

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

LIMA DELEON MARTINS

IMPLICAÇÕES DAS ALTERAÇÕES AMBIENTAIS EM *Coffea* spp.

ALEGRE-ES

2015

LIMA DELEON MARTINS

IMPLICAÇÕES DAS ALTERAÇÕES AMBIENTAIS EM *Coffea* spp.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de *Doctor Scientiae* em Produção Vegetal, na área de concentração de Fitotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Antonio Tomaz

ALEGRE-ES

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)

(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Martins, Lima Deleon, 1986-

M386i Implicações das alterações ambientais em *Coffea* spp. / Lima Deleon
Martins. – 2015.

155 f. : il.

Orientador: Marcelo Antonio Tomaz.

Coorientadores: José D. Cochicho Ramalho ; Alexandre Rosa dos Santos
; Waldir Cintra de Jesus ; José Francisco Teixeira do Amaral .

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do
Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Dióxido de carbono. 2. Cafeeiro. 3. Mitigação. 4. Mudanças climáticas.
5. Temperatura. 6. Chuva. I. Tomaz, Marcelo Antonio. II. Ramalho, José D.
Cochicho. III. Santos, Alexandre Rosa dos. IV. Jesus, Waldir Cintra de.
V. Amaral, José Francisco Teixeira do. VI. Universidade Federal do Espírito
Santo. Centro de Ciências Agrárias. VII. Título.


CDU: 63

LIMA DELEON MARTINS

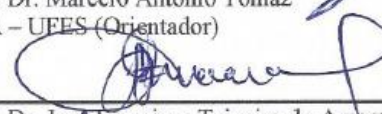
IMPLICAÇÕES DAS ALTERAÇÕES AMBIENTAIS EM *Coffea spp.*

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de *Doctor Scientiae* em Produção Vegetal, na área de concentração em Fitotecnia.

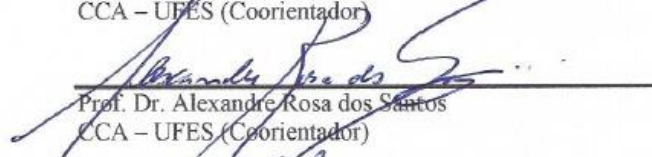
Aprovada em 13 de novembro de 2015.



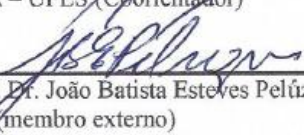
Prof. Dr. Marcelo Antonio Tomaz
CCA – UFES (Orientador)



Prof. Dr. José Francisco Teixeira do Amaral
CCA – UFES (Coorientador)



Prof. Dr. Alexandre Rosa dos Santos
CCA – UFES (Coorientador)



Prof. Dr. João Batista Esteves Pelúzio
Ifes (membro externo)

DEDICO

À minha mãe, Maria de Lourdes Ogioni Martins,
que apostou na educação de seus filhos;
ensinando-os o real sentido sobre os princípios
sólidos e inalteráveis de um ser humano.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA-Ufes), Alegre, Espírito Santo, Brasil, pela oportunidade de estudo.

Ao Grupo Interações Planta-Ambiente (PlantStress), Centro de Ambiente, Agricultura e Desenvolvimento (BioTrop), Instituto de Investigação Científica Tropical, I.P. (IICT), Oeiras, Portugal; ao Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, I.P. (INIAV), Oeiras, Portugal; ao Centro de Estudos Florestais, DRAT, Instituto Superior Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal (ISA); ao Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal (UNL), a todos estes agradeço pelo acolhimento e oportunidade de experimentação.

À CAPES e ao Programa de Doutorado Sanduiche no Exterior (PDSE 12226/12-2) pela bolsa de estudos concedidas no Brasil e em Portugal; e a Fundação para Ciência e Tecnologia FCT - Portugal pelo financiamento do projeto (PTDC/AGR-PRO/3386/2012).

Ao Prof. Dr. Marcelo Antonio Tomaz, professor do Departamento de Produção Vegetal do CCA-UFES, e ao Dr. José Cochicho Ramalho, pesquisador do Instituto de Investigação Científica Tropical, I.P., Oeiras, Portugal (IICT), pelo acolhimento, pelas orientações, pelos conselhos, pela amizade e, principalmente, pelo respeito. Obrigado!

Aos professores e pesquisadores Dr. Waldir Cintra de Jesus Junior (UFSCar, Brasil), Dr. José Francisco Teixeira do Amaral (Ufes, Brasil), Dr. Alexandre Rosa dos Santos (Ufes, Brasil), Dr. Edvaldo Fialho dos Reis (Ufes), Dr. João Batista Esteves Peluzio (Ifes, Brasil), Dr. Bruno Galvêas Laviola (EMBRAPA, Brasil), Dra. Ana Ribeiro (IICT, Portugal), Dra. Ana Rodrigues (ISA, Portugal), Dra. Paula Scotti-Campos (INIAV, Portugal) e Dr. Fernando Lidon (UNL, Portugal) pelos conselhos e orientações durante este período.

A Portugal e a todas as pessoas que tangenciei o caminho, em especial aos amigos Antônio Eduardo Leitão, José Nobre Semedo, Isabel Pais, Ana Fortunato, Paula Batista Santos, Isabel Palos, Karliana Oliveira, Filipe Colwell, Sara Domingos, Nuno Duro, Elisabete Lopes e também a Fernando Reboredo, Luís Goulão, Danielle Barros, Maria Umbelina Dias, Sandra Sousa e Leonor Guerra Guimarães.

Aos amigos da Residência de Investigadores, da estação agrônômica de Oeiras, Portugal, em especial a Adrian Hernandez Mendoza, Laura Sanchez Carvajal e seus filhos Emma e David; Audry Gilmour e Eliza Rosemary, Tariq Mohammad; Kátia Pôssa, Joel e seu filho Miguel; Marta Alves e aos amigos brasileiros em Portugal, em especial a Anderson Sasaki Vasques Pacheco, Karin Vieira da Silva, Jaime Dias de Oliveira Júnior e Jacimara Villar Forbeloni.

Em especial, agradeço imensamente aos amigos da equipe do Café da Ufes, Wagner Nunes Rodrigues, Sebastião Vinícius Batista Brinati, Tafarel Victor Colodetti, Lindomar Souza Machado e Fernando Coelho Eugenio, pela amizade e parceria, e principalmente pelo fato de que nada disso seria possível sem a ajuda de todos vocês.

Não menos importante, agradeço a toda minha família e também a todos os amigos que considero família, pelo apoio, amor, amizade e principalmente pela compreensão das inúmeras ausências durante este tempo; sendo todos peças fundamentais para atingir esta meta.

“Eu perdi o meu medo, meu medo, meu medo da chuva. Pois a chuva voltando para terra, traz coisas boas do ar. Aprendi o segredo, o segredo, o segredo da vida, vendo as pedras que choram sozinhas no mesmo lugar. ”

Raul Seixas

BIOGRAFIA

Lima Deleon Martins, em dezembro de 2003, formou-se Técnico em Agropecuária, na Escola Agrotécnica Federal de Alegre (EAFA-ES, atualmente Ifes, campus de Alegre, ES). Em agosto de 2009, graduou-se em Engenharia Agrônoma pela Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes), em Alegre, ES. Em agosto de 2009, iniciou o Curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA/Ufes), tendo defendido dissertação em 16 de agosto de 2011. Em março de 2012, iniciou o Curso de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCA/Ufes), com período de sanduíche (27/12/2012 a 23/12/2013) no Instituto de Investigação Científica Tropical (IICT), situado em Oeiras, Portugal, tendo retornado e defendido Tese em 13 de novembro de 2015.

RESUMO

O objetivo central foi estudar as implicações das alterações ambientais em *Coffea* spp. O primeiro capítulo apresentou um âmbito geral sobre o potencial impacto das mudanças climáticas sobre o desenvolvimento do cafeeiro, com foco nas implicações do dióxido de carbono (CO₂) e da temperatura do ar. O segundo, resultou do ensaio que objetivou submeter plantas de dois genótipos de *Coffea arabica* e um de *C. canephora*, em vasos, sob condições controladas de irradiância (800 μmol m⁻² s⁻¹), umidade relativa (75%) a duas condições de [CO₂] (380 ou 700 μL CO₂ L⁻¹) durante aproximadamente um ano, sem restrições de água, nutrientes ou de desenvolvimento radicular. Os resultados apontaram que em todos os genótipos, a alta [CO₂] promoveu tendências opostas para densidade e tamanho dos estômatos, que diminuíram e aumentaram, respectivamente. Independentemente do genótipo ou da [CO₂], a taxa de assimilação líquida de CO₂ aumentou (34-49%) quando medida a 700 em comparação a 380 μL de CO₂ L⁻¹. Este resultado, juntamente com a condutância estomática quase inalterados, levou a um aumento de eficiência do uso da água instantânea. Os resultados também mostraram um reforço de componentes fotossintéticos (e respiratório), ou seja, do transporte de elétrons nos tilacóide e das atividades de enzimas, o que pode ter contribuído para a melhoria nas taxas máximas de transporte de elétrons, na carboxilação e na capacidade fotossintética sob elevada [CO₂], embora estas respostas tenham sido independentes dos genótipos. A eficiência do fotossistema II, energia dirigida aos eventos fotoquímicos, carboidratos não-estruturais, pigmento fotossintético e permeabilidade da membrana não respondeu ao aumento da [CO₂]. Apesar de algumas diferenças entre os genótipos, não há respostas claras em relação ao comportamento dos genótipos a elevada [CO₂]. No geral, como nenhum sinal aparente de regulação negativa fotossintética (*down-regulation*) foi encontrado, os resultados sugerem que plantas de *Coffea* spp. podem suportar com sucesso a alta [CO₂], sob as atuais condições experimentais. O terceiro capítulo, pretendeu proporcionar um primeiro vislumbre sobre o efeito do impacto combinado da elevada [CO₂] e da alta temperatura sobre o conteúdo mineral e equilíbrio em plantas de *Coffea* spp.. Foram cultivados, em vasos, dois genótipos de *Coffea arabica* (cv. Icatu e IPR 108) e um de *C. canephora* (cv. Conilon Clone 153) em 380 ou 700 μL de CO₂ L⁻¹, por um ano, após foram expostas a um aumento gradual da temperatura de 25/20 °C (dia/noite) até 42/34 °C, ao longo de 8 semanas. Na temperatura de controle, plantas crescidas em 700 μL de CO₂ L⁻¹ apresentaram um efeito de diluição moderada (entre 7% e 25%) no clone 153 (para N, Mg, Ca, Fe) e em Icatu (para N, K e Fe), mas não em IPR 108 (exceto para Fe) quando comparada com plantas crescidas a 380 μL de CO₂ L⁻¹, nesta mesma condição,

com o aumento da temperatura houve uma diminuição dos teores nutricionais. Apesar das mudanças promovidas pela [CO₂] e temperatura, a grande maioria das relações minerais foram mantidas dentro de uma faixa consideravelmente adequada, o que sugere que esta planta pode se manter estável em relação ao balanço mineral em um contexto de mudanças climáticas. O quarto capítulo, apresenta uma análise de variáveis climáticas históricas de forma espacial e temporal para caracterização da vulnerabilidade climática de microrregiões na busca de estratégias de mitigação e adaptação que possam subsidiar a melhoria dos sistemas de produção de plantas de café conilon, sendo considerado o Estado do Espírito Santo, Brasil, como estudo de caso. Os resultados indicam que a vulnerabilidade em áreas de cultivo de café robusta está ligada a alta temperatura do ar, ao baixo índice de precipitação pluvial, a sazonalidade da precipitação pluvial e ao déficit hídrico. As estratégias de adaptação e mitigação de maior potencial apontam para o plantio de clones melhorados de café robusta, para a utilização de sistemas de policultivos, arborizados e sombreados, para o adensamento de plantas de café conilon, para implantação de sistemas de irrigação e para a utilização de manejo de plantas espontâneas.

