.529,7 mm (BRASIL, 1992). O clima da região é classificado, segundo Köppen, como do tipo Cwa, mas apresenta características de Cwb, com duas estações distintas: seca (abril a setembro) e chuvosa (outubro a março).

As avaliações foram realizadas em cafeeiros da espécie *Coffea arabica* L. da cultivar Catucaí Amarelo 2SL. O ensaio foi implantado em janeiro de 2009, no espaçamento de 2,5 m x 0,7 m. Após o plantio, as plantas de cafeeiros foram submetidas a cinco níveis de radiação (pleno sol e sob sombrites de 35; 50; 65 e 90% de sombra). Foram utilizadas quatro repetições, totalizando 20 parcelas. Cada parcela foi composta de uma fileira com dez plantas, sendo as seis centrais consideradas como úteis. O delineamento utilizado foi em blocos casualizados (DBC), sendo os tratamentos dispostos no esquema fatorial 5 x 2. As avaliações foram realizadas nas estações seca e chuvosa, sendo as trocas gasosas e anatomia foliar avaliadas aos 10 e 16 meses após a instalação do ensaio, e as medições das características de crescimento e incidência de cercosporiose aos 13 e 18 meses, após a implantação do ensaio em campo.

O cafezal foi conduzido tradicionalmente, seguindo as recomendações técnicas para o Sul de Minas Gerais, sendo as adubações e correções do solo realizadas conforme recomendado para a cultura (GUIMARÃES et al., 1999).

Com auxílio de um analisador portátil de trocas gasosas por infravermelho (IRGA LCA-4 ADC Hoddesdon, UK), foram avaliadas as

seguintes características de trocas gasosas: densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativo (DFFFA), taxa fotossintética (A), condutância estomática (gs), transpiração (E). Essas avaliações foram realizadas em dia típico, predominantemente claro, entre as 10 e 11 horas, em folhas completamente expandidas do terceiro nó de ramos plagiotrópicos do terço superior das plantas de café. Utilizou-se uma folha de cada planta e seis plantas por tratamento.

Os estudos anatômicos foram conduzidos utilizando-se o terço médio de folhas completamente expandidas do terceiro nó de ramos plagiotrópicos do terço superior das plantas. As folhas foram coletadas de seis plantas por tratamento e, essas foram fixadas em F.A.A. 70 (JOHANSEN, 1940), por 72 horas e posteriormente conservadas em etanol 70% (v.v⁻¹). As secções transversais foram obtidas em micróto mo de mesa tipo LPC e as secções paradérmicas à mão livre com uso de lâmina de aço, sendo submetidas à clarificação com hipoclorito de sódio 50% (v.v⁻¹), tríplice lavagem em água destilada, coloração com solução safrablau (azul de astra 0,1% e safranina 1% na proporção de 7:3), para as secções transversais e safranina 1%, para as secções paradérmicas, sendo posteriormente montadas em lâminas semipermanentes com glicerol 50% (v.v⁻¹) (KRAUS; ARDUIN, 1997).

As lâminas foram observadas e fotografadas em microscópio óptico modelo Olympus BX 60, acoplado à câmera digital Canon A630. As imagens foram analisadas em software para análise de imagens UTHSCSA-Imagetool, com a medição de 20 campos para as variáveis das secções transversais e secções paradérmicas. Foram avaliadas: LIM= espessura do limbo foliar; PPA= espessura do parênquima paliçádico; CTA= espessura da cutícula da face adaxial; EAD= espessura da epiderme da face adaxial; EAB= espessura da epiderme da face abaxial. Para a caracterização dos estômatos, foi analisada a

densidade estomática (número de estômatos por mm^2) e os diâmetros polar e equatorial, a partir de fotomicrografias obtidas em microscópio Olympus CBB.

As características de crescimento avaliadas foram: altura de planta, número de ramos plagiotrópicos e diâmetro do caule. As medidas da altura das plantas foram feitas do colo das plantas até a gema apical (cm), o número de ramos plagiotrópicos foi determinado por meio da contagem direta do número de ramos plagiotrópicos emitidos pelas plantas e a avaliação do diâmetro do caule foi feita no colo das plantas através de um paquímetro (mm).

A incidência de cercosporiose foi avaliada por meio da análise de 20 folhas ao acaso nas parcelas. Nessas folhas foram identificadas e determinadas a incidência da doença por meio da porcentagem de folhas infectadas. Os percentuais de incidência da doença foram transformados em área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD), de acordo com Campbell e Madden (1990).

Para todas as características avaliadas foi feita a análise estatística dos dados, de acordo com sugestões apresentadas por Pimentel-Gomes (2000) para análise de experimentos fatoriais. Os efeitos de tratamentos, bem como os desdobramentos das interações foram avaliados pelo teste F. As médias foram comparadas por meio da sobreposição do erro padrão da média. Já para aquelas variáveis pertinentes foi feita a análise de regressão, para avaliar os seus comportamentos em função dos níveis de radiação. Todas as análises estatísticas foram executadas no programa computacional SISVAR para Windows, versão 4.0 (FERREIRA, 2003).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O emprego das telas plásticas, com o propósito de provocar reduções gradativas na radiação disponível para as plantas, foi adequado para os objetivos deste trabalho, pois, verificou-se que a média sazonal de densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos decresceu com o aumento do nível de sombreamento (Figura 1a). Comparando os resultados entre as duas estações do ano, notou-se que a densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativo foi maior na estação seca para os tratamentos com os maiores níveis de radiação (pleno sol e 35% de sombra), já os níveis com 50 e 65% de sombra apresentaram valores semelhantes nas duas estações, enquanto no maior nível de sombreamento (90% de sombra), a densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativo foi maior na estação chuvosa.

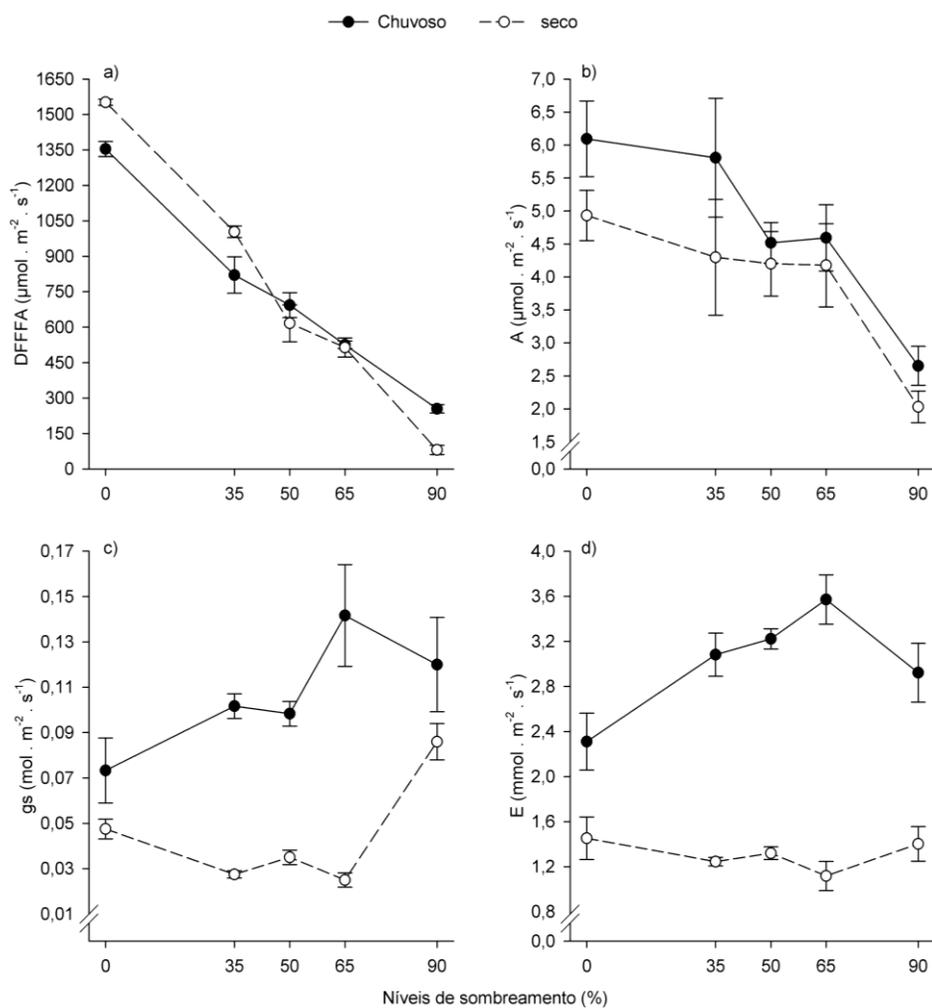


Figura 1. Densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA) (a), taxa fotossintética (A) (b), condutância estomática (g_s) (c) e transpiração (E) (d) em cafeeiros em formação sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média.

Para a taxa fotossintética verificou-se que, nas duas estações, os tratamentos a pleno sol, 35, 50 e 65% de sombra favoreceram o processo fotossintético apresentando os maiores valores, enquanto as plantas submetidas a 90% de sombra apresentaram a menor taxa fotossintética (Figura 1b).

Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Carelli et al. (1999), em trabalho com mudas de cafeeiro submetidas a diferentes níveis de radiação (pleno sol, 50 e 80% de sombra artificial), no qual os autores verificaram que a exposição a 80% de sombra reduziu a taxa máxima de assimilação de CO_2 e não constataram diferença na taxa fotossintética entre as plantas a pleno sol e a 50% de sombra.

A fotossíntese corresponde à entrada básica de energia para as plantas e é essencial para o desenvolvimento do vegetal, sendo ligada diretamente à estrutura das folhas (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). A fotossíntese pode variar conforme o ambiente da planta, e, as duas principais limitações ambientais para a taxa fotossintética são a disponibilidade de CO_2 e de radiação solar (ZHOU; HAN, 2005). Dessa forma, a menor radiação solar disponível no tratamento com 90% de sombra pode ter promovido redução na taxa fotossintética, além de promover modificações estruturais como menor densidade estomática que desfavoreceu o fluxo de CO_2 para o interior da folha, bem como menores espessamentos do limbo foliar e parênquima paliádico que permitiram menor aproveitamento da radiação solar incidente. Esses resultados demonstram que o sombreamento em até 65% é importante na melhoria da estrutura interna das folhas do cafeeiro que podem permitir que mais carbono seja fixado em relação ao tratamento com 90% de sombra que não promoveu esses benefícios.

Em geral, observou-se uma redução da taxa fotossintética na estação seca, indicando que a baixa disponibilidade de água no solo, associada a uma maior demanda evaporativa da atmosfera, pode ter limitado a taxa fotossintética

do cafeeiro, principalmente devido ao fechamento estomático, conforme pode ser verificado na Figura 1c.

A condutância estomática e a transpiração são características diretamente relacionadas com a perda de água. Observou-se que os maiores valores de condutância estomática ocorreram a 35; 50; 65 e 90% de sombra na estação chuvosa e a 90% de sombra na estação seca (Figura 1c). Esses resultados estão de acordo aos obtidos por Freitas et al. (2003), que observaram, para mudas cafeeiras, aumento dos valores de condutância estomática com o aumento do nível do sombreamento. Para transpiração os maiores valores foram encontrados nas folhas sombreadas na estação chuvosa, já para o período seco todos os níveis de radiação apresentaram valores semelhantes (Figura 1d). As folhas de sombra apresentam menor densidade estomática e estômatos maiores, permitindo com que esses estômatos permaneçam abertos durante um tempo maior para captar CO_2 o que contribui para aumentar a perda d'água nessas folhas (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). Entre as estações, constatou-se que o excedente hídrico, disponibilizando considerável quantidade de água no solo na estação chuvosa, proporcionou aumento da condutância estomática e transpiração das plantas (GOMES et al., 2008) (Figura 1cd).

A redução da luminosidade proporcionou menor espessura da folha, especialmente, acarretada pela redução do limbo foliar e do parênquima paliçádico. Além disso, pode ser verificada uma abundância de espaços intracelulares no mesofilo das folhas de plantas cultivadas sob 90% de sombra, em relação às cultivadas a pleno sol, principalmente no parênquima esponjoso (Figuras 2 e 3abc).