Palavras-chave: cafeeiro; dióxido de carbono; mitigação; mudança climática; temperatura do ar.

ABSTRACT

The overall objective was to study the implications of environmental change in *Coffea* spp. The first chapter presents an overview of the potential impact of climate change on the development of the coffee, focused on carbon dioxide (CO₂) and air temperature implications. The second chapter, the test result aimed subjecting plants two genotypes of *C. arabica* and one *C. canephora* in pots under controlled conditions of irradiance (800 μmol m⁻² s⁻¹), relative humidity (75%) of the two conditions of [CO₂] (380 and 700 μL CO₂ L⁻¹) for about a year without water restrictions, nutrients or root development. The results showed that in all genotypes, high [CO₂] promoted opposing tendencies to density and size of the stomata, which decreased and increased, respectively. Irrespective of the genotype or [CO₂], the liquid uptake rate of CO₂ was increased (34-49%) when measured at 700 μL CO₂ L⁻¹. This result, together with the stomatal conductance almost unchanged, led to an increase of the instantaneous water use efficiency. The results also showed an increase of photosynthetic components, namely the transport thylakoid electrons and enzymes activities, which may have contributed to the improvements in the maximum rates of electron transport, carboxylation and photosynthetic capacity under high [CO₂], although these responses were independent of genotype. The efficiency of photosystem II, directed energy to photochemical events, non-structural carbohydrates, photosynthetic pigment and membrane permeability did not respond to the increase [CO₂]. Despite some differences between genotypes, there are no clear answers regarding the behavior of the genotypes elevated [CO₂]. In general, as no apparent down-regulation was found, the results suggest that *Coffea* spp. plants. They can deal successfully for high [CO₂], under the present experimental conditions. The third chapter intended to provide a first glimpse of the effect of the combined impact of elevated [CO₂] and high temperature on the mineral content and balance in this important tropical culture. Have been grown in pots, two genotypes of *C. arabica* (cv. Icatu and IPR 108) and one *C. canephora* (cv. Conilon Clone 153) in 380 and 700 μL CO₂ L⁻¹ for a year after were exposed a gradual increase of 25/20 °C (day/night) to 42/34 °C, during eight weeks. In the temperature control plants grown in 700 μL CO₂ L⁻¹ showed a moderately dilution effect (between 7% and 25%) in clone 153 (for N, Mg, Ca, Fe) and Icatú (for N, K and Fe), but not in IPR 108 (except Fe) as compared to plants grown at 380 μL CO₂ L⁻¹ in the same condition with increasing temperature there was a decrease of the nutritional content. Despite the changes promoted by the [CO₂] and temperature, the vast majority of minerals relations were maintained within a broadly adequate range, suggesting that this plant can remain stable in relation to the mineral balance in a context of climate change and

global warming. The fourth chapter presents an analysis of historical climate variable spatial and temporal way to characterize the climate vulnerability of micro-regions, considered the state Espírito Santo, Brazil, as a case study. The results indicate that the vulnerability Robusta coffee growing areas is linked to high air temperature, low rainfall levels, seasonality of rainfall and drought. Adaptation strategies and greater mitigation potential link to the planting of improved clones of Robusta coffee for the use of polycultures systems, wooded and shaded, for the consolidation of conilon coffee trees, for the implementation of irrigation systems and the use management of weeds.

Keywords: coffee plant; carbon dioxide; mitigation; climate change; air temperature.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	12
REFERÊNCIAS	20
CAPÍTULO 1.....	29
PERFORMANCE FOTOSSINTÉTICA DE <i>Coffea</i> spp. SUSTENTADA NO LONGO PRAZO SOB ELEVADA [CO₂]	29
RESUMO	29
ABSTRACT.....	30
INTRODUÇÃO.....	30
MATERIAL E MÉTODOS.....	34
RESULTADOS	47
DISCUSSÃO	59
CONCLUSÕES.....	65
REFERÊNCIAS	65
CAPÍTULO 2.....	77
EFEITOS COMBINADOS DA [CO₂] ELEVADA E ALTA TEMPERATURA NO EQUILÍBRIO MINERAL FOLIAR EM PLANTAS <i>Coffea</i> spp.	77
RESUMO	77
ABSTRACT.....	77
INTRODUÇÃO.....	78
MATERIAL E MÉTODOS	81
RESULTADO	83
DISCUSSÃO.....	91
CONCLUSÕES	95
REFERÊNCIAS	95

CAPÍTULO 3.....	105
ANÁLISE SISTEMÁTICA INDICA ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO E ADAPTAÇÃO À VULNERABILIDADE CLIMÁTICA EM <i>Coffea canephora</i>....	105
RESUMO	105
ABSTRACT.....	105
INTRODUÇÃO.....	106
MATERIAL E MÉTODOS.....	108
RESULTADOS	112
DISCUSSÃO	129
CONCLUSÕES.....	142
REFERÊNCIAS	142

INTRODUÇÃO GERAL

O clima do planeta sempre mudou em resposta as mudanças atmosféricas, no entanto, é amplamente aceito que as atividades humanas estão influenciando no clima global, com aumento considerável da [CO₂] na atmosfera nos últimos anos. Estas modificações estão ligadas à elevação da [CO₂] atmosférico aliado ao aumento da temperatura (*global warming*) decorrente do efeito estufa causado pelo aumento do próprio CO₂ e de outros gases, destacando-se o metano, óxido nitroso e os clorofluorcarbonetos (CFCs), cujo aumento se deve, direta ou indiretamente, a atividades humanas (IPCC, 2007).

O CO₂ não caracteriza o gás com maior potencial de aquecimento global, porém, pela sua quantidade e aumento, o mesmo será, previsivelmente, o que influenciará potencialmente no aquecimento global da atmosfera terrestre (IPCC, 2007). Por isso, estima-se que estas alterações climáticas influenciarão a produção agrícola e as práticas culturais em diferentes partes do mundo (Siegenthaler et al., 2005; Pachauri e Reisinger, 2007; Roos et al., 2011).

A agricultura é uma atividade altamente dependente de fatores climáticos, tais como temperatura, pluviosidade, umidade do solo e radiação solar, portanto, as mudanças climáticas podem afetar a produção agrícola de várias formas, com fortes impactos sociais, econômicos e ecológicos (Assad et al., 2004; Streck e Alberto, 2006; Ainsworth e Rogers, 2007; Ghini et al., 2008; Camargo et al., 2010; Jaramillo et al., 2011; Davis et al., 2012; Marin e Nassif, 2013).

Existem algumas incertezas sobre a dimensão das alterações climáticas até o final deste século, apesar do aumento de CO₂ atmosférico parecer inevitável, pelo fato da queima de combustíveis fósseis não diminuir em nível global a curto e médio prazo (IPCC, 2007).

O aumento de CO₂ *per se* na atmosfera terrestre poderá ter efeitos benéficos para a agricultura, já que a atual concentração de CO₂ mundial (em torno de 400 µL CO₂ L⁻¹) é insuficiente para saturar a enzima responsável pela carboxilação primária nas plantas C3 (Pinto et al., 2004; Taiz e Zeiger, 2004; Ainsworth e Rogers, 2007), assim, poderá elevar a produtividade das plantas.

Contudo, ao ser acompanhado com o aumento da temperatura do ar, poderá não haver incremento no crescimento e rendimento das culturas, nomeadamente, em razão do encurtamento do seu ciclo de desenvolvimento e elevação da respiração do tecido vegetal (Taiz e Zeiger, 2004), mas também devido à aclimação negativa (*down regulation*), total ou parcial, do metabolismo fotossintético, que não permitiram um total aproveitamento do potencial aumento da [CO₂] (Ainsworth e Rogers, 2007).

O relatório do “Painel intergovernamental de mudanças climáticas” (IPCC) indica uma situação preocupante quanto ao aumento da temperatura no planeta (IPCC, 2007). Considerando os efeitos naturais e antrópicos no ajuste dos dados observados e simulados, relata-se a previsão de aumento entre 1,4 a 5,8 °C da temperatura global até ao ano de 2100. Segundo Streck e Alberto (2006), o aumento de 2 a 6 °C da temperatura média do ar pode anular os efeitos benéficos do aumento de CO₂ no rendimento de diversas culturas como trigo, soja, café e milho.

A temperatura afeta todas as reações bioquímicas da fotossíntese, não sendo surpreendente que as respostas à temperatura sejam complexas. Em condições de maior concentração atmosférica de CO₂ a sua disponibilidade nos sítios de carboxilação aumentará, contudo, o aumento da temperatura poderá limitar a taxa de carboxilação pela elevação da afinidade do O₂ em relação ao CO₂, o que diminuirá a fotossíntese líquida devido ao aumento da fotorrespiração. Assim, a resposta reflete dois processos conflitantes: aumento na taxa de carboxilação e um decréscimo na afinidade da RuBisCO para CO₂ com a elevação da temperatura (Taiz e Zeiger, 2004).

As respostas da fotossíntese à temperatura refletem a sensibilidade das suas reações bioquímicas a este fator e são mais pronunciadas quando as concentrações de CO₂ são elevadas. As mudanças funcionais da maquinaria fotossintética em resposta às temperaturas predominantes do ambiente têm efeito importante sobre a capacidade de plantas em viver em habitats diversos (Taiz e Zeiger, 2004).