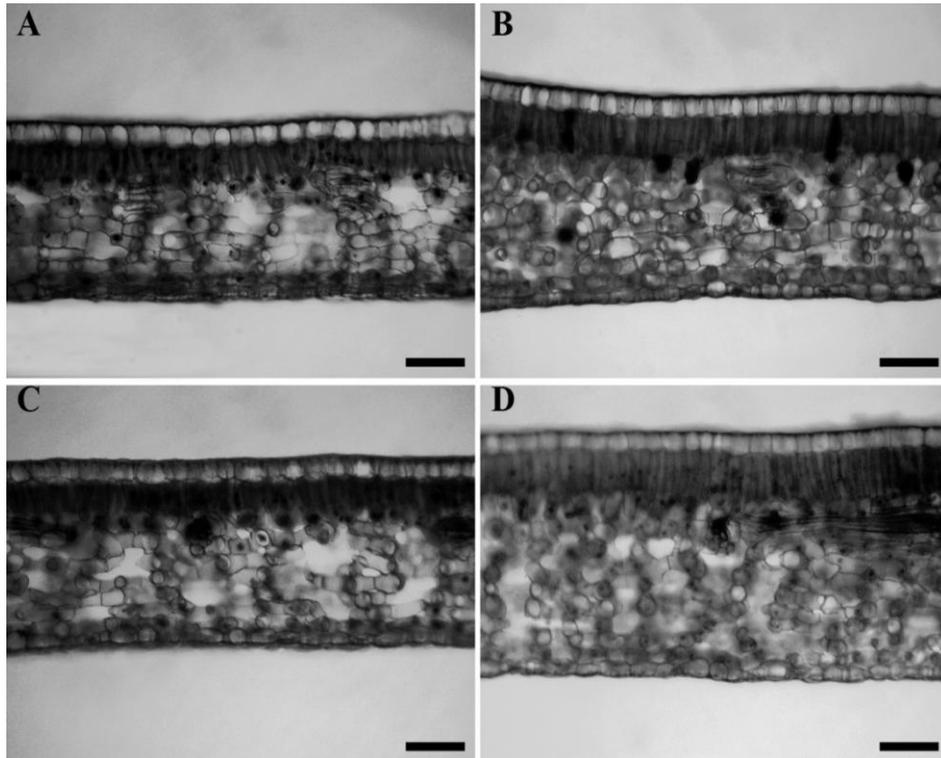


Figura 2. Fotomicrografias de seções transversais de folhas de cafeeiros em formação sob diferentes níveis de radiação, na estação seca e chuvosa (A – 90% de sombra em época chuvosa; B – pleno sol em época chuvosa; C – 90% de sombra em época seca; D – pleno sol em época seca). Barra = 50 μm .

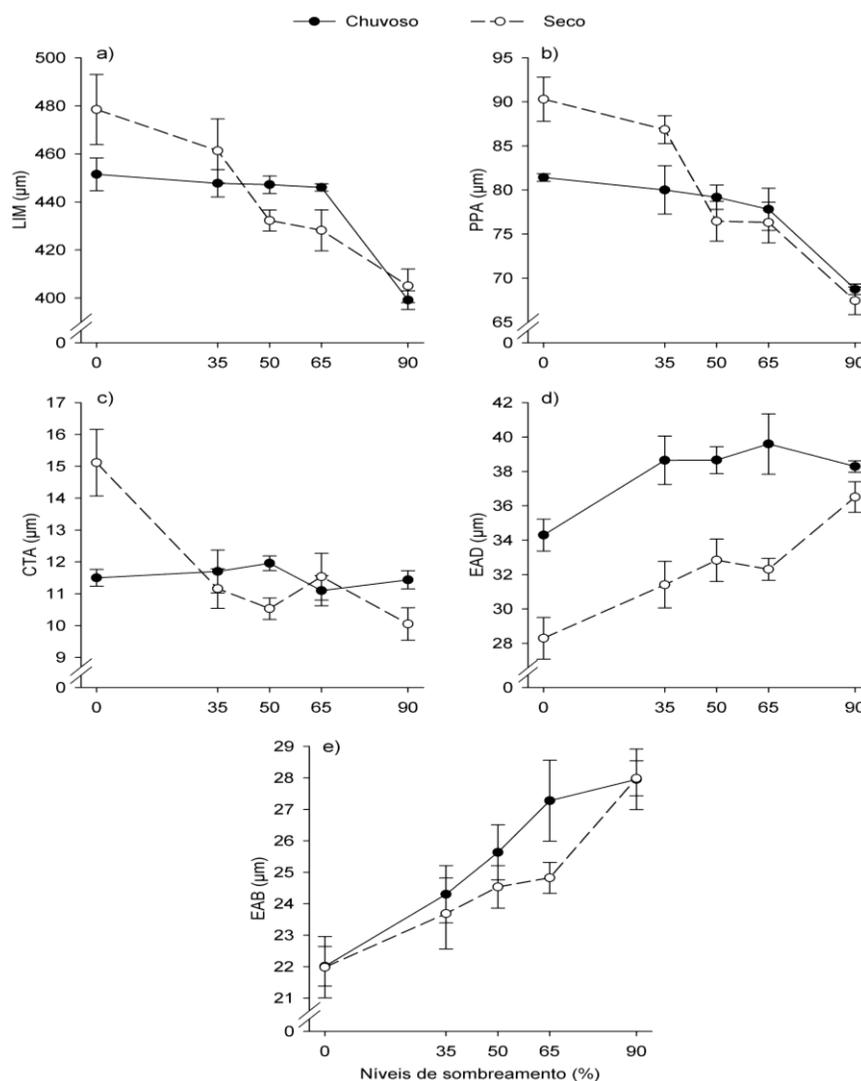


Figura 3. Espessura dos tecidos foliares (limbo foliar (LIM) (a), parênquima paliçádico (PPA) (b), cutícula da face adaxial (CTA) (c), epiderme da face adaxial (EAD) (d) e epiderme da face abaxial (EAB) (e) de cafeeiros em formação sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média.

As folhas de cafeeiro com crescimento ao sol geralmente são mais espessas que as folhas sombreadas, sendo o espessamento do mesofilo uma característica xeromorfica que contribui para a esclerofilia (BOEGER; WISNIEWSKI, 2003; CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). No entanto, sabe-se que essa característica pode se modificar dependendo da condição ambiental em que as plantas são cultivadas (BATISTA et al., 2010; GRISI et al., 2008; SOUZA et al., 2010). No presente estudo, observou-se que os cafeeiros cultivados a pleno sol, 35; 50 e 65% de sombra, na estação chuvosa, apresentaram as maiores médias em espessura do parênquima paliçádico e do limbo foliar, sendo os menores valores obtidos no sombreamento com 90%. Na estação seca, as plantas submetidas a 90% de sombra apresentaram as menores espessuras, seguidas das plantas sob 50 e 65% de sombra, sendo as maiores médias apresentadas pelos cafeeiros a pleno sol e 35% de sombra (Figura 3ab). Dessa forma, níveis acima de 65% de sombra não contribuem para esclerofilia das folhas desfavorecendo a estrutura interna dessas folhas.

Para espessura da cutícula da face adaxial das folhas, a maior espessura foi verificada a pleno sol durante a época seca (Figura 3c). Devido à sua natureza lipídica, a cutícula mais espessada pode evitar a perda de água excessiva por transpiração, sendo, portanto, um importante mecanismo de tolerância ao déficit hídrico (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). Dessa forma, o maior espessamento da cutícula nas plantas a pleno sol no período seco pode permitir maior tolerância ao estresse hídrico, em decorrência da menor transpiração. Já na época chuvosa todos os níveis de radiação apresentaram valores semelhantes, isso porque nesse período a perda de água não foi acentuada e, conseqüentemente, a planta não necessitou investir energia no espessamento da cutícula (Figura 3c).

Entre as duas estações do ano, observou-se que os tratamentos a pleno sol e 35% de sombra apresentaram a maior espessura do parênquima paliádico na estação seca, quando comparada com a estação chuvosa. Já para a espessura da cutícula e espessura do limbo foliar as plantas cultivadas a pleno sol apresentaram as maiores médias no período seco (Figura 3abc). Esse fato pode ter ocorrido em virtude da maior densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos que ocorreu na estação seca para os tratamentos com os maiores níveis de radiação solar (pleno sol e 35% de sombra), aliado a menor disponibilidade de água no solo no período seco. Condições ambientais que favoreceram a ocorrência de modificações nas características anatômicas dessas plantas.

Na estação seca, a epiderme da face adaxial aumentou a espessura com o aumento do nível de sombreamento, sendo que os níveis intermediários (35; 50 e 65% de sombra) apresentaram valores semelhantes. Já no período chuvoso, a condição a pleno sol apresentou a menor espessura e os demais tratamentos obtiveram as maiores médias. Comparando-se as duas estações do ano, o período chuvoso foi superior ao seco, com exceção do tratamento a 90% de sombra que apresentou valores semelhantes nas duas estações do ano (Figura 3d). A epiderme da face abaxial também aumentou a espessura, com a redução do nível da radiação (Figura 3e).

Essas modificações estruturais, encontradas entre folhas de cafeeiros submetidas a diferentes níveis de radiação, podem ser atribuídas a diferentes concentrações de auxina, isso porque esse fitohormônio concentra-se nas regiões menos iluminadas das folhas. Assim, as folhas mais iluminadas apresentam maiores teores de auxina no mesofilo, enquanto que, em folhas sombreadas, as auxinas são encontradas em toda folha, inclusive na epiderme (MORAIS et al., 2004). Portanto, em folhas de plantas sombreadas esse fitohormônio permite maior distensão de células da epiderme. Resultados semelhantes foram

verificados por Gomes et al. (2008) e Morais et al. (2004) em trabalhos com cafeeiros sombreados por *Cajanus cajan* e *Acacia mangium*, respectivamente.

Para densidade estomática, os maiores valores para estação chuvosa foram obtidos a pleno sol, seguido do tratamento com 35% de sombra, e as menores médias foram encontradas nos maiores níveis de sombra (50; 65 e 90%). Já para estação seca, a condição a pleno sol continuou apresentando as maiores médias, os níveis de 35; 50 e 65% de sombra apresentaram valores semelhantes e foram superiores ao tratamento com menor radiação (90% de sombra) (Figura 4a). O aumento da densidade estomática pode ser relacionado com uma maior capacidade das plantas em captar o CO₂ da atmosfera e, dessa forma, aumentar a eficiência fotossintética por permitir que maior volume desse gás seja fixado (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). Dessa forma, a redução da taxa fotossintética, observada no maior nível de sombra (90%), pode ser atribuída também à redução da densidade estomática verificada nesse nível.