Independente das estimativas, existe crescente preocupação em relação aos efeitos que as mudanças climáticas poderão causar nas cadeias produtivas. Na agricultura esta preocupação é alarmante devido a vulnerabilidade desta atividade em relação aos fatores climáticos. Portanto, estima-se que qualquer alteração no clima poderá afetar o zoneamento agrícola, com sérias consequências econômicas, sociais e ambientais.

Potencial impacto das mudanças climáticas sobre o desenvolvimento do cafeeiro

O sistema produtivo do cafeeiro, provavelmente, será afetado pelas mudanças climáticas implicando um novo arranjo do zoneamento agrícola da cultura, caso se concretize os cenários climáticos futuros tidos como prováveis (IPCC, 2007).

Estima-se que a área apta a cafeicultura no mundo nos próximos 50 anos poderá ser reduzida em cerca de 15% (Lane e Jarvis, 2007), sendo que estudos específicos foram direcionados para averiguação das modificações em diversas regiões produtoras de café no

mundo (Assad et al., 2004; Gay et al., 2006; Lane e Jarvis, 2007; Titus e Pereira, 2008; Villers et al., 2009; Camargo et al., 2010; Jaramillo et al., 2011; Davis et al., 2012; Rahn et al., 2013).

No que tange a cafeicultura no Brasil os estudos (Assad et al., 2004; Camargo et al., 2010) prevêm a perda significativa de área adequada e apontam um deslocamento da produção de café arábica para as regiões de altitude mais elevada, caracterizada por condições de manejo dificultado e também para locais com baixa temperatura positiva, como nas regiões do Sul do Brasil. Para o café robusta, devido a possibilidade de desertificação de várias áreas onde atualmente o cultivo do café é praticado, apontam-se previsões de que os cultivos passem para locais de maior altitude, havendo ganho de elevação aos locais de cultivo atual, sendo estas regiões caracterizadas por um maior índice de chuvas anuais e com temperaturas médias amenas, quando comparado com as atuais áreas de cultivo. Desta forma, este possível deslocamento afetará a economia de várias regiões, onde atualmente o café é uma cultura de grande expressão econômica (Assad et al., 2004; Laderach et al., 2009; Jesus Junior et al., 2011).

Recentemente, foi indicado por um estudo global que a América do Sul e a América Central, podem ter perdas graves da adequação de cultivo do café no futuro, entre outros fatores, devido ao aumentando das temperaturas e variabilidade das temperaturas intra-sazonais (Bunn et al., 2015). Além de modificar a aptidão de áreas de cultivo do cafeeiro em todas as regiões produtoras, nos trópicos, estas alterações também afetaram as técnicas de manejo da cultura (Jesus Junior et al., 2012), o que reforça a necessidade de convergir esforços para o aprofundamento do conhecimento científico relativamente aos processos de tolerância das plantas que possam auxiliar efetivamente na mitigação dos estresses ambientais que as mudanças climáticas possam acarretar, contribuindo assim, de forma substancial, para a sustentabilidade econômica-ambiental-social da cafeicultura.

Os fatores climáticos (e.g., pluviosidade, temperatura e umidade relativa do ar, concentração de CO₂ atmosférico, direção e velocidade da massa de ar e irradiação solar) e do solo (e.g., disponibilidade e desequilíbrio de nutrientes) exercem um papel fundamental nos processos fisiológicos do cafeeiro. De fato, as fases de crescimento e frutificação do cafeeiro são extremamente afetadas pelas condições climáticas, que interferem diretamente na fenologia da cultura, na produtividade e na qualidade do café produzido (DaMatta e Ramalho, 2006).

A concentração do CO₂ atmosférico e a temperatura do ar são variáveis com potencial impacto no crescimento e desenvolvimento das plantas, estando intimamente ligadas à reprodução (e.g. temperaturas altas levam à produção de flores inférteis), a transpiração (por

via do controle estomático e do déficit de pressão de vapor entre a folha e a atmosfera circundante), a fotossíntese e a respiração (ambos como processos fornecedores de energia à célula), o que torna justificável o estudo da variação destes fatores climáticos na fisiologia das plantas do gênero *Coffea*.

Dióxido de carbono (CO₂)

Diversos estudos apontam que as alterações na concentração de CO₂ ambiental (IPCC, 2007) podem modificar inúmeros processos no desenvolvimento das plantas (Ainsworth e Rogers, 2007). Contudo, as implicações relativas à cultura do café são desconhecidas, necessitando de estudos aprofundados que permitam compreender qual o real impacto ao nível dos processos metabólicos da planta.

Os estudos de impacto em relação ao aumento de CO₂ no cafeeiro são baseados apenas na aplicação de modelos matemáticos, tendo possibilitado a produção de alguns zoneamentos (Assad et al., 2004; Villers et al., 2009; Jaramillo et al., 2011; Rahn et al., 2013) e assim inferir sobre as possíveis reações do cafeeiro à elevação do CO₂, apresentando mitigações a esta alteração ambiental (Camargo et al., 2010; Jesus Junior et al., 2011; Jesus Junior et al., 2012).

De maneira geral, o aumento da [CO₂] (até valores próximos de 800 µL L⁻¹) se torna vantajoso para as plantas, por promover o desenvolvimento vegetativo, devido principalmente à elevação da assimilação de CO₂ (Dias, 1995; Faria et al., 1996; Hunt et al., 1982; Drake et al., 1997; Ainsworth e Long, 2005). Em ensaios iniciais no campo, em FACE (Embrapa, Jaguariúna-SP), foi observado que os cafeeiros cultivados em elevada [CO₂] (máximo de 200µL L⁻¹ acima do valor ambiental) apresentam maior crescimento vegetativo quando comparados com os desenvolvidos em níveis normais de CO₂ atmosférico, levando a inferir que o aumento da concentração de CO₂ pode ter efeito favorável à cultura (Fioravanti, 2012).

Outro efeito que pode ser observado com o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera é a modificação no tamanho, densidade e redução da abertura dos estômatos e condutância estomática, acarretando em menor transpiração (Long et al., 2006). Caso estas modificações sejam confirmadas para o cafeeiro, pode-se prever que se tenha maior eficiência no uso de água (como visto para outras culturas) o que influenciaria na produção de grãos, devido o uso da água está correlacionado com a quebra de dormência e início da floração.

Ressalta-se que há possibilidade de redução do teor de nitrogênio foliar, devido ao fato de ocorrer uma otimização do teor de RuBisCO já que a maior disponibilidade de CO₂ causaria o aumento da velocidade de carboxilação e, portanto, diminuiria a quantidade de enzima

necessária para produção de fotoassimilados (Ainsworth e Rogers, 2007; Drake et al., 1997). O eventual decréscimo da necessidade de nitrogênio poderia igualmente influenciar a restante nutrição mineral tendo em conta que deve ser mantido um balanço/equilíbrio entre a disponibilidade de elementos minerais à planta.

Para além do exposto, o aumento da assimilação de CO₂ e a diminuição de absorção de N para biossíntese enzimática podem modificar a relação entre conteúdo de carbono e de nitrogênio (C:N). O acompanhamento da relação C:N torna possível avaliar a distribuição do carbono entre os diferentes órgãos e com isto inferir sobre as alterações na alocação destes compostos (Poorter et al., 1997). A preocupação em torno da resposta do cafeeiro a este ponto, é que a mudança da relação C:N aliada à maior assimilação e fixação de carbono, pode resultar no aumento das quantidades de carboidratos não-estruturais, que de forma simplificada poderia modificar o padrão vegetativo do cafeeiro, especificamente na diminuição da vida útil das folhas, estabelecendo elevada correlação ao aumento da senescência.

Caso isso se confirme, inúmeros padrões já descritos e utilizados na cafeicultura deverão ser modificados, principalmente a nutrição, o controle de pragas e doenças e o manejo de irrigação, além das técnicas básicas de cultivo, pelo fato da distribuição do carbono e nitrogênio de uma planta estar intimamente ligada aos mecanismos de controle por *feedback* (Gifford et al., 2000).

Pode-se afirmar, no geral, que espécies do mesmo gênero apresentam diferentes respostas em função da alteração da concentração de CO₂ (Ainsworth e Rogers, 2007; Akita et al., 2012; Crous et al., 2012), o que remete a possibilidade de que as mudanças na concentração do CO₂ impliquem em efeitos diferenciados às espécies do gênero *Coffea*, em virtude de suas diferenças ecofisiológicas (Jesus Junior et al., 2012).

De fato, tal como em outras espécies, o conjunto possível de respostas anatômicas, fisiológicas, bioquímicas e moleculares das espécies de *Coffea* spp. ao aumento da [CO₂] atmosférico dependerá da espécie (ou mesmo dos genótipos dentro de cada espécie), dos fatores edafo-climáticos em cada área de cultivo e da interação entre esses fatores (Pimentel, 2004). No geral, o que é especulado é que os principais efeitos do aumento de CO₂ no metabolismo do cafeeiro (Jesus Junior et al., 2012), sejam: (i) aumento da assimilação de CO₂ e da produção de biomassa; (ii) aumento da eficiência de uso de nitrogênio, devido à menor produção de RuBisCO já visto em plantas C₃; (iii) menor condutância estomática e rearranjo da anatomia foliar; (iv) estímulo da taxa de respiração mitocondrial.

Atualmente, cerca de 99% da produção de café é proveniente do cultivo de *C. arabica* L. e *C. canephora* Pierre ex Froehner, assim, apesar de possuírem centros de origens relativamente próximos (ca. 3.000 km) estas espécies possuem características fisiológicas distintas, que se ligam a diferentes condições ótimas de cultivo. Desta forma, a mudança na concentração de CO₂ ambiental (assim como o aumento de temperatura que se prevê concomitante), podem implicar em diferentes impactos no seu desenvolvimento e produção e, conseqüentemente, em um novo zoneamento para plantio do cafeeiro (Camargo et al., 2010).

Temperatura

O cultivo de *C. arabica* requer temperaturas médias anuais entre 18 e 23 °C, e para o *C. canephora*, por ser originário de regiões equatoriais baixas, quentes e úmidas da bacia do Congo, entre 22 °C e 26 °C, possuindo maior capacidade de aclimação a temperaturas mais elevadas (Matiello, 1998; DaMatta e Ramalho, 2006), assim, ao considerar as distintas necessidades das espécies, é provável que as mudanças climáticas as venham a afetar diferencialmente.

Tendo em conta os novos cenários climáticos, relacionados principalmente com mudanças no regime térmico, hídrico e no índice de irradiância (Assad et al., 2004; Camargo, 2010; Jesus Junior et al., 2012) se perspectiva que: (i) o aumento das temperaturas modificará o zoneamento do *C. arabica*, existindo assim a necessidade de cultivo, em algumas regiões que hoje têm temperaturas médias acima do recomendável; (ii) a migração do cultivo do *C. canephora* para áreas de altitude, conseqüentemente para áreas que eventualmente são hoje utilizadas para *C. arabica*. Desta forma, o entendimento da implicação da temperatura, seja elevada ou amena, em todo o desenvolvimento e produção do cafeeiro torna-se de suma importância para o planejamento das atividades de pesquisa, tecnologia e extensão, mantendo a cadeia sustentável.