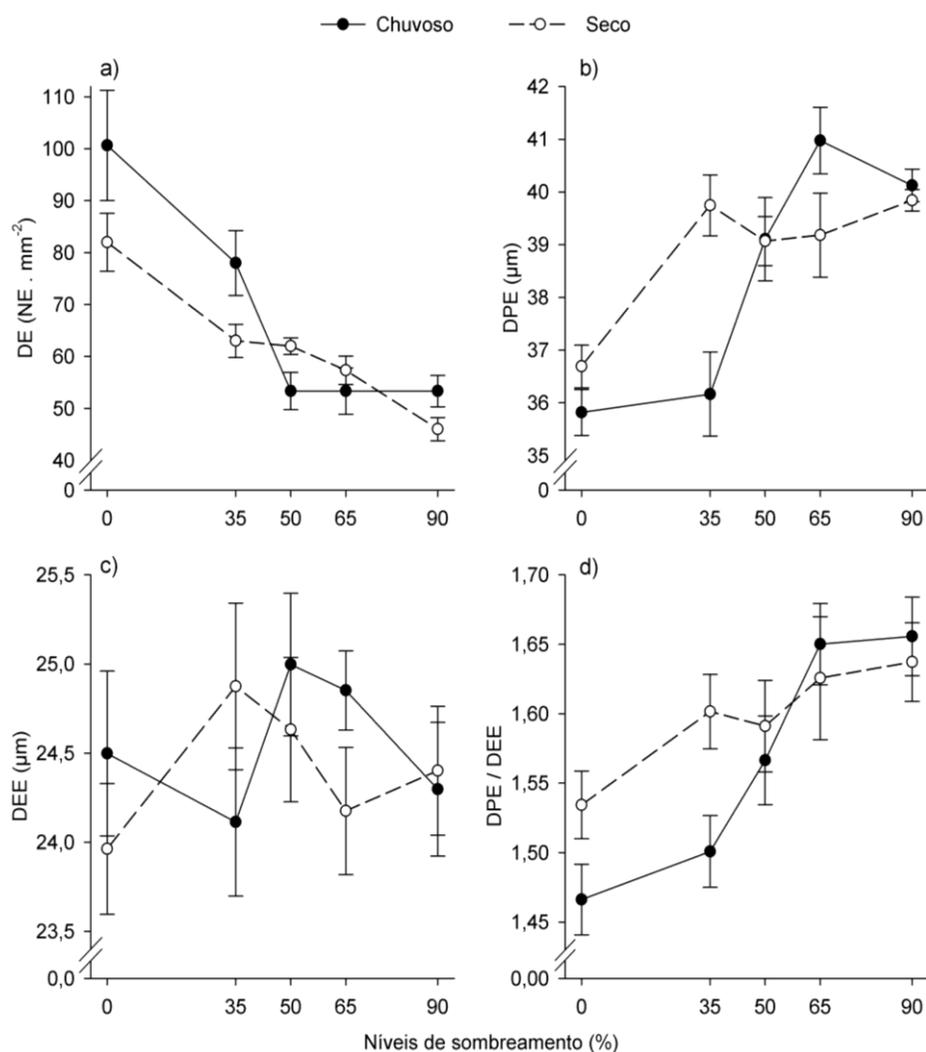


Figura 4. Densidade estomática (DE) (a), diâmetro polar dos estômatos (DPE) (b), diâmetro equatorial dos estômatos (DEE) (c) e relação diâmetro polar e equatorial dos estômatos (DPE/DEE) (d) em cafeeiros em formação sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média.

Comparando as estações do ano, notou-se que na estação seca os tratamentos sob os maiores níveis de radiação solar (pleno sol e 35% de sombra) apresentaram os menores valores para densidade estomática. Para os demais tratamentos, houve semelhança entre as médias apresentadas nas duas estações (Figura 4a).

O diâmetro polar dos estômatos foi reduzido a pleno sol e a 35% de sombra, na estação chuvosa. E na estação seca apenas a condição a pleno sol apresentou os menores valores (Figura 4b). Segundo Castro, Pereira e Paiva (2009), condições ambientais alteram o tamanho e a densidade dos estômatos, com intuito de auxiliar a planta na tolerância dessa condição. Em ambientes com maior disponibilidade de luz, verifica-se a diminuição no tamanho dos estômatos, para que haja uma menor perda de água da planta para o ambiente, havendo simultâneo aumento de sua densidade, contribuindo para o equilíbrio das trocas gasosas. Para o diâmetro equatorial dos estômatos, não houve influência dos níveis de radiação e das estações (Figura 4c). Geralmente, o diâmetro polar tende a responder mais que o diâmetro equatorial às diferentes condições ambientais, conforme verificado no presente trabalho.

Em geral, uma maior relação diâmetro polar e diâmetro equatorial foi observada para as plantas cultivadas sob sombreamento. Na estação seca, os menores valores foram apresentados pelos cafeeiros a pleno sol. Enquanto na estação chuvosa as menores médias foram obtidas nos tratamentos em pleno sol e 35% de sombra (Figura 4d). A relação diâmetro polar e diâmetro equatorial indica o formato dos estômatos e, quando apresenta maior valor, indica uma maior funcionalidade do estômato (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009; KHAN et al., 2002).

A disponibilidade de luz no ambiente provoca modificações na anatomia foliar das plantas que podem limitar ou favorecer potencialmente o processo

fotosintético (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). Na Figura 5 estão representadas as equações de regressão e os coeficientes de determinação das características anatômicas que favoreceram o aumento da taxa fotossintética. Observa-se que os modelos ajustados apresentaram tendências semelhantes entre as características anatômicas e a taxa fotossintética, principalmente na estação seca.

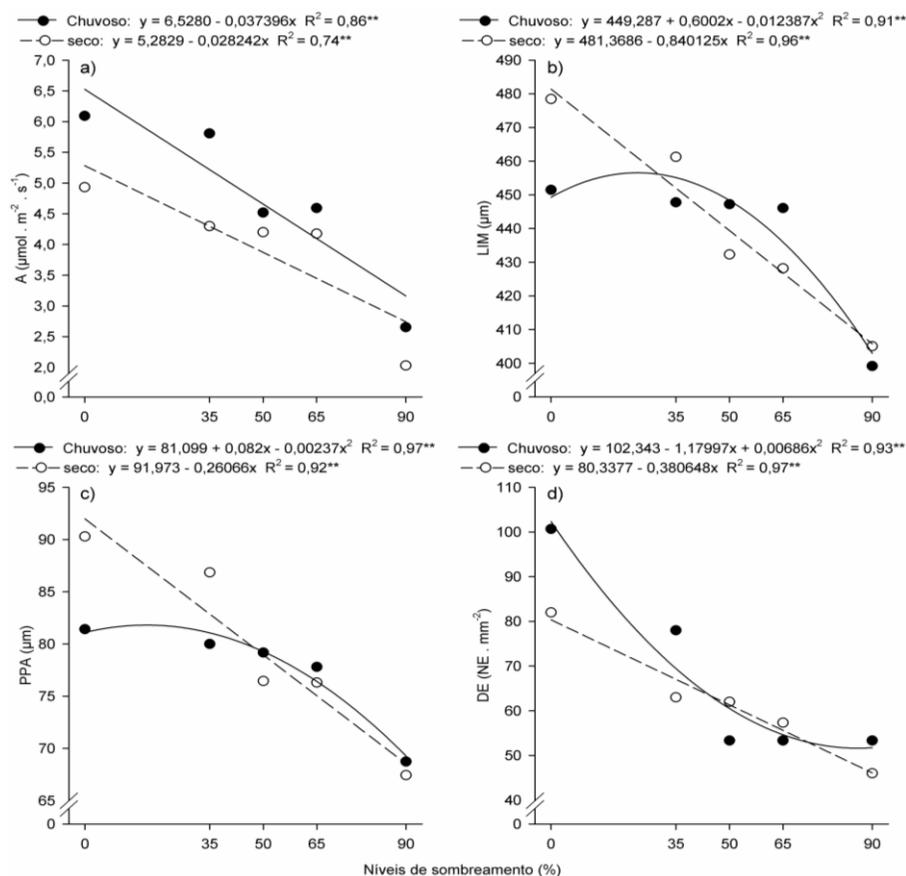


Figura 5. Equação de regressão e coeficiente de determinação para as variáveis taxa fotossintética (A) (a), espessura do limbo foliar (LIM) (b), espessura do parênquima paliçádico (PPA) (c) e densidade estomática (DE) (d) em cafeeiros em formação, sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●).

Na estação chuvosa, a equação de regressão demonstrou uma redução de 52% na taxa fotossintética ao reduzir a radiação de 100% (pleno sol) para 10% (90% sombra). A cada 10% de redução da luminosidade houve uma queda em cerca de 6% na taxa fotossintética dos cafeeiros. Já na estação seca, a equação

apresentou redução de 48% na taxa fotossintética do ambiente a pleno sol para o ambiente com 90% de sombra. Ocorreu redução em cerca de 5% na taxa fotossintética a cada aumento de 10% no sombreamento dos cafeeiros (Figura 5a).

No período chuvoso, as equações de regressão revelaram efeito quadrático dos níveis de radiação sobre as espessuras do limbo foliar e do parênquima paliçádico, com coeficientes de determinação de 91% e 97%, respectivamente. Os pontos de máximo foram, respectivamente, iguais a 24% e 17%, ocorrendo efeito depressivo nos maiores níveis de sombra. No período seco, a equação de regressão indicou que a tendência para as espessuras do limbo foliar e do parênquima paliçádico foi de redução com o aumento do nível de sombreamento. A equação demonstrou redução de 16% na espessura do limbo foliar e de 43% na espessura do parênquima paliçádico, ao ser reduzida a radiação de 100% (pleno sol) para 10% (90% sombra) (Figura 5bc).

Para a densidade estomática na estação chuvosa, a equação de regressão revelou efeito quadrático, com tendência de redução da densidade estomática com o aumento do nível de sombreamento, sendo que o ponto de mínimo ocorreu a 86% de sombra. Enquanto na estação seca, ao comparar-se a densidade estomática do ambiente com 100% de radiação com a do ambiente com 10% de radiação, houve queda de 43% na densidade estomática (Figura 5d).

Com relação às avaliações de crescimento, observaram-se para todas as variáveis analisadas, que o período seco apresentou os maiores valores quando comparado ao período chuvoso. Esse fato ocorreu porque as avaliações na estação seca foram realizadas cinco meses após as avaliações da estação chuvosa (Figura 6abc).

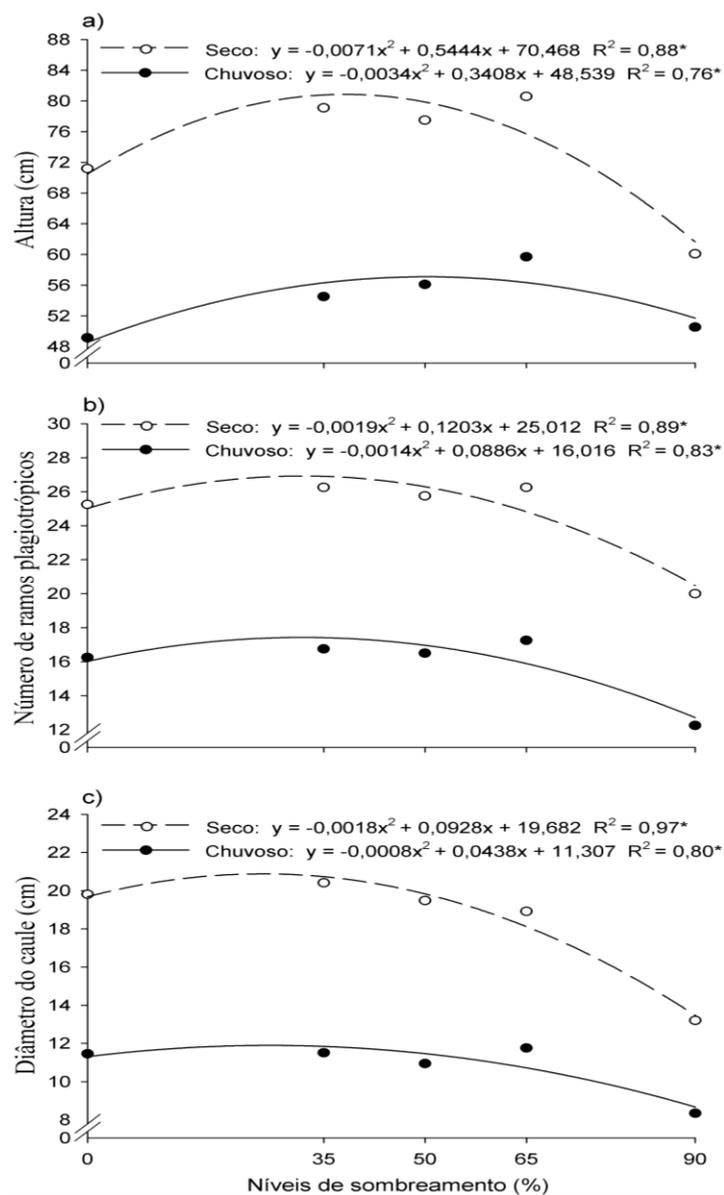


Figura 6. Equações de regressão e coeficientes de determinação para as variáveis altura de planta (a), número de ramos plagiotrópicos (b) e diâmetro do caule (c) de cafeeiros em formação, sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●).

Observou-se efeito quadrático dos níveis de radiação sobre a altura de plantas, número de ramos plagiotrópicos e diâmetro do caule, com respectivos pontos de máximo nos níveis de 50%, 32% e 28% de sombra, na estação chuvosa (Figura 6 abc). Paiva (2001), avaliando a altura de mudas cafeeiras também verificou que o sombreamento com 50% proporcionava os maiores valores.