O cultivo de *C. arabica* a pleno sol é uma prática habitual, expondo à folha a elevados níveis de irradiação solar, acarretando a absorção de mais energia do que a necessária para o metabolismo fotossintético dos cafeeiros (Camargo, 2010). Paralelamente a esta prática se vivenciou, ao longo do último século, a elevação das temperaturas (IPCC, 2007) sendo comumente encontrado decréscimo acentuado da produção do *C. arabica* a pleno sol em regiões onde as temperaturas médias anuais se estabelecem acima de 30 °C (Jesus Junior et al., 2012). Este fato pode ser atribuído à influência do calor intenso (temperatura do ar elevada) na fase do florescimento, que implica em anormalidades nos botões florais, formando as estruturas

denominadas flores “estrelinhas” que são inférteis e, por isso, com impacto na produção de frutos. Além de outras implicações fisiológicas, isso está atrelado a ocorrência da sobrecarga de energia e aquecimento das folhas, que em casos extremos pode alcançar temperaturas de 40 °C, especialmente se os estômatos estão fechados, bloqueando o funcionamento da maquinaria fotossintética (Maestri et al., 2001).

Ademais, pode-se afirmar que a exposição contínua do *C. arabica* a temperaturas superiores a 30 °C pode causar decréscimo acentuado na taxa de crescimento (Amaral et al., 2006; DaMatta e Ramalho, 2006), contudo, deve-se destacar que os efeitos da temperatura variam significativamente entre os genótipos em estudo (DaMatta, 2003).

Existem relatos que a área plantada de cafeeiro arábica foi drasticamente reduzida ou até mesmo desapareceu em áreas do noroeste do Estado de São Paulo e no sul do Estado de Minas Gerais, o que estará ligado ao aumento de temperatura nas últimas décadas (Fioravanti, 2012). Estudos anteriores já haviam indicado uma redução próxima a 90% nas áreas favoráveis ao plantio em Goiás, Minas Gerais e São Paulo e de 75% no Paraná até 2020, em resposta ao aumento de temperatura (Assad et al., 2008).

A influência das temperaturas elevadas no *C. canephora* não está elucidada, devido ao fato de não acontecerem no ambiente de forma isolada, sendo acompanhado na maioria dos casos pelo déficit hídrico no solo e de elevada irradiação. Com isso, as principais implicações relatadas são a escaldadura das folhas, déficit hídrico das plantas, desbalanço nutricional, decréscimo acentuado na taxa de crescimento, sazonalidade e redução da produção (Pezzopane et al., 2010; Pezzopane et al., 2011; Jesus Junior et al., 2012).

Sabe-se que as taxas de P_n de clones de *C. canephora* são relativamente baixas, próximas de $11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, o que indica uma baixa eficiência fotossintética, apesar de sua capacidade fotossintética (determinado em condição de luz e CO_2 saturantes e em temperatura ótima) poder alcançar valores entre 15 a $35 \mu\text{mol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Ramalho et al., 2003; Ronchi e DaMatta, 2007); e que as diferenças nas produtividades em clones de *C. canephora* estariam associadas diretamente com a manutenção de uma área foliar sadia (maiores taxas de fotossíntese da planta inteira) e de uma arquitetura de copa mais favorável (permitindo otimização das trocas gasosas) (Campostrini e Maestri, 1998; DaMatta e Rena, 2001). Desta forma, a modificação induzida pelas altas temperaturas na arquitetura de copa, na evapotranspiração e no uso/perda de água (déficit hídrico) poderá alterar negativamente a atividade fisiológica e bioquímica das plantas (Pezzopane et al., 2010; Pezzopane et al., 2011; Jesus Junior et al., 2012).

Entretanto, já se sabe da existência de componentes de aclimação a elevadas temperaturas (concomitantemente com seca) entre clones de conilon (DaMatta et al., 2003; Pinheiro et al., 2005; Ronchi e DaMatta, 2007). Parecem existir três estratégias envolvidas nesta tolerância diferencial (Ronchi e DaMatta, 2007), podendo-se classificar os clones de cafeeiro conilon da seguinte forma: (i) clones sensíveis ao déficit hídrico e a altas temperaturas: mantêm um controle deficiente da transpiração, sendo limitada a resposta dos estômatos à diminuição da disponibilidade hídrica do solo; (ii) clones com tolerância ao estresse hídrico e à temperatura: possuem sistema radicular profundo e desenvolvido, somado a característica de alta sensibilidade estomática à disponibilidade hídrica e taxas de uso da água eficientemente reduzidas; (iii) clones de dupla aptidão, com tolerância intermediária ao estresse hídrico e a temperatura: têm sistemas radiculares desenvolvidos e sensibilidade estomática satisfatória à disponibilidade hídrica, entretanto com elevada taxa de condutância hidráulica, e comportamento intermediário em relação à taxa de desidratação dos tecidos foliares (remete um grau de tolerância as altas temperaturas).

Também em relação à seca, diversos estudos mostraram a existência de diversos mecanismos de tolerância (Pinheiro et al., 2005; Praxedes et al., 2006; Vieira et al., 2013), envolvendo uma rede complexa de respostas, provavelmente incluindo a via de sinalização do ácido abscísico e o óxido nítrico, que são os principais determinantes moleculares que podem explicar a melhor eficiência de controle da abertura dos estômatos e da transpiração exibida por clones de *C. canephora* resistentes à seca, o que seria possivelmente também somado as características de tolerância as altas temperaturas (Marraccini et al., 2013).

O cafeeiro, de modo geral, apresenta tolerância reduzida ao frio, assim, baixas temperaturas positivas provocam danos nos tecidos foliares, no sistema fotossintético, no metabolismo do carbono, nos constituintes enzimáticos e nas membranas (Oliveira et al., 2002; Campos et al., 2003; Ramalho et al., 2003; Silva et al., 2004; Batista-Santos et al., 2011; Partelli et al., 2011). As baixas temperaturas positivas provocam baixo desenvolvimento do sistema radicular e diminuição da eficiência e da condutividade hidráulica da água (Alonso et al., 1997; Aroca et al., 2003), decréscimo acentuado na taxa de crescimento (Amaral et al., 2006; Partelli et al., 2010), perdas de produtividade e qualidade dos grãos (DaMatta e Ramalho, 2006). Contudo, a magnitude dos desequilíbrios metabólicos e danos causados pelas temperaturas baixas são distintas entre as espécies de *C. arabica* e *C. canephora*, ou mesmo entre genótipos da mesma espécie, sendo os clones de *C. canephora* normalmente mais sensíveis (DaMatta et al., 1997; Carvalho et al. 2001; Ramalho et al., 2003; Partelli et al., 2009; Partelli et al., 2011).

Pode-se também destacar a capacidade de suportar o frio, ou seja, além do impacto pontual a exposição a baixas temperaturas positivas (4 a 6 °C) ou a um período com temperaturas mais elevadas (porém ainda abaixo do limite inferior médio suportado pela espécie, sendo entre 13 a 15 °C) implica em danos as folhas e frutos reduzindo o metabolismo foliar no geral, levando a necrose parcial com possibilidade de evolução para necrose total e queda de folhas, com prolongamento dos sintomas mesmo após o período de elevação das temperaturas, o que figura a elevada magnitude de danos ao tecido foliar (Fortunato et al., 2010; Batista-Santos et al., 2011).

Entretanto, o cafeeiro apresenta mecanismos de tolerância que podem minimizar os danos causados pelo frio, podendo destacar: (i) autonomia de refutar o excesso de energia que atinge o tecido foliar, de forma preventiva à produção de moléculas de elevada capacidade reativa e (ii) elevação da atividade de moléculas antioxidantes (enzimáticas e não-enzimáticas), sendo responsável pela remoção de moléculas reativas, atuando principalmente na recuperação do estresse causado (Ramalho et al., 2003; Pinheiro et al., 2004; Praxedes et al., 2006; Fortunato et al., 2010; Batista-Santos et al., 2011; Partelli et al., 2011).

REFERÊNCIAS

AINSWORTH, E.A.; LONG, S.P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. **New Phytologist**, v. 165, p. 351-372, 2005.

AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. **Plant, Cell & Environment**, v. 30, p. 258–270, 2007

AKITA, R.; KAMIYAMA, C.; HIKOSAKA, K. *Polygonum sachalinense* alters the balance between capacities of regeneration and carboxylation of ribulose-1,5-bisphosphate in response to growth CO₂ increment but not the nitrogen allocation within the photosynthetic apparatus. **Physiol Plant**, v. 146, p. 404-412, 2012.

ALONSO, A.; QUEIROZ, C.S.; MAGALHÃES, A.C. Chilling stress leads to increased cell membrane rigidity in roots of coffee (*Coffea arabica* L.) seedlings. **Biochimica et Biophysica Acta**, v. 1323, p. 75-84, 1997.

AMARAL, J.A.T.; RENA, A.B.; AMARAL, J.F.T. Crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro e sua relação com fotoperíodo, frutificação, resistência estomática e fotossíntese. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 377-384, 2006.

AROCA, R.; VERNIERI, P.; IRIGOYEN, J.J.; SÁNCHEZ-DÍAZ, M.; TOGNONI, F.; PARDOSSI, A. Involvement of abscisic acid in leaf and root of maize (*Zea mays* L.) in avoiding chilling-induced water stress. **Plant Science**, v. 165, p. 671-679, 2003.

ASSAD, E. D.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J.; MARIN, F.R.; PELLEGRINO, G.Q.; EVANGELISTA, S.R.; OTAVIAN, A.F. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. 1. ed. Brasília: Embaixada Britânica, 2008. v. 1. 82p.

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO, JR.J.; ÁVILA, A.M.H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 1057-1064, 2004.

BATISTA-SANTOS, P.; LIDON, F.C.; FORTUNATO, A.; LEITÃO, A.E.; LOPES, E.; PARTELLI, F.L.; RIBEIRO, A.I.; RAMALHO, J.C. The impact of cold on photosynthesis in genotypes of *Coffea* spp. Photosystem sensitivity, photoprotective mechanisms and gene expression. **Journal of Plant Physiology**, v. 168, p. 792-806, 2011.

BUNN, C.; LÄDERACH, P.; RIVERA, O.O.; KIRSCHKE, D. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. **Climatic Change**, v. 129, n. 1-2, p. 89-101, 2015.