No período seco, também houve efeito quadrático dos níveis de radiação sobre a altura de plantas, número de ramos plagiotrópicos e diâmetro de caule, com respectivos coeficientes de determinação de 80%, 89% e 97% e pontos de máximo em 38%, 32% e 26%. A redução do crescimento do cafeeiro por volta do nível com 30% parece estar de acordo com o observado por Fahl e Carelli (2007) para região de Campinas, estado do São Paulo, de que o sombreamento moderado, em torno de 30% favorece os processos fisiológicos, favorecendo o crescimento e a produção do cafeeiro em ambiente sombreado.

Para área abaixo da curva de progresso da doença, a equação de regressão mostrou redução de 93% na incidência da cercosporiose, ao reduzir a radiação de 100% (pleno sol) para 10% (90% de sombra). Assim, verifica-se que a cada 10% de aumento do sombreamento têm-se uma redução em cerca de 10%, na incidência de cercosporiose (Figura 7).

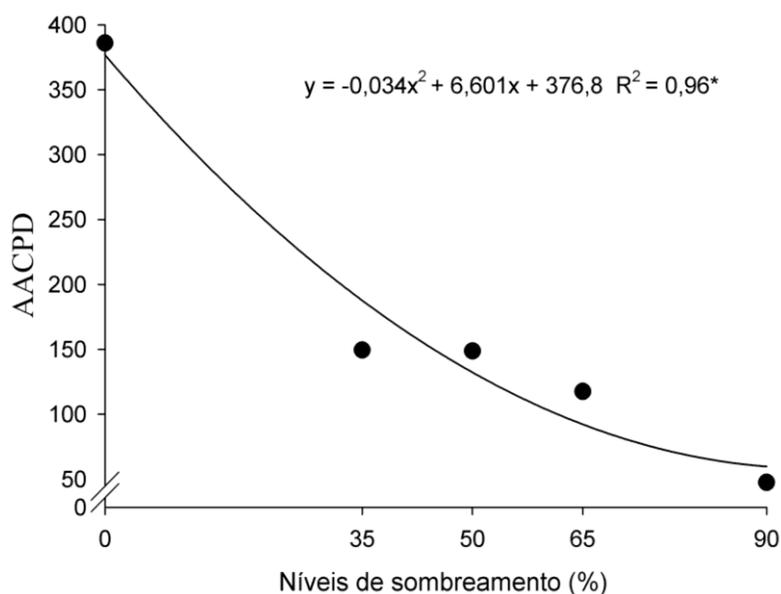


Figura 7. Equação de regressão e coeficiente de determinação para a variável área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD), em cafeeiros em formação sob diferentes níveis de radiação.

Esses resultados corroboram com Salgado et al. (2007), os quais verificaram que a incidência de cercosporiose foi diretamente afetada pela arborização da lavoura cafeeira. Maiores incidências ocorreram nos cafeeiros a pleno sol, seguidas dos consorciados com grevilea e, por último, dos cafeeiros consorciados com ingazeiro. De acordo com vários autores (ECHANDI, 1959; SALGADO et al., 2007; TALAMINI et al., 2001, 2003), as principais causas da acentuada intensidade da cercosporiose são o déficit hídrico associado à deficiência ou desequilíbrio nutricional. Assim, provavelmente o cafeeiro a pleno sol estaria mais suscetível à cercosporiose devido à menor umidade do solo, decorrente da maior exposição direta ao sol nesse sistema. No sistema sombreado, em que o solo pode permanecer úmido por mais tempo, também o

cafeeiro absorveria água e nutrientes por um maior período de tempo, amenizando as condições de stress hídrico e nutricional favoráveis ao fungo da cercosporiose.

4 CONCLUSÃO

Em condições de alta luminosidade e baixa disponibilidade de água, as folhas do cafeeiro têm maior espessamento da cutícula da face adaxial.

O aumento da disponibilidade de radiação provoca aumento da espessura foliar e da densidade estomática, além de redução no tamanho dos estômatos de cafeeiros em fase de formação. Essas modificações favorecem potencialmente o processo fotossintético até o nível com 65% de sombra, sendo o nível com 30% de sombra o mais indicado.

A cada 10% de aumento no nível do sombreamento há redução em cerca de 5% na taxa fotossintética e de 10% na incidência da cercosporiose nos cafeeiros em fase de formação.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG e ao INCT Café, pelo auxílio financeiro na condução dos experimentos e ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS

- BATISTA, L. A. et al. Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 41, n. 3, p. 475-481, 2010.
- BOEGER, M. R. T.; WISNIEWSKI, C. Comparação da morfologia foliar de espécies arbóreas de três estádios sucessionais distintos de floresta ombrófila densa (Floresta Atlântica) no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 61-72, jan./fev. 2003.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Normais climatológicas 1961-1990**. Brasília, 1992. 84 p.
- CAMPBELL, C. L.; MADDEN, L. V. **Introduction to plant disease epidemiology**. New York: J. Wiley, 1990. 655 p.
- CARELLI, M. L. C. et al. Carbon isotope discrimination and gas exchange in *Coffea* species grown under different irradiance regimes. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Brasília, v. 11, n. 2, p. 63-68, mar./abr. 1999.
- CASTRO, E. M. de; PEREIRA, F. J.; PAIVA, R. **Histologia vegetal: estrutura e função de órgãos vegetativos**. Lavras: UFLA, 2009. 234 p.
- DAMATTA, F. M. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. **Field Crops Research**, Phoenix, v. 86, n. 2/3, p. 99-114, 2004.
- DAMATTA, F. M. et al. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 19, n. 4, p. 485-510, July/Aug. 2007.

ECHANDI, E. La chasparria de los cafetos causada por el hongo *Cercospora coffeicola* Berk & Cooke. **Turrialba**, San José, v. 9, n. 2, p. 54-67, 1959.

FAHL, J. I.; CARELLI, M. L. C. Os estudos sobre a fisiologia do cafeeiro no Instituto Agronômico. **O Agrônomo**, Campinas, v. 59, n. 1, p. 41-43, 2007.

FERREIRA, D. F. **SISVAR - Sistema para Análise de Variância de Dados Balanceados**: programa de análises estatísticas e planejamento de experimentos. Versão 4. Lavras: UFLA, 2003. Software.

FREITAS, R. B. et al. Influência de diferentes níveis de sombreamento no comportamento fisiológico de cultivares de café (*Coffea arabica* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 4, p. 804-810, jul./ago. 2003.

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. 109-115, jan./fev. 2008.

GRISI, F. A. et al. Avaliações anatômicas foliares em mudas de café 'Catuai' e 'Siriema' submetidas ao estresse hídrico. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 6, p. 1730-1736, nov./dez. 2008.

GUIMARÃES, P. T. G. et al. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, MG: UFV, 1999. p. 289-302.

JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York: McGraw Hill, 1940. 523 p.

KANTEN, R. V.; VAAST, P. Transpiration of arabica coffee and associated shade tree species in sub-optimal, low-altitude conditions of Costa Rica. **Agroforestry Systems**, Amsterdam, v. 67, n. 2, p. 187-202, Apr. 2006.

KHAN, P. S. S. V. et al. Growth and net photosynthetic rates of *Eucalyptus tereticornis* Smith under photomixotrophic and various photoautotrophic micropropagation conditions. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, Amsterdam, v. 71, n. 2, p. 141-146, Feb. 2002.

KRAUS, J. E.; ARDUIN, M. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. Rio de Janeiro: EDUR, 1997. 198 p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2000. 531 p.

MORAIS, H. et al. Características fisiológicas e de crescimento de cafeeiro sombreado com guandu e cultivado a pleno sol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1131-1137, out. 2003.

_____. Modifications on leaf anatomy of *Coffea arabica* caused by shade of Pigeonpea (*Cajanus cajan*). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 47, n. 6, p. 863-871, Nov./Dec. 2004.

NASCIMENTO, E. A. do et al. Alterações morfofisiológicas em folhas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) consorciado com seringueira (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 852-857, maio/jun. 2006.

PAIVA, L. C. **Produção de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em diferentes níveis de sombreamento e seus reflexos na implantação**. 2001. 55 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 14. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2000. 477 p.

SALGADO, B. G. et al. Progresso da ferrugem e da cercosporiose do cafeeiro consorciado com grevêlea, com ingazeiro e a pleno sol em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1067-1074, jul./ago. 2007.

SOUZA, T. C. et al. Leaf plasticity in successive selection cycles of 'Saracura' maize in response to periodic soil flooding. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 1, p. 16-24, jan. 2010.

TALAMINI, V. et al. Progresso da ferrugem e da cercosporiose em cafeeiro (*Coffea arabica* L.) com diferentes épocas de início e parcelamentos da fertirrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 1, p. 141-149, jan./fev. 2003.

_____. Progresso da ferrugem e da cercosporiose do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) em diferentes lâminas de irrigação e diferentes parcelamentos de adubação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, n. 1, p. 55-62, jan./fev. 2001.

ZHOU, Y. M.; HAN, S. J. Photosynthetic response and stomatal behaviour of *Pinus koraiensis* during the fourth year of exposure to elevated CO₂ concentration. **Photosynthetica**, Amsterdam, v. 43, n. 3, p. 445-449, 2005.

CAPITULO 3

CAFEEIROS EM PRODUÇÃO EM DIFERENTES NÍVEIS DE RADIÇÃO: CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS

RESUMO

A adequação de plantas da mesma espécie às diferentes condições de radiação está associada a características fisiológicas e anatômicas. São escassas as informações sobre os mecanismos associados com a plasticidade morfológica apresentada pelo cafeeiro ao aclimatar-se a diferentes ambientes. Nesse contexto, objetivou-se avaliar os mecanismos morfifisiológicos em cafeeiros em produção, sob diferentes níveis de radiação. Após a poda da lavoura e primeira produção, os cafeeiros foram submetidos a cinco níveis de radiação (pleno sol e sob telas plásticas/sombrites de 35, 50, 65 e 90% de sombra). As plantas foram avaliadas quanto às trocas gasosas, teores de clorofilas, teor de nitrogênio e anatomia foliar nas estações chuvosa e seca, 8 e 15 meses após a instalação do ensaio, respectivamente. Em cafeeiros em fase de produção, os níveis de radiação pouco interferem no teor total de clorofila e na proporção de clorofilas a/b. O aumento da disponibilidade de radiação provoca aumento da espessura foliar e da densidade estomática, além de redução no tamanho dos estômatos de cafeeiros em fase de produção. Essas modificações favorecem potencialmente o processo fotossintético até o nível com 50% de sombra, sendo mais indicado o nível com cerca de 20% de sombra. A maior taxa fotossintética ocorre nos níveis com 21% e 26% de sombra, em condições de baixa e alta disponibilidade hídrica, respectivamente. Esses resultados demonstram que a quantidade de radiação incidente é importante para o desenvolvimento da estrutura interna das folhas do cafeeiro que podem favorecer características fisiológicas necessárias para otimizar a produtividade dessa cultura em ambiente sombreado.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L. Plasticidade. Sombreamento. Clorofila.

ABSTRACT

The suitability of plants from the same species to the different radiation conditions is associated to the physiological and anatomical characteristics. There is little information about the mechanisms related to the morphological plasticity displayed by the coffee tree acclimated to different environments. In this context, the purpose was to evaluate the morphological mechanisms in coffee trees in production under different radiation levels. After crops pruning and the first production, the coffee trees were subjected to five different radiation levels (full sunlight and under plastic screens/sombrites at 35, 50, 65 and 90% shade). The plants were evaluated concerning the gas exchanges, chlorophylls contents, nitrogen content and leaf anatomy during rainy and dry seasons, 8 and 15 months after the experiment instillation, respectively. In coffee trees in production phase the radiation levels change very little in the chlorophyll full content and the a/b chlorophylls proportion. The increase of the radiation availability causes the increase of the leaf thickness and stomata density, besides the reduction in the stomata size of coffee trees in the production phase. These changes potentially favour the photosynthesis process up to 50% shade level, the 20% shade level being the most recommended. The highest photosynthesis rate occurs in 21% and 26% shade levels, under low and high water availability in the soil, respectively. These results show that the amount of incident radiation is important for the development of the coffee leaves internal structure that may favor the physiological characteristics needed to optimize this culture productivity under shade.

Keywords: *Coffea arabica* L. Plasticity. Shading. Chlorophyll.

1 INTRODUÇÃO

O café sombreado é um dos sistemas mais antigos de produção de café (*Coffea arabica* L.) do mundo, particularmente difundido na Colômbia, El Salvador, Costa Rica, Guatemala e México (JARAMILLO-BOTERO; MARTINEZ; SANTOS, 2006). Esse sistema de produção possibilita a exploração de outro produto comercial (frutas, látex, madeira, lenha entre outros), numa mesma área de cultivo, o emprego de mais mão de obra, além de permitir que o produto seja diferenciado, abrindo novas opções de mercado e de preços (DAMATTA, 2004; DAMATTA et al., 2007; GROSSMAN, 2003; SAES; SOUZA; OTANI, 2003).

No Brasil, existe uma grande controvérsia sobre a produção de café sombreado. Em algumas experiências, os cafeeiros sombreados apresentam produções comparáveis, e inclusive maiores que as do café a pleno sol. Em outras, as produções do café sombreado são extremamente baixas (CAMPANHA et al., 2004), chegando a níveis insustentáveis para os agricultores. Isso depende de uma série de fatores que incluem o clima, intensidade de radiação do local, tipo de solo e as práticas de manejo do sistema (JARAMILLO-BOTERO; MARTINEZ; SANTOS, 2006). Em relação à intensidade de radiação, sabe-se que o nível de sombreamento não deve ser excessivo para não reduzir a produtividade e nem muito baixo para uma proteção eficaz do café contra condições ambientais adversas (KANTEN; VAAST, 2006). No entanto, faltam estudos que determinem níveis ótimos de radiação, ou seja, níveis que proporcionem melhor desenvolvimento e produção do cafeeiro em ambientes sombreados.

Plantas que apresentam plasticidade morfofisiológica são capazes de responder diferencialmente aos níveis de radiação no ambiente por meio de modificações na morfologia e na fotossíntese (GOMES et al., 2008; OGUCHI;

HIKOSAKA; HIROSE, 2005; PANDEY; KUSHWAHA, 2005). De maneira geral, plantas que possuem plasticidade morfofisiológica apresentam aumento nos teores de clorofila, queda na atividade da rubisco, redução na taxa fotossintética líquida e incremento na área foliar específica, quando em ambientes com baixa disponibilidade de radiação (MORAIS et al., 2004). Modificações anatômicas também podem ser associadas com a adaptação das plantas à baixa radiação como, por exemplo: redução da densidade estomática, menor espessura da folha devido ao menor desenvolvimento dos parênquimas paliçádico e esponjoso, além da menor espessura da cutícula (GOMES et al., 2008; MORAIS et al., 2004; NASCIMENTO et al., 2006; VOLTAN; FAHL; CARELLI, 1992). No entanto, pouco se sabe sobre os mecanismos associados com a plasticidade morfofisiológica em cafeeiros.

Tendo em vista a carência de estudos que associem as modificações nas estruturas anatômicas com as suas respectivas funções em cafeeiros cultivados no campo, sob diferentes intensidades de radiação, objetivou-se, avaliar os mecanismos morfofisiológicos de cafeeiros em produção sob diferentes níveis de radiação (pleno sol e sob telas plásticas/sombrites com 35, 50, 65 e 90% de sombra).

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Setor de Cafeicultura do Departamento de Agricultura (DAG) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), município de Lavras, MG, cujas coordenadas geográficas são: 21° 14' S e 45° 00' W, com altitude média de 918 m. A temperatura média anual do ar dessa região é de 19,4 °C e as médias anuais de temperatura, máxima e mínima, de 26,1 e 14,8 °C, respectivamente, com precipitação anual de 1.529,7 mm (BRASIL, 1992). O clima da região é classificado, segundo Köppen, como do tipo Cwa, mas apresenta características de Cwb, com duas estações distintas: seca (abril a setembro) e chuvosa (outubro a março).

As avaliações foram realizadas em cafeeiros da espécie *Coffea arabica* L. da cultivar Acaiá Cerrado, linhagem MG-1474, plantados no ano de 1998 em espaçamento de 3,5 m x 0,5 m. O cafezal foi renovado, por meio de recepa, em 2007. No ano de 2009, as plantas de cafeeiros foram submetidas a cinco níveis de radiação (pleno sol e sob telas plásticas/sombrites com 35, 50, 65 e 90% de sombra). Foram utilizadas quatro repetições, totalizando 20 parcelas. As parcelas foram constituídas por oito plantas úteis. As plantas foram avaliadas quanto às trocas gasosas, teores de clorofilas, teor de nitrogênio e anatomia foliar na estação chuvosa e seca, 8 e 15 meses após a instalação do ensaio, respectivamente.

O cafezal foi conduzido tradicionalmente, seguindo as recomendações técnicas para o Sul de Minas Gerais, sendo as adubações e correções do solo realizadas conforme recomendado para a cultura (GUIMARÃES et al., 1999).

Com auxílio de um analisador portátil de trocas gasosas por infravermelho (IRGA LCA-4 ADC Hoddesdon, UK), foram avaliadas as seguintes características de trocas gasosas: densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativo (DFFFA), taxa fotossintética (A), condutância

estomática (gs), transpiração (E). Por meio dos valores de A e E foi calculada a eficiência do uso da água, definido pela razão A/E. Essas avaliações foram realizadas em dia típico, predominantemente claro, entre as 10 e 11 horas, em folhas completamente expandidas do terceiro nó de ramos plagiotrópicos do terço superior das plantas de café. Utilizou-se uma folha de cada planta e oito plantas por tratamento.

O teor de clorofila total (Chl a + b) foi quantificado segundo metodologia de Arnon (1949). Foram coletadas cinco folhas por repetição, no qual 0,5 g dos tecidos foliares foram homogeneizados em nitrogênio líquido e solubilizados em acetona 80% (v.v⁻¹). Em seguida, o extrato foi centrifugado a 8000 g por 15 minutos e o sobrenadante foi coletado para leitura em espectrofotômetro nos comprimentos de onda de 663 e 645 nm, as concentrações de clorofila a, b, e total foram calculadas segundo Arnon (1949). Para determinação do teor de nitrogênio foliar (N) foi utilizada a metodologia descrita por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

Os estudos anatômicos foram conduzidos utilizando-se o terço médio de folhas completamente expandidas do terceiro nó de ramos plagiotrópicos do terço superior das plantas. As folhas foram coletadas de oito plantas diferentes por tratamento e, essas foram fixadas em F.A.A. 70 (JOHANSEN, 1940) por 72 horas e posteriormente conservadas em etanol 70% (v.v⁻¹). As secções transversais foram obtidas em micrótomo de mesa tipo LPC e as secções paradérmicas à mão livre com uso de lâmina de aço, foram submetidas à clarificação com hipoclorito de sódio 50% (v.v⁻¹), tríplice lavagem em água destilada, coloração com solução safrablau (azul de astra 0,1% e safranina 1% na proporção de 7:3) para as secções transversais e safranina 1% para as secções paradérmicas sendo, posteriormente, montadas em lâminas semipermanentes com glicerol 50% (v.v-1) (KRAUS; ARDUIN, 1997).

As lâminas foram observadas e fotografadas em microscópio óptico, modelo Olympus BX 60, acoplado à câmera digital Canon A630. As imagens foram analisadas em software para análise de imagens UTHSCSA-Imagetool, com a medição de 20 campos para as variáveis das secções transversais e secções paradérmicas. Foram avaliadas: LIM= espessura do limbo foliar; PPA= espessura do parênquima paliçádico; CTA= espessura da cutícula da face adaxial; EAD= espessura da epiderme da face adaxial; EAB= espessura da epiderme da face abaxial. Para a caracterização dos estômatos, foi analisada a densidade estomática (número de estômatos por mm^2) e os diâmetros polar e equatorial, a partir de fotomicrografias obtidas em microscópio Olympus CBB.

O delineamento foi em blocos casualizados (DBC), sendo os tratamentos dispostos no esquema fatorial 5 x 2. Para todas as características avaliadas foi feita a análise estatística dos dados, de acordo com sugestões apresentadas por Pimentel-Gomes (2000) para análise de experimentos fatoriais. Os efeitos de tratamentos, bem como os desdobramentos das interações foram avaliados pelo teste F. As médias foram comparadas por meio da sobreposição do erro padrão da média. Já para algumas variáveis foi feita também a análise de regressão para avaliar os seus comportamentos em função dos níveis de radiação. Todas as análises estatísticas foram executadas no programa computacional SISVAR para Windows, versão 4.0 (FERREIRA, 2003).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com o emprego das telas plásticas, com o propósito de provocar reduções gradativas na radiação disponível para as plantas, foram adequados para os objetivos deste trabalho, pois verificou-se que a média sazonal de densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos decresceu com o aumento do nível de sombreamento. Com exceção do tratamento com 65% de sombra, que apresentou resultados semelhantes nas duas épocas de avaliação, todos os outros tratamentos apresentaram maior densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativo na estação chuvosa (Figura 1).

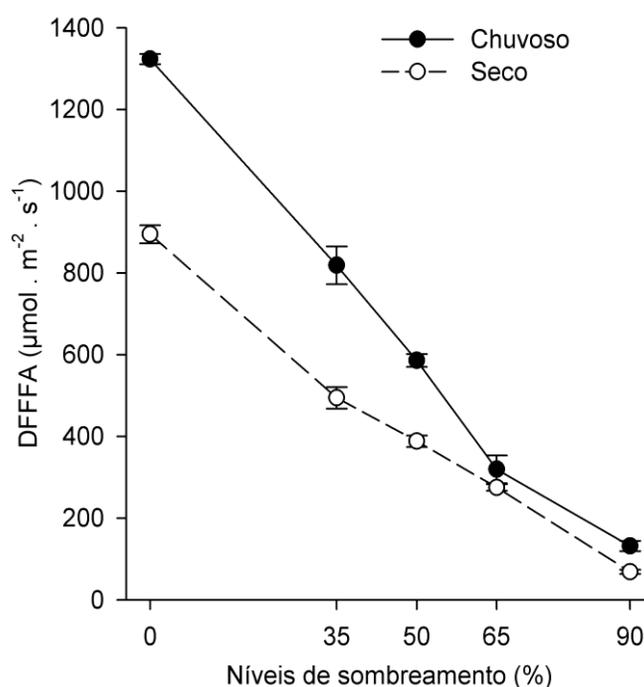


Figura 1. Densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA) em cafeeiros em produção sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (\circ) e chuvosa (\bullet). Barras de erro representam o erro padrão da média.

Para a taxa fotossintética, os cafeeiros cultivados a pleno sol, 35 e 50% de sombra apresentaram as maiores médias e foram superiores aos tratamentos com 65 e 90% (Figura 2a). Esses resultados foram semelhantes aos obtidos por Carelli et al. (1999), em estudo com mudas de cafeeiro (*C. arabica* e *C. canephora*) sombreadas, no qual não constataram diferença na taxa fotossintética entre mudas cultivadas em pleno sol e 50% de sombra. Verificou-se ainda que a exposição a partir do nível de 50% de sombra reduz em cerca de 50% a taxa máxima de assimilação de CO₂, em ambas as espécies.