CAMARGO, M.B.P. The impact of climatic variability and climate change on arabica coffee crop in Brazil. **Bragantia**, v. 69, p. 239-247, 2010.

CAMPOS, P.S.; QUARTIN, V.; RAMALHO, J.C.; NUNES, M.A. Electrolyte leakage and lipid degradation account for cold sensitivity in leaves of *Coffea* sp. **Plants Journal of Plant Physiology**, v. 160, p. 283-292, 2003.

CAMPOSTRINI, E.; MAESTRI, M. Photosynthetic potential of five genotypes of *Coffea canephora* Pierre. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.10, p.13-18, 1998.

CARVALHO, L.M.; SILVA, E.A.M.; AZEVEDO, A.A.; MOSQUIM, P.R.; CECON, P.R. Aspectos morfofisiológicos das cultivares de cafeeiro Catuaí-Vermelho e Conilon. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 411-416, 2001.

CROUS, K.Y.; ZARAGOZA-CASTELLS, J.; ELLSWORTH, D.S.; DUURSMA, R.A.; LÖW, M.; TISSUE, D.T.; ATKIN, O.K. Light inhibition of leaf respiration in field-grown *Eucalyptus saligna* in whole-tree chambers under elevated atmospheric CO₂ and summer drought. **Plant Cell Environ**, v. 35, p. 966-981, 2012.

DaMATTA, F.M. **Drought as a multidimensional stress affecting photosynthesis in tropical tree crops**. In: HEMANTARANJAN, A. (ed), 2003. *Advances in Plant Physiology*, v. 5, p. 227-265. Scientific Publishers, Jodhpur.

DaMATTA, F.M.; MAESTRI, M.; MOSQUIM, P.R.; BARROS, R.S. Photosynthesis in coffee (*Coffea arabica* and *C. canephora*) as affected by winter and summer conditions. **Plant Science**, v. 128, p. 43-50, 1997.

DaMATTA, F.M.; RAMALHO, J.D.C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.18, p. 55-81, 2006.

DaMATTA, F.M.; RENA, A.B. **Tolerância do café à seca**. In: ZAMBOLIN, L. (ed), *Tecnologias de Produção de Café com Qualidade*, 2001. Universidade Federal de Viçosa, p. 65-100.

DAVIS, A.P.; GOLE, T.W.; BAENA, S.; MOAT, J. The impact of climate change on indigenous arabica coffee (*Coffea arabica*): Predicting future trends and identifying priorities. **PLoS One**, v. 7, n. 11, p. 47-61, 2012.

DIAS, S. Elevated CO₂ responsiveness, interactions at the community level and plant functional types. **Journal of Biogeography**, v.22, p. 289-295, 1995.

DRAKE, B.G.; GONZÁLEZ-MELER, M.A.; LONG, S.P. More Efficient Plants: A consequence of rising atmospheric CO₂? **Annual Review Plant Physiology Plant Molecular Biology**, v. 48, p. 609–39, 1997.

FARIA, T.; WILKINS, D.; BESFORD, R.T.; VAZ, M.; PEREIRA, J.S.; CHAVES, M.M. Growth at elevated CO₂ leads to down-regulation of photosynthesis and altered response to high temperature in *Quercus suber* L. seedlings. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, n. 304, p. 1755-1761, 1996.

FIORAVANTI, C. Especialistas prevêem queda na produção e emergência de novas doenças e pragas em consequência das mudanças do clima. **Revista FAPESP**, v. 198, n. 8, 2012.

FORTUNATO, A.; LIDON, F.C.; EICHLER, P.; LEITÃO, A.E.; PAIS, I.P.; RIBEIRO, A.I.; RAMALHO, J.C. biochemical and molecular characterization of the antioxidative system of *Coffea* sp. under cold conditions in genotypes with contrasting tolerance. **Journal of Plant Physiology**, v. 167, p. 333-342, 2010.

GAY, C.; ESTRADA, F.; CONDE, C.; EAKIN, H.; VILLERS, L. Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. **Climatic Change**, v. 79, p. 259-288, 2006.

GHINI, R.; HAMADA, E.; JÚNIOR, M.J.P.; MARENGO, J.A.; GONÇALVES, R.R.D.V. Risk analysis of climate change on coffee nematodes and leaf miner in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.187-194, 2008.

GIFFORD, R.M.; BARRETT, D.J.; LUTZE, J.L.L. The effects of elevated [CO₂] on the C:N and C:P mass ratios of plant tissues. **Plant & Soil**, v. 224, p.1–14, 2000.

HUNT, R. **Plant growth curve. The functional approach to plant growth analysis**. Edward Arnold, London. 1982.

IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis: summary for policymakers**. Geneva: IPCC, 2007. 18p. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2012.

JARAMILLO, J.; MUCHUGUE VEGA, F.E.; DAVIS, A.P.; BORGEMEISTER, C. Some like it hot: the influence and implications of climate change on coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) and coffee production in East Africa. **PLoS ONE**, v. 6, p.24-52, 2011.

JESUS JUNIOR, W.C.; MARTINS, L.D.; RODRIGUES, W.N.; MORAES, W.B.; AMARAL, J.F.T.; TOMAZ, M.A.; ALVES, F.R. **Mudanças climáticas: potencial impacto na sustentabilidade da cafeicultura**. In: TOMAZ, M.A.; AMARAL, J.F.T.; JESUS JUNIOR, W.C.; FONSECA, A.F.A.; FERRAO, R.G.; FERRAO, M.A.G.; MARTINS, L.D.; RODRIGUES, W.N. (Org.). Inovação, difusão e integração: bases para a sustentabilidade da cafeicultura. 1ed. Alegre-ES: CAUFES, 2012, v. 1, p. 179-201.

JESUS JUNIOR, W.C.; MORAES, W.B.; BELAN L.L.; MARTINS, L.D.; TOMAZ, M.A.; AMARAL, J.F.T.; AMARAL, L.F.; CECILIO, R.A.; ALVES, F.R. **Mudanças climáticas globais e seus potenciais impactos sobre a cafeicultura brasileira**. In: TOMAZ, M.A.; AMARAL, J.F.T.; JESUS JUNIOR; W.C.; FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, R.G.; FERRÃO, M.A.G. (Org.). Tecnologias para a sustentabilidade da cafeicultura. 1ed. Alegre-ES: CAUFES, 2011, v. 2, p. 263-293.

LADERACH, P.; JARVIS, A.; RAMIREZ, J. **The impact of climate change in coffee-growing regions: The case of 10 municipalities in Nicaragua. Un proyecto conjunto entre Cafédirect plc y la GTZ**. Disponível em: <<http://www.adapcc.org>>. Acesso em: 25 mai. 2009.

LANE, A.; JARVIS, A. Changes in climate will modify the geography of crop suitability: agricultural biodiversity can help with adaptation. **Journal of Semi-arid Tropical Agricultural Research**, v.4, n.1, 2007.

LONG, S.P.; DRAKE, B.G. **Photosynthetic CO₂ assimilation and rising atmospheric CO₂ concentrations**. In: BAKER, N.R.; THOMAS, H. (Eds.). *Topics in Photosynthesis. Crop Photosynthesis: Spatial and Temporal Determinants*, Amsterdam: Elsevier Science 2006, v.2. p. 69–107.

MAESTRI, M.; BARROS, R.S.; RENA, A.B. *Coffee*. In: LAST, F.T. (Ed.). *Tree crop ecosystems*. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 339-360.

MARIN, F.; NASSIF, D.S.P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: Fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 232-239, 2013.

MARRACCINI, P.; VINECKY, F.; ALVES, G.S.C.; RAMOS, H.J.O.; ELBELT, S.; VIEIRA, N. G.; CARNEIRO, F.A.; SUJII, P.S.; ALEKCEVETCH, J.C.; SILVA, V.A.; DAMATTA, F.M.; FERRÃO, M.A.G.; LEROY, T.; POT, D.; VIEIRA, L.G.E.; DaSILVA, F.R.; ANDRADE, A.C. Differentially expressed genes and proteins upon drought acclimation in tolerant and sensitive genotypes of *Coffea canephora*. **Journal of Experimental Botany**, v. 1, p. 1-22, 2012.

MATIELLO, J.B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo: Globo, 1991. 320p.

OLIVEIRA, J.G., ALVES, P.L.C.A., MAGALHÃES, A.C. The effect of chilling on the photosynthetic activity in coffee (*Coffea arabica* L.) seedlings. The proactive action of chloroplastid pigments. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 14, p. 95-104, 2002.

PACHAURI, R.K.; REISINGER, A. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007. 104p.

PARTELLI, F.L.; BATISTA-SANTOS, P.; SCOTTI-CAMPOS, P.; PAIS, I.P.; QUANTIN, V.L.; VIEIRA, H.D.; RAMALHO, J.C. Characterization of the main lipid components of chloroplast membranes and cold induced changes in *Coffea* spp. **Environmental and Experimental Botany**, v. 74, p. 194-204, 2011.

PARTELLI, F.L.; VIEIRA, H.D.; SILVA, M.G.; RAMALHO, J.C. Seasonal vegetative growth of different age branches of Conilon coffee tree. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, p. 619-626, 2010.

PARTELLI, F.L.; VIEIRA, H.D.; VIANA, A.P.; BATISTA-SANTOS, P.; RODRIGUES, A.P.; LEITÃO, A.E.; RAMALHO, J.C. Low temperature impact on photosynthetic parameters of coffee genotypes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 1404-1415, 2009.

PEZZOPANE, J.R.M.; MARSETTI, M.M.S.; FERRARI, W.R.; PEZZOPANE, J.E.M. Alterações microclimáticas em cultivo de café conilon arborizado com coqueiro-anão-verde. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 865-871, 2011.

PEZZOPANE, J.R.M.; MARSETTI, M.M.S.; SOUZA, J.M.; PEZZOPANE, J.E.M. Condições microclimáticas em cultivo de café conilon a pleno sol e arborizado com noqueira macadâmia. **Ciência Rural**, v. 40, n. 6, p. 1257-1263, 2010.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica: EDUR 2004. 192p.

PINHEIRO, A.H.; DaMATTa, F.M.; CHAVES, A.R.M.; FONTES, E.P.B.; LOUREIRO, M.E. Drought tolerance in relation to protection against oxidative stress in clones of *Coffea canephora* subjected to long-term drought. **Plant Science**, v. 167, p. 1307-1314, 2004.

PINHEIRO, H.A.; DaMATTa, F.M.; CHAVES, A.R.M.; LOUREIRO, M.E.; DUCATTI, C. Drought tolerance is associated with rooting depth and stomatal control of water use in clones of *Coffea canephora*. **Annual Botany**, v. 96, p.101-108, 2005.

PINTO, H.S.; ASSAD, E.D.; ZULLO JR, J. O aquecimento global e a agricultura. **Revista Saneas**, v.18, p.34-37, 2004.

POORTER, H.; VAN BERKEL, Y.; BAXTER, R.; DEN HERTOOG, J.; DIJKSTRA, P.; GIFFORD, R.M.; GRIFFIN, K.L.; ROUMET, C.; ROY, J.; WONG, S.C. The effect of elevated

CO₂ on the chemical composition and construction costs of leaves of 27 C₃ species. **Plant, Cell and Environment**, v. 20, p. 472-482, 1997.

PRAXEDES, S.C.; DaMATTa, F.M.; LOUREIRO, M.E.; FERRÃO, M.A.G.; CORDEIRO, A.T. Effects of long-term soil drought on photosynthesis and carbohydrate metabolism in mature robusta coffee (*Coffea canephora* Pierre var. kouillou) leaves. **Environmental and Experimental Botany**, v. 56, p. 263-273, 2006.

RAHN, E.; LÄDERACH, P.; BACA, M.; CRESSY, C.; SCHROTH, G.; MALIN, D.; RIKXOORT, H.V.; SHRIVER, J. Climate change adaptation, mitigation and livelihood benefits in coffee production: where are the synergies? **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 123, p. 01-19, 2013.

RAMALHO, J.C.; QUARTIN, V.L.; LEITÃO, E.; CAMPOS, P.S.; CARELLI, M.L.C.; FAHL, J.I.; NUNES, M.A. Cold acclimation ability and photosynthesis among species of the tropical *Coffea* genus. **Plant Biology**, v. 5, p. 631-641, 2003.

RONCHI, C.P.; DAMATTA, F.M. **Aspectos fisiológicos do café conilon**. In: FERRÃO, R.G.; FONSECA, A.F.A.; BRAGANÇA, S.M.; FERRÃO, M.A.G.; DEMUNER, L.H. (eds), *Café Conilon*, p. 95-115. Seag/Incaper, Vitória.

ROOS, J.; HOPKINS, R.; KVARNHEDEN, A.; DIXELIUS, C. The impact of global warming on plant diseases and insect vectors in Sweden. **European Journal of Plant Pathology**, v.129, n.1, p.9-19, 2011.

SIEGENTHALER, U.; STOCKER, T.F.; MONNIN, E.; LUTHI, D.; SCHWANDER, J.; STAUFFER, B.; RAYNAUD, D.; BARNOLA, J.M.; FISCHER, H.; MASSON-DELMOTTE, V.; JOUZEL, J. Stable carbon cycle-climate relationship during the late pleistocene. **Science**, v. 310, p. 1313-1317, 2005.

SILVA, E.A.; DaMATTa, F.M.; DUCATTI, C.; REGAZZI, A.J.; BARROS, R.S. Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis of Arabica coffee trees. **Field Crops Research**, v. 89, p. 349-357, 2004.

STRECK, N.A.; ALBERTO, C.M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.9, p.1351-1359, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TITUS, A.; PEREIRA, G.N. Global warming in coffee plantations. **Indian Coffee**, v. 72, p 19-24, 2008.

VIEIRA, N.G.; CARNEIRO, F.A.; SUJII, P.S.; ALEKCEVETCH, J.C.; FREIRE, L.P.; VINECKY, F.; ELBELT, S.; SILVA, V.A.; DaMATTa, F.M.; FERRÃO, M.A.G.; MARRACCINI, P.; ANDRADE, A.C. Different molecular mechanisms account for drought tolerance in *Coffea canephora* var. conilon. **Tropical Plant Biology**, v. 6, p. 12-26, 2013.

VILLERS, L.; ARIZPE, N.; ORELLANA, R.; HERNÁNDEZ, J. Impactos del cambio climático en la floración y desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. **Interciência**, v. 34, n. 5, p. 322- 329, 2009.

CAPÍTULO 1

PERFORMANCE FOTOSSINTÉTICA DE *Coffea* spp. SUSTENTADA NO LONGO PRAZO SOB ELEVADA [CO₂]

RESUMO

Estudos de modelagem previram que as alterações climáticas terão um forte impacto sobre a adequação das áreas de cultivo existentes, mas estes estudos não têm antecipado possíveis efeitos atenuantes do aumento da [CO₂] atmosférica, porque não existem informações para o cafeeiro. Foram cultivadas plantas de dois genótipos de *Coffea arabica* e um de *C. canephora*, em vasos, sob condições controladas de irradiância (800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), umidade relativa (75%) e 380 ou 700 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$ durante aproximadamente um ano, sem restrições de água, nutrientes ou de desenvolvimento radicular. Em todos os genótipos, a alta [CO₂] promoveu tendências opostas para densidade e tamanho dos estômatos, que diminuíram e aumentaram, respectivamente. Independentemente do genótipo ou da [CO₂], a taxa de assimilação líquida de CO₂ aumentou (34-49%) quando medida a 700 $\mu\text{L de CO}_2 \text{ L}^{-1}$. Este resultado, juntamente com a condutância estomática quase inalterados, levou a um aumento de eficiência do uso da água instantânea. Os resultados também mostraram um reforço de componentes fotossintéticos (e respiratório), ou seja, do transporte de elétrons no tilacóide e das atividades da RuBisCO, da ribulose quinase 5-fosfato, da malato desidrogenase e da piruvato quinase, o que pode ter contribuído para as melhorias nas taxas máximas de transporte de elétrons, na carboxilação e na capacidade fotossintética sob elevada [CO₂], embora estas respostas tenham sido independentes dos genótipos. A eficiência do fotossistema II, energia dirigida aos eventos fotoquímicos, aos carboidratos não-estruturais, aos pigmentos fotossintéticos e a permeabilidade da membrana não respondeu ao aumento da [CO₂]. Algumas alterações no conteúdo total de ácidos graxos e no nível de insaturação das membranas dos cloroplastos foram notadas, mas aparentemente não afetou o funcionamento fotossintético. Apesar de algumas diferenças entre os genótipos, não há respostas claras em relação ao comportamento dos genótipos a elevada [CO₂]. No geral, como nenhum sinal aparente de regulação negativa fotossintética (*down-regulation*) foi encontrado, os resultados sugerem que plantas de *Coffea* spp. podem lidar com sucesso em alta [CO₂], sob as atuais condições experimentais.

ABSTRACT

Coffee is one of the world's most traded agricultural products. Modeling studies have predicted that climate change will have a strong impact on the suitability of current cultivation areas, but these studies have not anticipated possible mitigating effects of the elevated atmospheric [CO₂] because no information exists for the coffee plant. Potted plants from two genotypes of *Coffea arabica* and one of *C. canephora* were grown under controlled conditions of irradiance (800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), RH (75%) and 380 or 700 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$ for 1 year, without water, nutrient or root development restrictions. In all genotypes, the high [CO₂] treatment promoted opposite trends for stomatal density and size, which decreased and increased, respectively. Regardless of the genotype or the growth [CO₂], the net rate of CO₂ assimilation increased (34-49%) when measured at 700 than at 380 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$. This result, together with the almost unchanged stomatal conductance, led to an instantaneous water use efficiency increase. The results also showed a reinforcement of photosynthetic (and respiratory) components, namely thylakoid electron transport and the activities of RuBisCO, ribulose 5-phosphate kinase, malate dehydrogenase and pyruvate kinase, what may have contributed to the enhancements in the maximum rates of electron transport, carboxylation and photosynthetic capacity under elevated [CO₂], although these responses were genotype dependent. The photosystem II efficiency, energy driven to photochemical events, non-structural carbohydrates, photosynthetic pigment and membrane permeability did not respond to [CO₂] supply. Some alterations in total fatty acid content and the unsaturation level of the chloroplast membranes were noted but, apparently, did not affect photosynthetic functioning. Despite some differences among the genotypes, no clear species-dependent responses to elevated [CO₂] were observed. Overall, as no apparent sign of photosynthetic down-regulation was found, our data suggest that *Coffea* spp. plants may successfully cope with high [CO₂] under the present experimental conditions.

INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos 800 mil anos a [CO₂] atmosférica tem variado entre 180 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$ (períodos glaciais) e 280 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$ (períodos interglaciais). A partir dos níveis pré-industriais de 280 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$, a [CO₂] aumentou de forma constante para 384 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$ em 2009 (chegou a 400 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$, medido em Mauna Loa Observatory, no Havaí em 2013), sendo que as estimativas indicam que os níveis podem atingir entre 450 e 600 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$ até o ano de 2050, e entre 730 e 1020 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$ até 2100, dependendo de cenários futuros de emissões antrópicas (IPCC, 2007; DaMatta et al., 2010).

Mudanças na [CO₂] atmosférica podem afetar os processos fundamentais e alterar o crescimento das plantas, o rendimento agrônomico e qualidade do produto (Drake, González-Meler e Long, 1997; Idso e Kimball, 1997; Luo et al., 1999; Oliveira et al., 2010). As culturas agrícolas podem sentir e responder diretamente ao aumento da [CO₂] atmosférica através de mudanças na fotossíntese e condutância estomática (g_s), que é a base do que pode ser considerado o efeito de adubação do CO₂ sobre a produtividade agrícola (Long et al., 2004). Tal efeito pode, eventualmente, fortalecer a planta e alterar seus limites de tolerância a restrições ambientais. Por exemplo, sabe-se que as temperaturas elevadas podem reduzir o ganho líquido de C, aumentando a fotorrespiração. Além disso, a alta [CO₂] pode aumentar a taxa de fotossíntese líquida (P_n) em plantas C₃ (muitas vezes acima de 50%) devido a maior taxa de carboxilação da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (RuBisCO), que resulta dos aumentos simultâneos na disponibilidade do substrato e na inibição competitiva para O₂ (Drake, González-Meler e Long, 1997; Long et al., 2004; Ainsworth e Rogers, 2007; Oliveira et al., 2010; Bader, Siegwolf e Körner, 2010, Kirschbaum, 2011). Por conseguinte, ao reduzir a fotorrespiração, é esperado que o enriquecimento com CO₂ possa melhorar a P_n , efetivamente em condições de elevada temperatura do que em baixas temperaturas, assim, pelo menos parcialmente, compensando os efeitos das temperaturas supra-ótimas sobre rendimento (Long, 1991; Polley, 2002; DaMatta et al., 2010).