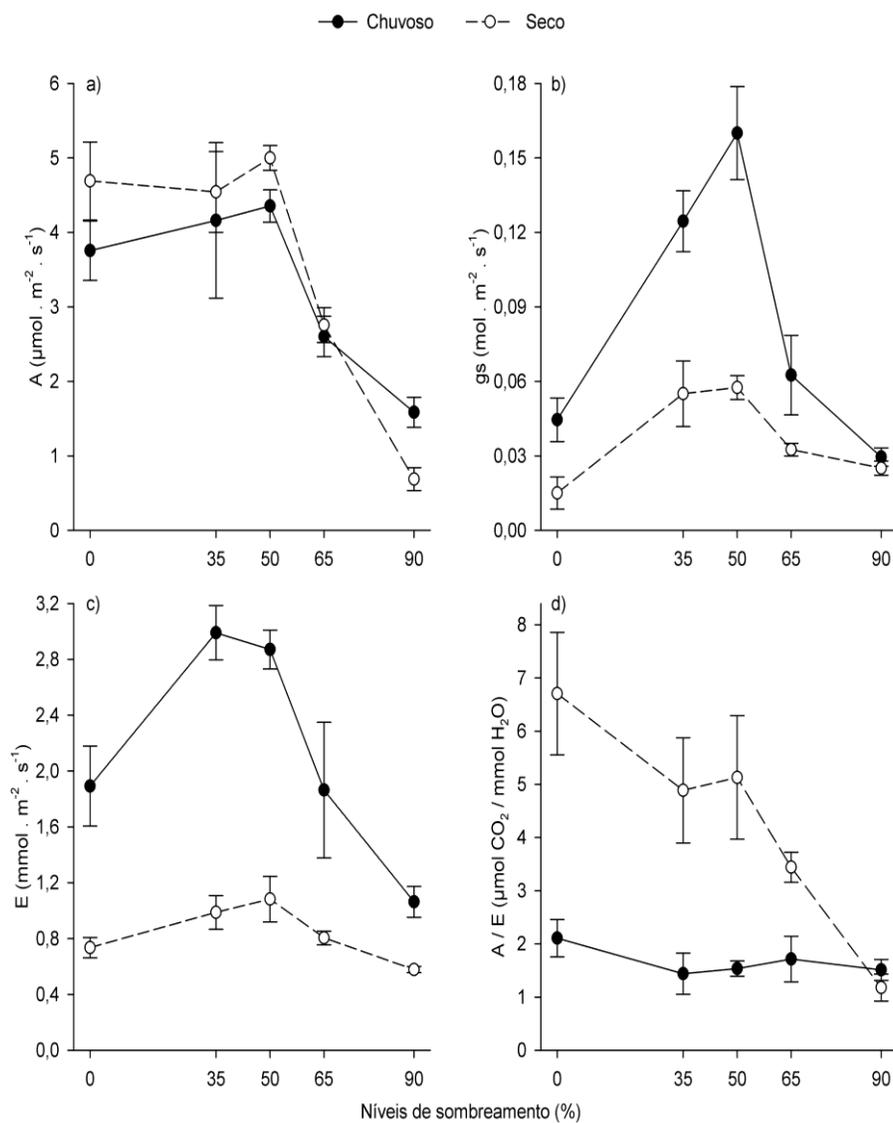


Figura 2. Taxa fotossintética (A) (a), condutância estomática (gs) (b), transpiração (E) (c) e eficiência do uso da água (A/E) (d) em cafeeiros em produção sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média.

Sabe-se que as maiores limitações para a produção do café sombreado é a queda na assimilação de CO₂ decorrente da baixa disponibilidade de radiação (DAMATTA, 2004; ZHOU; HAN, 2005). Dessa forma, a menor radiação disponível nos tratamentos com 65 e 90% de sombra pode ter promovido redução na taxa fotossintética, além de promover modificações estruturais como menor densidade estomática que desfavoreceu o fluxo de CO₂ para o interior da folha, bem como menores espessamentos do limbo foliar e do parênquima paliçádico que permitiram menor aproveitamento da radiação incidente. Esses resultados demonstram que o sombreamento em até 50% é importante na melhoria da estrutura interna das folhas do cafeeiro que podem permitir que mais carbono seja fixado em relação aos tratamentos sob maiores níveis de sombra (65 e 90%) que não promoveram esses benefícios.

Para a condutância estomática na estação chuvosa o maior valor ocorreu à 50% de sombra, seguido do tratamento com 35% de sombra, e os menores valores obtidos a pleno sol, 65 e 90%. No período seco, os maiores valores foram apresentados pelas plantas sob 35 e 50 % de sombra que apresentaram médias semelhantes e foram superiores aos demais tratamentos. As médias na estação chuvosa foram maiores que na estação seca, para os tratamentos com 35 e 50% de sombreamento (Figura 2b).

Os maiores valores de transpiração no período chuvoso foram encontrados nos níveis com 35 e 50% de sombra, seguidos pelos tratamentos a pleno sol e 65% de sombra, sendo as menores médias apresentadas pelo maior nível de sombra (90%). Na época seca, todos os níveis de radiação apresentaram valores de transpiração semelhantes. Na estação chuvosa, ocorreram os valores mais altos de transpiração quando comparada com a estação seca, com exceção do tratamento com 90% de sombra que apresentou médias semelhantes nas duas estações do ano (Figura 2c).

A condutância estomática e a transpiração são características diretamente relacionadas com a perda de água. Provavelmente, em cafeeiros cultivados a pleno sol a maior disponibilidade de radiação contribuiu para elevar a temperatura foliar, e conseqüentemente, intensificar a diferença de pressão de vapor entre o ar e a folha o que contribuiu para o fechamento dos estômatos (GOMES et al., 2008; KANTEN; VAAST, 2006; MORAIS et al., 2003). No entanto, a taxa fotossintética dessas plantas não foi alterada porque as folhas de sol possuem características adaptadas às condições de seca como maiores densidades estomáticas e estômatos menores, permitindo que os estômatos permaneçam abertos durante um tempo menor para captar a mesma quantidade de CO₂ (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). Já em cafeeiros cultivados nos menores níveis de radiação (65 e 90% de sombra) o fechamento dos estômatos ocorreu em decorrência da menor densidade estomática. Entre as estações constatou-se que o excedente hídrico, disponibilizando considerável quantidade de água no solo na estação chuvosa, proporcionou aumento da condutância estomática e transpiração das plantas (GOMES et al., 2008).

A relação entre a assimilação de CO₂ e transpiração, é um indicador da eficiência do uso da água. Espera-se que o cultivo do cafeeiro juntamente com espécies arbóreas possa contribuir para redução da velocidade do vento, da temperatura e aumento da umidade relativa do ar. Assim, a perda de água por meio da evapotranspiração excessiva será reduzida e, conseqüentemente, a eficiência do uso da água deverá aumentar (DAMATTA, 2004). No presente estudo, todos os níveis de radiação apresentaram médias semelhantes na estação chuvosa. Já para o período seco os maiores valores da eficiência do uso da água ocorreram a pleno sol, 35 e 50% de sombra, seguidos do tratamento com 65% de sombra, e os menores valores apresentados pelo nível com 90% de sombra. Em geral, os menores valores da eficiência do uso da água foram encontrados na estação chuvosa, com exceção do nível com 90% de sombra que apresentou

valores semelhantes nas duas épocas de avaliação (Figura 2d). Assim é possível inferir que os níveis com 65 e 90% de sombra não são favoráveis para o uso eficiente de água, devendo ser recomendados os níveis com 35 e 50% de sombra, especialmente durante a estação seca e/ou com alta demanda evaporativa, isso porque, uma maior eficiência do uso da água é traduzida em benefícios para a produção de cafeeiros.

Para o teor de clorofila total, razão entre clorofilas a/b e nitrogênio foliar todos os níveis de radiação apresentaram médias semelhantes. O teor de clorofila total e o teor de nitrogênio foliar foram influenciados pelas variações sazonais (estação chuvosa e seca), sendo os maiores valores apresentados na estação chuvosa (Figura 3abc).

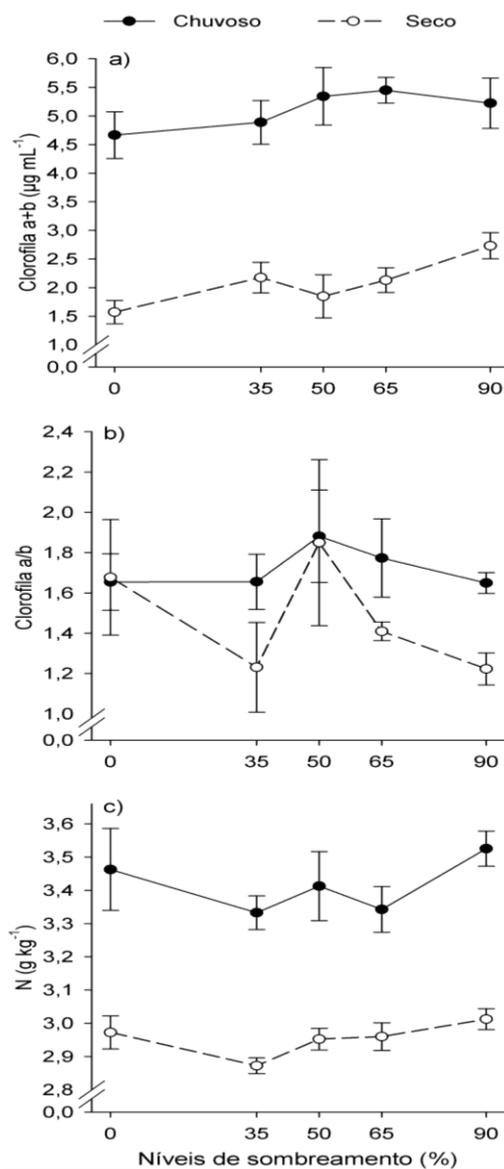


Figura 3. Teor de clorofila total (Chl a+b) (a), razão entre clorofilas a/b (Chl a/b) (b) e teor de nitrogênio foliar (N) (c) em cafeeiros em produção sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média.

De maneira geral as folhas quando cultivadas sob baixa disponibilidade de radiação, apresentam maior produção de clorofilas por unidade de peso (ADAMS; BAKER, 1998). Isso porque a clorofila é constantemente sintetizada e destruída (foto-oxidação) em presença de luz, mas sob intensidades luminosas muito altas a velocidade de decomposição é maior, sendo o equilíbrio estabelecido a uma concentração mais baixa. Espera-se também que a proporção entre clorofilas a e b diminua com a redução do nível de radiação (KRAMER; KOZLOWSKI, 1979). Contudo em cafeeiros (*C. arabica*), a produção do teor total de clorofila e a proporção de clorofilas a/b pode não alterar, conforme foi observado por Araujo et al. (2008) e Chaves et al. (2008), confirmando os resultados obtidos no presente estudo.

Para o teor de nitrogênio foliar todas as plantas de todos os tratamentos avaliados apresentaram valores acima do preconizado como valor ótimo (GUIMARÃES et al., 1999), indicando bom estado nutricional dos cafeeiros quanto ao nitrogênio foliar, razão pela qual não tenham sido detectadas diferenças entre os níveis de radiação e as estações do ano.

Em relação às avaliações na espessura dos tecidos foliares, as maiores médias para a espessura do limbo foliar foram observadas para os cafeeiros cultivados nos maiores níveis de radiação (pleno sol, 35 e 50% de sombra), enquanto os menores valores foram observados a 90% de sombra. Para espessura do parênquima paliçádico observou-se comportamento semelhante, ou seja, as maiores médias foram apresentadas pelos tratamentos conduzidos a pleno sol, 35 e 50% de sombra, e as menores médias obtidas nos maiores níveis de sombreamento (65 e 90%). Enquanto a espessura da cutícula não foi influenciada pelos níveis de radiação. Em geral as médias apresentadas por essas variáveis na estação seca foram maiores que na estação chuvosa (Figura 4abc).

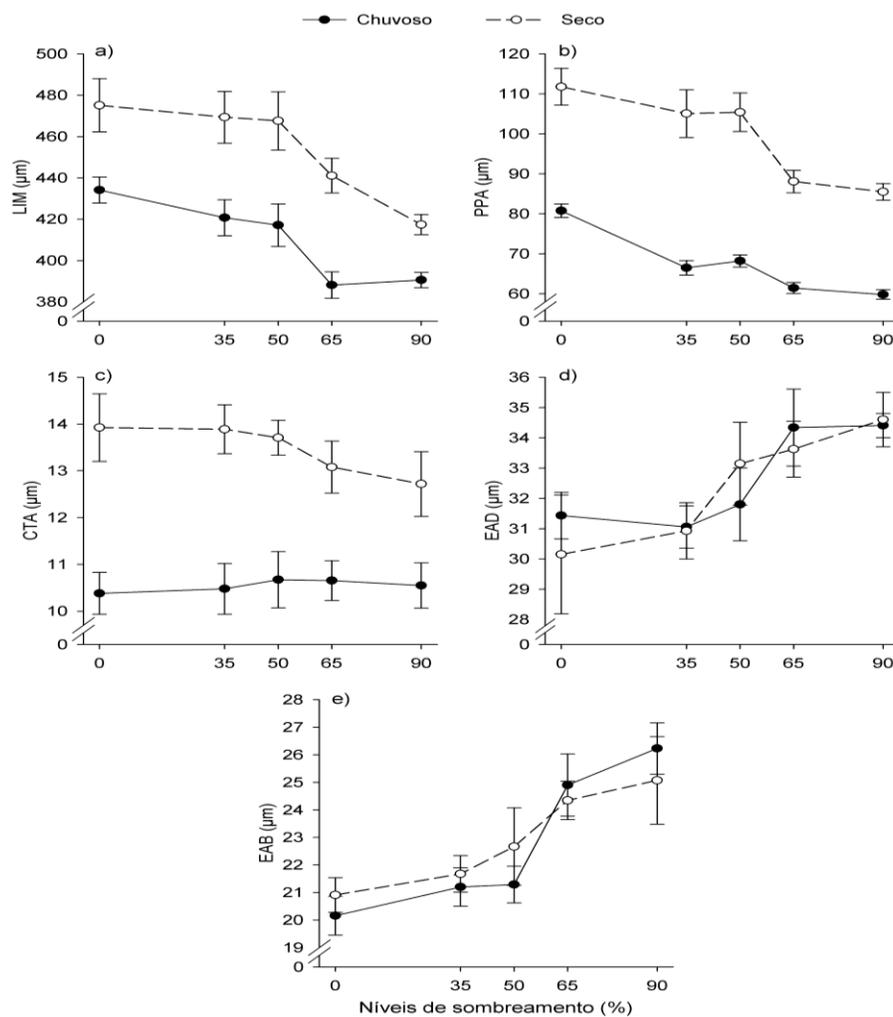


Figura 4. Espessura dos tecidos foliares (limbo foliar (LIM) (a), parênquima paliçádico (PPA) (b), cutícula da face adaxial (CTA) (c), epiderme da face adaxial (EAD) (d) e epiderme da face abaxial (EAB) (e)) de cafeeiros em produção sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média.

As folhas de sol geralmente são mais espessas que as folhas de sombra, sendo o espessamento do mesofilo uma característica xeromorfica que contribui para a esclerofilia (BOEGER; WISNIEWSKI, 2003; CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). No entanto, sabe-se que essa característica pode se modificar dependendo da condição ambiental em que as plantas são cultivadas (BATISTA et al., 2010; GRISI et al., 2008; SOUZA et al., 2010). No presente estudo, verificou-se que os níveis com 65 e 90% de sombra reduziram a espessura do limbo foliar e parênquima paliçádico, em comparação aos níveis com 35 e 50% que apresentaram espessura semelhante ao das plantas cultivadas a pleno sol. Dessa forma, níveis acima de 50% de sombra não contribuem para esclerofilia das folhas, desfavorecendo a estrutura interna dessas folhas.

Esse resultado é importante, visto que a especialização do parênquima clorofiliano conduz à eficiência fotossintética da planta, pois o parênquima paliçádico é o tecido mais especializado para a fotossíntese nas folhas com estrutura dorsiventral (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). Esses resultados permitem verificar que as folhas das plantas cultivadas em até 50% de sombra desenvolvem estruturas foliares com maior potencial para a fotossíntese, possibilitando a essas plantas melhores condições de aumento da produção em campo.

Resultados semelhantes foram obtidos por Fahl et al. (1994) e Voltan, Fahl e Carelli (1992), que verificaram que as mudas cafeeiras, quando cultivadas em ambiente sombreado, apresentam reduções na espessura do limbo foliar e do parênquima paliçádico.

Sabe-se que a cutícula mais espessada pode evitar a perda de água excessiva por transpiração, sendo, portanto um importante mecanismo de tolerância ao déficit hídrico (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). Espera-se aumento do espessamento da cutícula em plantas cultivadas sob os maiores

níveis de radiação, contudo em cafeeiros (*C. arabica*) a espessura da cutícula pode não variar, conforme foi observado por Voltan, Fahl e Carelli (1992) em trabalho realizado com mudas de diferentes cultivares de *C. arabica* e também no presente estudo.

Entre as estações avaliadas, notou-se que na estação seca houve maior espessamento do limbo foliar, parênquima paliçádico e cutícula da face adaxial, isso porque nesse período há menor disponibilidade hídrica e, conseqüentemente as plantas necessitam investir mais energia no espessamento desses tecidos, visando reduzir a perda de água.

As epidermes das faces adaxial e abaxial aumentam o espessamento com a redução da disponibilidade luminosa (Figura 4de). Uma das prováveis causas da maior distensão de células da epiderme com o aumento do sombreamento pode ser atribuída a diferentes concentrações de fitohormônios, especialmente da auxina (MORAIS et al., 2004). Dentre as suas funções, as auxinas exercem a promoção do crescimento e da distensão celular, e como uma das suas características é a fotossensibilidade, as moléculas de auxina concentram-se nas regiões menos iluminadas da folha. Como há maior concentração em regiões sombreadas, as folhas mais iluminadas apresentam maiores teores desse fitohormônio no mesofilo, enquanto que, em folhas sombreadas, as auxinas são encontradas em toda a folha, inclusive na epiderme (MEDRI; LLERAS, 1980). Resultados semelhantes foram verificados por Gomes et al. (2008) e Morais et al. (2004) em trabalhos com cafeeiros sombreados por *Cajanus cajan* e *Acacia mangium*, respectivamente.

Para a densidade estomática houve um aumento do número de estômatos por mm² com o aumento da luminosidade (Figuras 5 e 6a). Em geral, os maiores valores para essa variável foram apresentados na estação seca (Figura 6a).

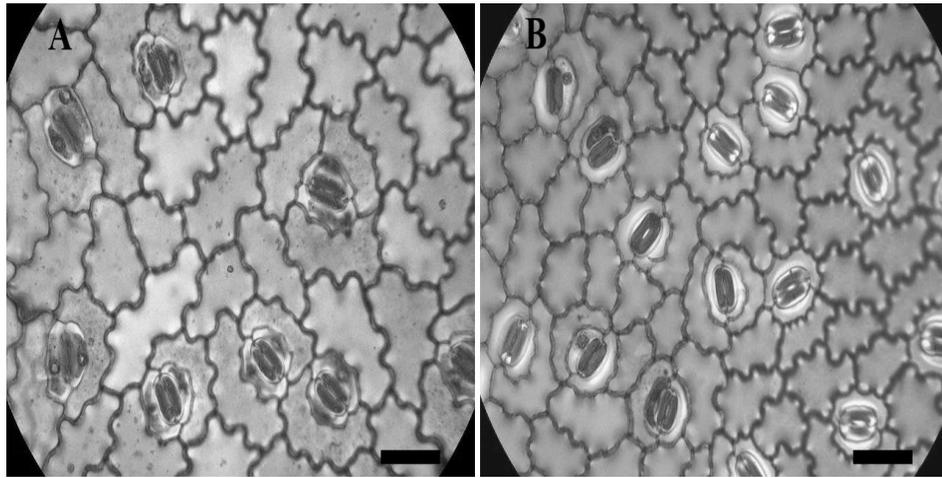


Figura 5. Fotomicrografias de secções paradérmicas de folhas de cafeeiros em produção, sob diferentes níveis de radiação (A – 90% de sombra; B – pleno sol). Barra = 50 μm .

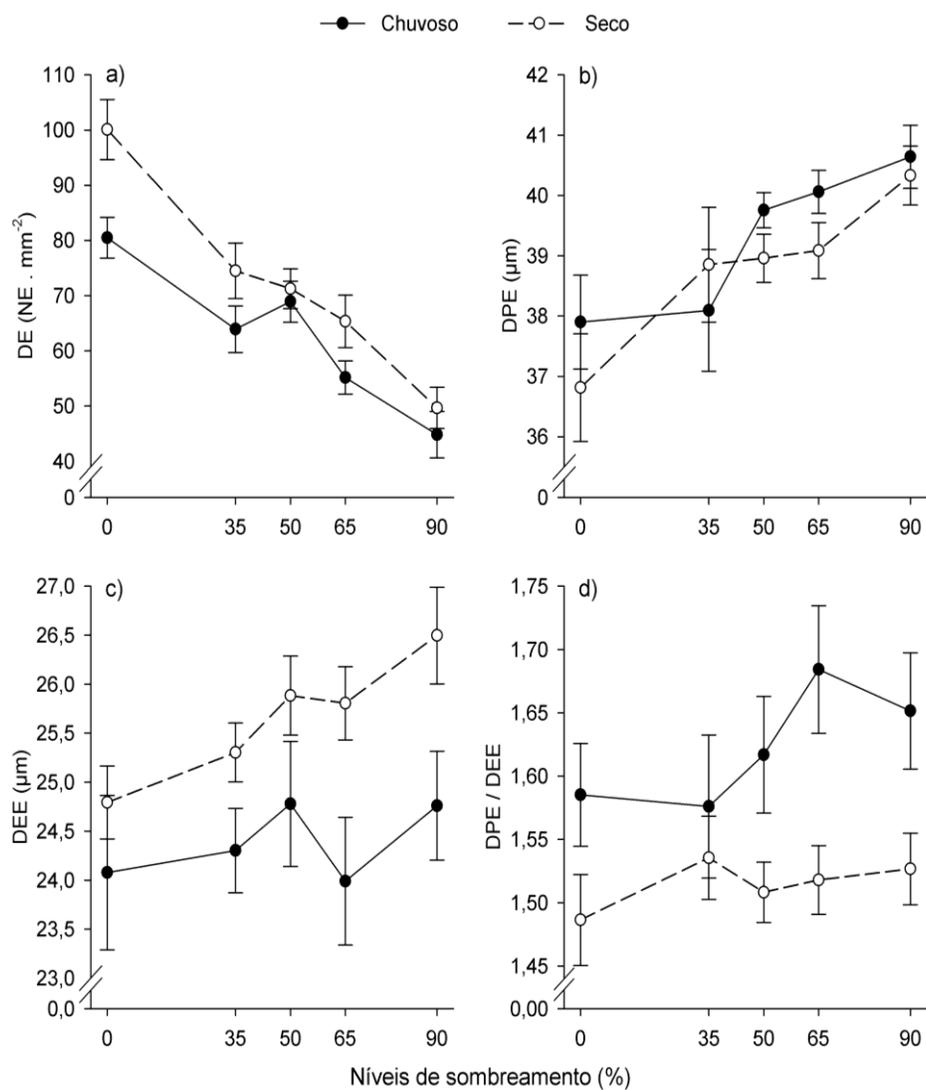


Figura 6. Densidade estomática (DE) (a), diâmetro polar dos estômatos (DPE) (b), diâmetro equatorial dos estômatos (DEE) (c) e relação diâmetro polar e equatorial dos estômatos (DPE/DEE) (d) em cafeeiros em produção sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●). Barras de erro representam o erro padrão da média.

O aumento da densidade estomática pode ser relacionado com uma maior capacidade das plantas em captar o CO₂ da atmosfera e, dessa forma, aumentar a eficiência fotossintética por permitir que mais desse gás seja fixado (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). Assim, a redução da taxa fotossintética observada nos maiores níveis de sombra (65 e 90%) pode ser atribuída à redução da densidade estomática verificada nesses níveis.

Segundo Castro, Pereira e Paiva (2009), condições ambientais como diferentes níveis de radiação alteram o tamanho e a densidade dos estômatos, com intuito de auxiliar a planta na tolerância dessa condição. Em ambientes com maior disponibilidade de radiação, verifica-se diminuição no tamanho dos estômatos, para que haja uma menor perda de água da planta para o ambiente, havendo simultâneo aumento de sua densidade, contribuindo para o equilíbrio das trocas gasosas.

O diâmetro polar dos estômatos foi reduzido com o aumento do nível de radiação. A redução no diâmetro polar dos estômatos pode estar relacionada com estômatos de tamanho menor, resultado esse que possibilitou o aumento da densidade estomática nos tratamentos sob maior abundância de radiação (Figura 6ab).

O diâmetro equatorial dos estômatos e a relação diâmetro polar/equatorial não foram influenciados pelos níveis de radiação (Figura 6cd). A relação diâmetro polar e diâmetro equatorial indica o formato dos estômatos e, quando apresenta maior valor, indica uma maior funcionalidade do estômato, por seu formato elipsóide (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009).