No geral, a g_s é consistente, mas não universalmente diminuída sob elevada [CO₂] (Ainsworth e Long, 2005; Ziska e Bunce, 2006; Leakey et al., 2009) o que pode diminuir as taxas de transpiração (T_r), porque aumentando a [CO₂] atmosférica se amplia o gradiente, garantindo adequada difusão de CO₂ da atmosfera para os cloroplastos. Assim, um aumento na [CO₂] deve produzir maior P_n juntamente com menor T_r , o que acabaria por melhorar o uso da água na maioria das espécies vegetais (Ainsworth e Rogers, 2007; Leakey et al., 2009; Woodward, 2002). Além disso, a diminuição da abertura estomática, da densidade estomática (DE) e do índice estomático (IE), que contribuem para uma queda de g_s , têm sido relatado em plantas cultivadas em elevada [CO₂] (Lin et al., 2001; Miyazawa, Livingston e Turpin, 2006; Possel e Hewitt, 2009; Ainsworth e Long, 2007), embora em alguns casos g_s e não DE determina a redução a longo prazo de T_r (Tricker et al., 2005). No entanto, a antecipação do fechamento dos estômatos que é geralmente observado em elevado [CO₂] será inevitavelmente associado com menor perda de calor latente, aumentando assim a temperatura das folhas (DaMatta et al., 2010).

O grau da aclimação negativa da fotossíntese (*down-regulation*) em resposta ao enriquecimento da $[CO_2]$ é variável entre as plantas, dependendo das interações com outras limitações ambientais (Sage, 1994; Long et al., 2004; Kirschbaum, 2011) e até mesmo alterações no estágio de desenvolvimento da planta (Zhu et al., 2012). Se presente, a regulação negativa da fotossíntese irá diminuir (mas não completamente) o efeito estimulante da elevação da $[CO_2]$, concomitantemente, o enriquecimento do CO_2 pode levar a aumentos da eficiência do uso da água e de nitrogênio (Woodward, 2002)). No entanto, tem sido frequentemente relatado que o aumento de P_n sob elevada $[CO_2]$ esteve ligado ao aumento da taxa de crescimento em extensão muito menor (aproximadamente 10%). Esta discrepância pode ser resultado de uma limitação da força dreno que impede a planta de utilizar totalmente o produto fotossintetizado devido a, por exemplo, uma limitação do tecido meristemático relacionada com um padrão de crescimento. Uma possível limitação pode levar a um aumento dos carboidratos não-estruturais nas folhas, associados com uma taxa mais baixa de exportação para outros tecidos (Stitt, 1991; Kirschbaum, 2011), implicando em uma redução da regeneração de P_i no cloroplasto (Luo et al., 1999; Sims, 1999).

O aumento dos carboidratos não-estruturais poderia desencadear um mecanismo de sinalização, gerando uma cascata de respostas bioquímicas e moleculares, por exemplo, uma inibição da expressão de genes e da atividade de enzimas fotossintéticas, incluindo a RuBisCo, ou até uma redução nos níveis de todos os componentes do aparato fotossintético (Stitt, 1991; Sage, 1994). Isso contribuiria para a redução das taxas de assimilação líquida e da capacidade fotossintética, ligadas a uma redução na velocidade máxima de carboxilação aparente (V_{cmax}) e na taxa aparente máxima de transporte de elétrons (J_{max}) (Luo et al., 1999; Sicher e Bunce, 1999; Long et al., 2004; Miyazawa et al., 2006; Ainsworth e Rogers, 2007; Bader, Siegwolf e Körner, 2010; Zhu et al., 2012).

De fato, a redução da fotossíntese foi quantitativamente e mecanisticamente atribuída à diminuição V_{cmax} e ao investimento em RuBisCO (Ainsworth e Long, 2005), mas os fatores responsáveis também incluem a redução da regeneração ribulose-1,5-bifosfato (RuBP), o que diminui a J_{max} devido a redução da capacidade de transporte de elétrons ou da disponibilidade de P_i no cloroplasto para a síntese de ATP (Sage, 1994; Drake, González-Meler e Long, 1997; Ainsworth e Rogers, 2007; Kirschbaum, 2011; Zhu et al., 2012). No geral, árvores e arbustos têm maior capacidade de dreno quando comparadas a culturas anuais e geralmente apresentam maior estimulação fotossintética quando cultivado em elevada $[CO_2]$ (Arp, 1991; Ainsworth e Long, 2005; Ainsworth e Rogers, 2007).

O café é uma cultura tropical que atualmente é cultivada em cerca de 80 países, tornando-se uma das *commodity* mais negociadas do mundo. A venda de café gera mais de US\$ 90.000 milhões a cada ano, sendo a base econômica de muitos países tropicais em desenvolvimento. O gênero *Coffea* compreende mais de 100 espécies, entre as quais *C. arabica* L. e *C. canephora* Pierre ex Froehner A. que, juntas, são responsáveis por aproximadamente 99% da produção mundial de café em grão (DaMatta e Ramalho, 2006; Partelli et al., 2011).

Devido às mudanças climáticas em curso no mundo, tem havido crescente preocupação sobre a adequação das tradicionais áreas produtoras de café, por isso há um aumento dos estudos de modelagem de cenários climáticos futuros, principalmente relacionados com a temperatura do ar, sendo previstos efeitos dramáticos sobre esta cultura, incluindo severas perdas no México (Gay et al., 2006), extensas reduções de áreas adequadas no Brasil (Assad et al., 2004) e a extinção de populações selvagens de *C. arabica* na Etiópia (Davis et al., 2012). No entanto, as previsões negativas dos efeitos das mudanças climáticas globais não têm considerado os efeitos atenuantes do aumento da [CO₂] atmosférica sobre os impactos nocivos das temperaturas elevadas sobre a cultura e a capacidade das plantas de café para ajustar com êxito o seu metabolismo a condições ambientais estressantes (DaMatta e Ramalho, 2006; Fortunato et al., 2010; Batista-Santos et al., 2011; Cavatte et al., 2012).

Apesar da importância agrônômica do café, não há informações sobre os efeitos do CO₂ sobre a fisiologia da cultura. É sabido que, em condições atuais de [CO₂] atmosférica e luz saturante (DaMatta et al., 2010), a planta de café apresenta tipicamente baixo P_n (04-11 μmol m² s⁻¹), grande parte devido à difusão de vapor e não por limitação fotossintética (Araújo et al., 2008; Batista et al., 2012). Também foi proposto que as plantas de café são, dentro de determinados limites, capazes de evitar a regulação negativa da fotossíntese através de sua alta capacidade de acumulação de amido (Batista et al., 2012; Morais et al., 2012), e assim, há uma hipótese de que plantas de café poderão sustentar relativamente alto P_n em um cenário de aumento da [CO₂] atmosférica.

Neste contexto, objetivou-se estudar em longo prazo (*long-term*) as implicações de diferentes [CO₂] (380 ou 700 μL CO₂ L⁻¹) em plantas de *C. arabica* (IPR 108 e Icatu) e *C. canephora* (Conilon clone 153) crescidas sob condições controladas, sem restrições de água, nutrientes ou de desenvolvimento radicular.

MATERIAL E MÉTODOS

Local de estudo, material vegetal, delineamento e implementação do ensaio

O experimento foi desenvolvido, em casa de vegetação e em fitoclimas (com controle de variáveis ambientais), no Grupo de Interações Planta-Ambiente, Centro de Ambiente, Agricultura e Desenvolvimento, do Instituto de Investigação Tropical (Plant Stress – BioTrop - IICT) em Oeiras, Portugal (Figura 1 A)

Adotou-se um delineamento inteiramente casualizado em parcela subdividida, na qual a parcela consistiu de níveis de [CO₂] atmosférico (380 e 700 µL L⁻¹) e a subparcela em genótipos de *Coffea spp.* (*C. arabica* e *C. canephora*), com cinco repetições. As plantas foram cultivadas em vasos plásticos com capacidade de 12 L até a idade de um ano, após foram transplantadas para vasos com capacidade de 26 L utilizando 30 dm³ de solo, durante 14 meses (Figura 1 B e C).

Os genótipos utilizados no ensaio foram o Icatu e o Catucaí IPR 108, ambos *C. arabica*, descritos por Carvalho et al. (2008) e o clone 153 (*C. canephora* cv. Conilon) descrito por Fonseca et al. (2008) com aproximadamente 12 meses de idade, cultivados em vasos em casa de vegetação. Após estes foram transferidos para câmaras de crescimento (Fitoclima 10000-EHMF, Walk-in, ARALAB, Portugal) com ambiente controlado de irradiância de 700-800 µmol m⁻² s⁻¹, proporcionada por uma combinação otimizada de lâmpadas fluorescentes de alta frequência, de vapor de sódio e de halogênio (Ramalho et al., 2002), umidade relativa de 70%, fotoperíodo de 12 h, temperatura de 25/20 °C (dia/noite) e concentração de CO₂ de 380 ou 700 µL L⁻¹. O nível de temperatura foi escolhido com base na faixa de aptidão térmica média anual (DaMatta e Rena, 2002) para *C. arabica* (22 °C) e para *C. canephora* (26 °C), sendo estipulado o valor de temperatura de 25/20 °C (dia/noite).



Figura 1. Visualização do cultivo dos cafeeiros em câmaras de crescimento (Fitoclima 10000-EHHF, *Walk-in*, ARALAB, Portugal),

As determinações foram efetuadas em folhas recém maduras (Figura 1 D), amostrando no mínimo cinco plantas de cada genótipo para utilização em análises imediatas e, também, armazenadas em N₂ líquido e posteriormente em -80 °C (Cryocell, DD86-750 P, Portugal).

Determinação da área foliar específica e de variáveis estomáticas

A área foliar específica (AFE) foi determinada em cinco amostras de 10 discos foliares (0,5 cm² cada), após secagem a 80 °C por 24 h, sendo expressa em m² kg⁻¹. Para a determinação das variáveis estomáticas, foram amostrados segmentos foliares situados no terço médio abaxial (largura máxima), sendo a área compreendida entre duas nervuras laterais e entre a nervura central até a margem da folha (direita ou esquerda), formando uma área com características retangulares. Para a obtenção dos estômatos, aplicou-se esmalte incolor (utilizado para tratamentos cosméticos em unhas) (Figura 2 A) e após cinco minutos foi aplicado uma fita adesiva transparente (Figura 2 B). Retirou-se a fita adesiva da folha e inserindo a mesma em lâminas de vidro (Figura 2 C), que posteriormente foram analisadas em microscópio de luz (Olympus BX50, Japão), com ampliação de 400 vezes, ligado a uma câmara digital (Câmara Axiovision Zeiss, Alemanha) (Figura 2 D). Foram feitas cinco laminas por genótipo, sendo que em cada lâmina se procedeu análise de três pontos de visão diferentes (Chattopadhyay et al., 2011).