A disponibilidade de luz no ambiente provoca modificações na anatomia foliar das plantas que podem limitar ou favorecer potencialmente o processo fotossintético (CASTRO; PEREIRA; PAIVA, 2009). Na Figura 7 estão representadas as equações de regressão e os coeficientes de determinação das

características anatômicas que favoreceram o aumento da taxa fotossintética. Observa-se que todas as variáveis apresentaram modelos ajustados com efeito depressivo nos maiores níveis de sombra.

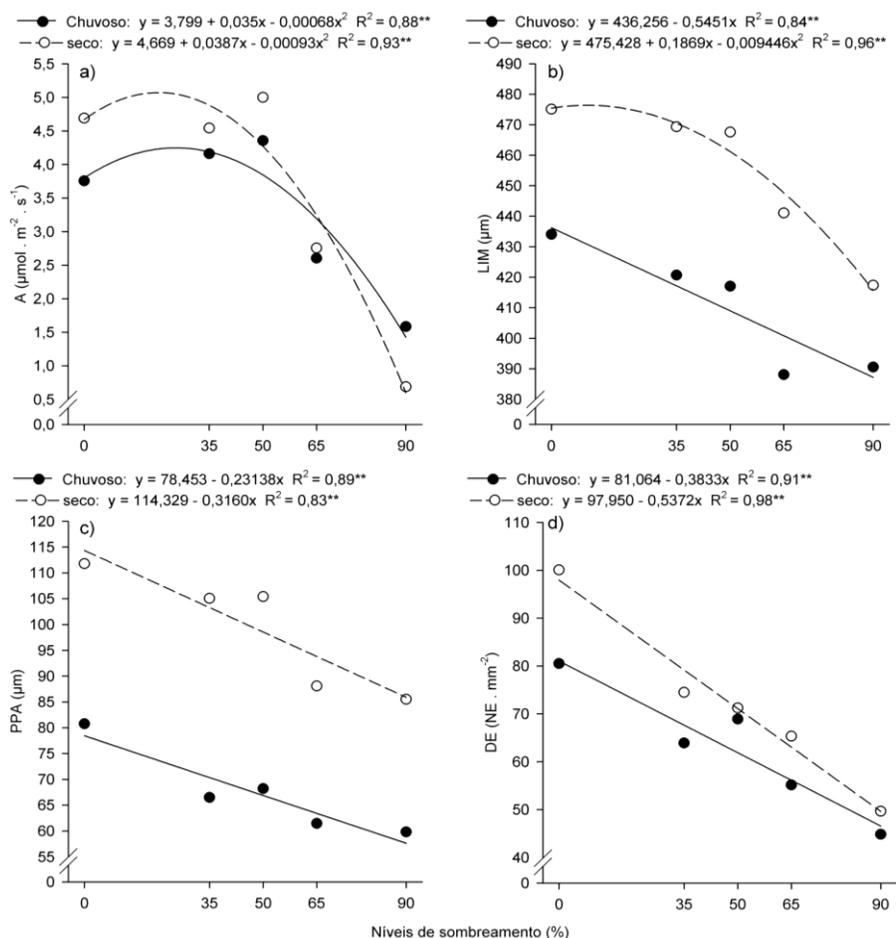


Figura 7. Equação de regressão e coeficiente de determinação para as variáveis taxa fotossintética (A) (a), espessura do limbo foliar (LIM) (b), espessura do parênquima paliçádico (PPA) (c) e densidade estomática (DE) (d) em cafeeiros em produção, sob diferentes níveis de radiação durante a estação seca (○) e chuvosa (●).

Observou-se efeito quadrático dos níveis de radiação sobre a taxa fotossintética, com coeficientes de determinação de 88% e 93% nas estações chuvosa e seca, respectivamente. Os pontos de máximo foram, respectivamente, iguais a 26% e 21%, ocorrendo efeito depressivo nos maiores níveis de sombra (Figura 7a). Dessa forma, a partir de 26% e 21% de sombra, no período chuvoso e seco, respectivamente, a taxa fotossintética passa a ser limitada pela redução da disponibilidade de luz no ambiente. Fahl e Carelli (2007), na região de Campinas, no estado de São Paulo, também observaram que o sombreamento moderado, em torno de 30% favoreceu os processos fisiológicos do cafeeiro (*C. arabica*).

No período chuvoso, notou-se efeito linear dos níveis de radiação sobre a espessura do limbo foliar, com coeficiente de determinação de 84%. A equação de regressão demonstrou uma redução média de 54,51µm na espessura do limbo foliar para cada 10% de incremento no nível de sombreamento. No período seco, verificou-se um efeito quadrático dos níveis de radiação sobre a espessura desse tecido, com coeficiente de determinação de 96%. O ponto máximo ocorreu no nível com 10% de sombra, e a partir desse valor foi verificado efeito depressivo (Figura 7b).

Para espessura do parênquima paliçádico, as equações de regressão apresentaram coeficientes de determinação de 84% e 96% nas estações chuvosa e seca, respectivamente. As reduções na espessura do parênquima paliçádico ao diminuir a radiação do ambiente a pleno sol para 90% de sombra foram, respectivamente, de 27% e 25% (Figura 7c).

Ao comparar-se a densidade estomática do ambiente com 100% de radiação (pleno sol) com a do ambiente com 90% de sombra ocorreu uma queda de 43% e 49% nas estações chuvosa e seca, respectivamente. Para cada 10% de aumento do nível de sombreamento houve uma redução de 5% e 6% na

densidade estomática para os períodos chuvoso e seco, respectivamente (Figura 7d).

4 CONCLUSÃO

Em cafeeiros em fase de produção os níveis de radiação pouco modificam o teor total de clorofila e a proporção de clorofilas a/b.

O aumento da disponibilidade de radiação provoca aumento da espessura foliar e da densidade estomática, além de redução no tamanho dos estômatos de cafeeiros em fase de produção. Essas modificações favorecem potencialmente o processo fotossintético até o nível com 50% de sombra, sendo mais indicado o nível com cerca de 20% de sombra.

A maior taxa fotossintética ocorre nos níveis com 21% e 26% de sombra, em condições de baixa e alta disponibilidade hídrica, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG e ao INCT Café, pelo auxílio financeiro na condução dos experimentos e ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS

ADAMS, W. W. I. I. I.; BAKER, D. H. Seasonal changes in xanthophylls cycle-dependent energy dissipation in *Yucca glauca* Nuttall. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 21, n. 5, p. 501-511, Sept. 1998.

ARAÚJO, W. L. et al. Limitations to photosynthesis in coffee leaves from different canopy positions. **Plant Physiology and Biochemistry**, Paris, v. 46, n. 10, p. 884-890, 2008.

ARNON, D. I. Copper enzymes in isolates chloroplasts: polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. **Plant Physiology**, Davis, v. 24, n. 1, p. 1-15, 1949.

BATISTA, L. A. et al. Anatomia foliar e potencial hídrico na tolerância de cultivares de café ao estresse hídrico. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 41, n. 3, p. 475-481, 2010.

BOEGER, M. R. T.; WISNIEWSKI, C. Comparação da morfologia foliar de espécies arbóreas de três estádios sucessionais distintos de floresta ombrófila densa (Floresta Atlântica) no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 61-72, jan./fev. 2003.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Normais climatológicas 1961-1990**. Brasília, 1992. 84 p.

CAMPANHA, M. M. et al. Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 63, n. 1, p. 75-82, Jan. 2004.

CARELLI, M. L. C. et al. Carbon isotope discrimination and gas exchange in *Coffea* species grown under different irradiance regimes. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Brasília, v. 11, n. 2, p. 63-68, mar./abr. 1999.

CASTRO, E. M. de; PEREIRA, F. J.; PAIVA, R. **Histologia vegetal: estrutura e função de órgãos vegetativos**. Lavras: UFLA, 2009. 234 p.

CHAVES, A. R. M. et al. Seasonal changes in photoprotective mechanisms of leaves from shaded and unshaded Field-grown coffee (*Coffea arabica* L.) trees. **Trees**, Santa Monica, v. 22, n. 3, p. 351-361, May 2008.

DAMATTA, F. M. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. **Field Crops Research**, Phoenix, v. 86, n. 2/3, p. 99-114, 2004.

DAMATTA, F. M. et al. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Londrina, v. 19, n. 4, p. 485-510, July/Aug. 2007.

FAHL, J. I.; CARELLI, M. L. C. Os estudos sobre a fisiologia do cafeeiro no Instituto Agrônômico. **O Agrônômico**, Campinas, v. 59, n. 1, p. 41-43, 2007.

FAHL, J. I. et al. Nitrogen and irradiance levels affecting net photosynthesis and growth of young coffee plants (*Coffea arabica* L.). **Journal of Horticultural Science**, Ashford, v. 69, n. 1, p. 161-169, Mar. 1994.

FERREIRA, D. F. **SISVAR - Sistema para Análise de Variância de Dados Balanceados**: programa de análises estatísticas e planejamento de experimentos. Versão 4. Lavras: UFLA, 2003. Software.

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. 109-115, jan./fev. 2008.

GRISI, F. A. et al. Avaliações anatômicas foliares em mudas de café 'Catuaí' e 'Siriema' submetidas ao estresse hídrico. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 6, p. 1730-1736, nov./dez. 2008.

GROSSMAN, J. M. Exploring farmer knowledge of soil processes in organic coffee systems of Chiapas, Mexico. **Geoderma**, Amsterdam, v. 111, n. 3/4, p. 267-287, Mar./Apr. 2003.

GUIMARÃES, P. T. G. et al. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa, MG: UFV, 1999. p. 289-302.

JARAMILLO-BOTERO, C.; MARTINEZ, H. E. P.; SANTOS, R. H. S. Características do café (*Coffea arabica* L.) sombreado no norte da América latina e no Brasil: análise comparativa. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 94-102, 2006.

JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York: McGraw Hill, 1940. 523 p.

KANTEN, R. V.; VAAST, P. Transpiration of arabica coffee and associated shade tree species in sub-optimal, low-altitude conditions of Costa Rica. **Agroforestry Systems**, Amsterdam, v. 67, n. 2, p. 187-202, Apr. 2006.

KRAMER, T.; KOSLOWISKI, T. **Physiology of woody plants**. New York: Academic, 1979. 811 p.

KRAUS, J. E.; ARDUIN, M. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. Rio de Janeiro: EDUR, 1997. 198 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MEDRI, M. E.; LLERAS, E. Aspectos da anatomia de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 10, n. 3, p. 463-493, 1980.

MORAIS, H. et al. Características fisiológicas e de crescimento de cafeeiro sombreado com guandu e cultivado a pleno sol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1131-1137, out. 2003.

_____. Modifications on leaf anatomy of *Coffea arabica* caused by shade of Pigeonpea (*Cajanus cajan*). **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 47, n. 6, p. 863-871, Nov./Dec. 2004.

NASCIMENTO, E. A. do et al. Alterações morfofisiológicas em folhas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) consorciado com seringueira (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 852-857, maio/jun. 2006.

OGUCHI, R.; HIKOSAKA, K.; HIROSE, T. Leaf anatomy as a constraint for photosynthetic acclimation: differential responses in leaf anatomy to increasing growth irradiance among three deciduous trees. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 28, n. 7, p. 916-927, July 2005.

PANDEY, S.; KUSHWAHA, R. Leaf anatomy and photosynthetic acclimation in *Valeria jatamansi* L. grown under high and low irradiance. **Photosynthetica**, Praha, v. 43, n. 1, p. 85-90, Jan. 2005.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 14. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2000. 477 p.

SAES, M. S. M.; SOUZA, M. C.; OTANI, M. N. Strategic alliances and sustainable coffee production: the shaded system of Baturite, state of Ceará, Brazil. **International Food and Agribusiness Management Review**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 19-29, 2003.

SOUZA, T. C. et al. Leaf plasticity in successive selection cycles of 'Saracura' maize in response to periodic soil flooding. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 1, p. 16-24, jan. 2010.

VOLTAN, R. B. Q.; FAHL, J. I.; CARELLI, M. L. C. Variação na anatomia foliar de cafeeiros submetidos a diferentes intensidades luminosas. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 4, n. 2, p. 99-105, 1992.

ZHOU, Y. M.; HAN, S. J. Photosynthetic response and stomatal behaviour of *Pinus koraiensis* during the fourth year of exposure to elevated CO₂ concentration. **Photosynthetica**, Amsterdam, v. 43, n. 3, p. 445-449, 2005.