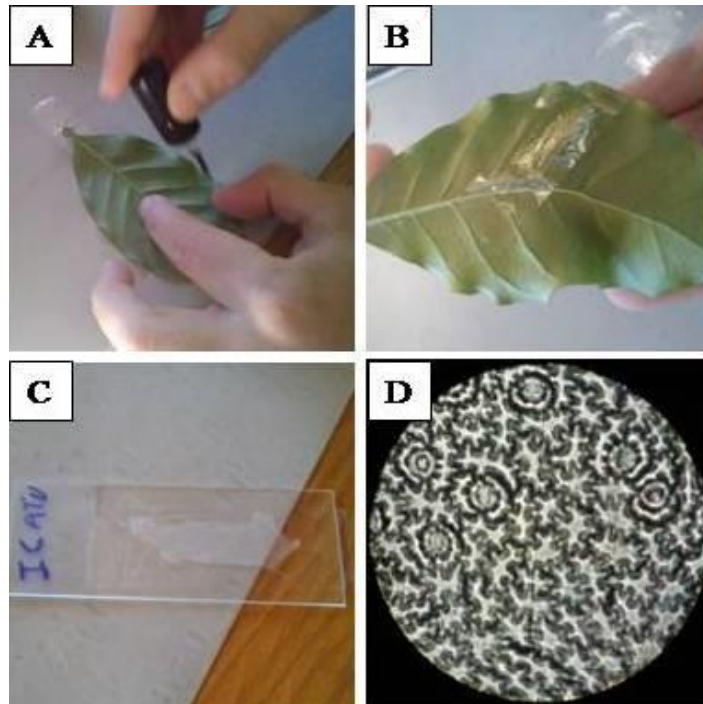


Figura 2. Representação da aplicação do esmalte (A) e da fita adesiva na folha do cafeeiro (B) e lâmina (C) e posterior visualização dos estômatos do cultivar IPR 108 (D).

A densidade estomática (DE) foi calculada a partir da quantificação do número de estômatos por unidade de área da folha e o índice estomático (IE) foi calculado a partir de: IE (%) = [(n° de estômatos)/(n° total de células + n° de estômatos)]x100 (Ferris e Taylor, 1994). O valor médio do tamanho dos estômatos foi obtido analisando aleatoriamente 30 estômatos por lâmina, utilizando um micrômetro ocular para mensurar o comprimento (a) e a largura (b). Para o cálculo da área dos estômatos, foi assumido que os mesmos têm forma de uma elipse (Valverde et al., 2001), aplicando-se:

$$TA = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \pi \left(\frac{a.b}{2} \right), \text{ sendo "m" estômatos por lâmina.}$$

Trocas gasosas foliares

A curva de taxa de assimilação líquida de CO₂ (A) em função da concentração interna de CO₂ (C_i) (curvas A/C_i) foi determinada em resposta as concentrações de CO₂ na câmara (C_a), utilizando um analisador portátil de gases por infravermelho em sistema aberto (Figura 3 A), com uma câmara de 6 cm² (Li-Cor, 6400XT, Lincoln Nebraska, EUA) sob irradiância de, aproximadamente, 600 μmol m⁻²s⁻¹ (Figura 3 B e C). Para obtenção das curvas foram utilizadas

12 concentrações de CO₂, de 50 a 1800 μL de CO₂ L⁻¹, aplicadas de forma gradual. Paralelamente a A, foram ainda obtidos os valores da condutância estomática ao vapor de água (g_s), da transpiração (E) e o C_i , sendo as avaliações efetuadas em cinco plantas por genótipo, em duas folhas por planta recém maduras dispostas no terço médio superior e não sombreadas por outras folhas.

Das curvas A/C_i foram estimadas as taxas de carboxilação máxima da ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (V_{cmax}), descarboxilação máxima limitada pelo transporte de elétrons (J_{max}), de respiração em presença de luz (R_d) e de utilização de triose-fosfato (TPU), de acordo com (Bernacchi et al., 2002; Souza et al., 2005).

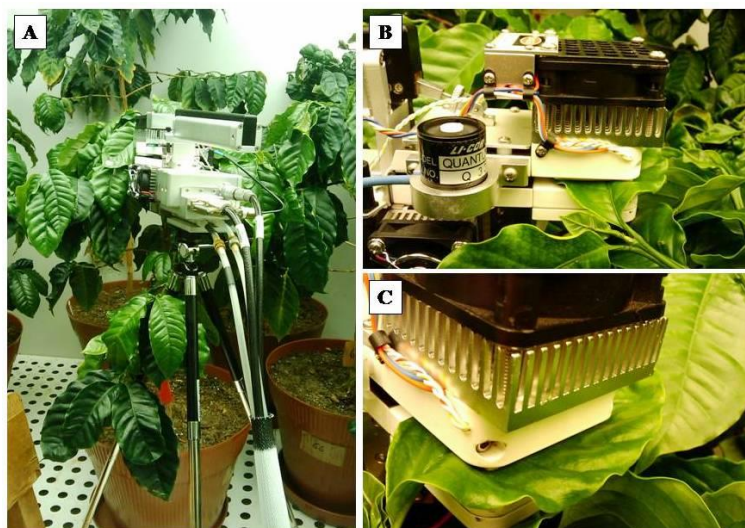


Figura 3. Visualização geral da utilização do IRGA no ensaio em plantas de cafeeiro (A), da câmara de medida de trocas gasosas foliares (B e C).

A avaliação da capacidade fotossintética máxima (A_{max}), expressa pela evolução de O₂, foi determinada em um sistema polarográfico de O₂ do tipo Clark (LD2/2, Hansatech, Inglaterra) (Figura 4), utilizando um disco foliar de 1,86 cm² retirado das folhas, anteriormente, usadas para obtenção das curvas A/C_i (Figura 3). A_{max} foi determinada sob condições saturantes de CO₂ (7%) e irradiação (que resultados prévios mostraram ser de 800 μmol m⁻²s⁻¹) fornecida por uma lâmpada Björkman (Hansatech, Inglaterra) a uma temperatura de 25 °C (Batista-Santos et al., 2011).

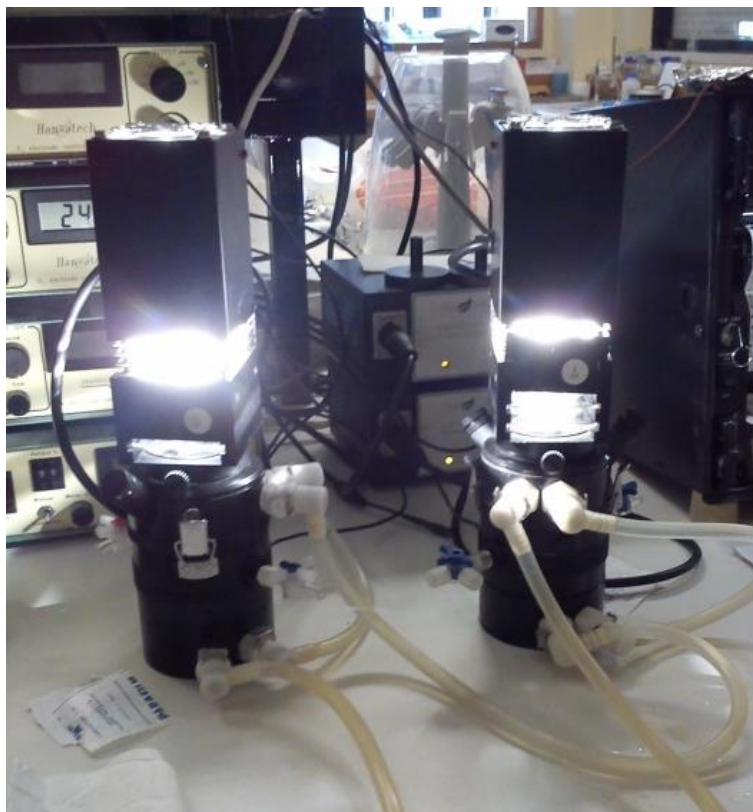


Figura 4. Visualização do sistema polarográfico de O₂ do tipo Clark (LD2/2, Hansatech, Inglaterra).

Parâmetros de fluorescência da clorofila

Os parâmetros da fluorescência da clorofila *a* foram determinados utilizando um fluorímetro portátil de amplitude modulada PAM-2000 (H. Walz, Effeltrich, Alemanha), em dois momentos, sendo: no final do período noturno com as folhas adaptadas à ausência de luz, e durante o período diurno, após cerca de 2 h de exposição à irradiância (cerca de 700-800 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), com as plantas em equilíbrio dinâmico fotossintético (Ramalho et al., 2003).

Em condições de ausência de luz, obteve-se a fluorescência mínima (F_0) da clorofila das antenas utilizando um feixe de luz de baixa irradiância ($< 0,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a fim de manter os centros de reação oxidados, *i.e.*, sem que haja passagem de energia/elétrons para o aceitador primário do PSII (quinona A – Q_A). Imediatamente aplicou-se um *flash* saturante de luz branca (*ca.* 7000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), durante 0,6 s, a fim de medir o valor da fluorescência máxima (F_m), correspondente à emissão de fluorescência pelas moléculas de clorofila quando todos os centros de reação do PSII estão reduzidos.

Em condições de iluminação, com as plantas em equilíbrio dinâmico do processo fotossintético, procedeu-se à iluminação das folhas do cafeeiro com luz branca (proporcionada

pela lâmpada de halogênio do PAM-2000; *ca.* 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) obtendo-se a fluorescência estável (F_s), em equilíbrio. Seguidamente, com a utilização de *flashes* saturantes se obteve a fluorescência máxima (F_m'). O sistema de medida acionou então uma lâmpada com emissão no comprimento de onda do vermelho-distante, medindo-se assim a emissão da fluorescência inicial com os centros de reação abertos (F_o').

Foram feitas três leituras em cada planta para compor o valor de uma unidade experimental, analisando-se cinco plantas por genótipo. A partir das medições descritas calcularam-se os seguintes parâmetros de fluorescência da clorofila *a* (Krupa et al., 1993; Ruban e Horton, 1995; Demmig-Adams et al., 1996; White e Critchley, 1999; Krause & Jahns, 2004; Schreiber, 2004):

$$F_v = F_m - F_o \text{ (Fluorescência variável à escura)}$$

$$F_v' = F_m' - F_o' \text{ (Fluorescência variável à luz)}$$

$$\frac{F_v}{F_m} = \frac{(F_m - F_o)}{F_m} \text{ (Eficiência a fotoquímica potencial do PSII)}$$

$$\frac{F_v'}{F_m'} = \frac{(F_m' - F_o')}{F_m'} \text{ (Eficiência a fotoquímica do PSII - equilíbrio dinâmico)}$$

$$qP = \frac{(F_m' - F_s)}{(F_m' - F_o')} \text{ (Fator de amortecimento fotoquímico - quenching fotoquímico)}$$

Separação, identificação e quantificação de pigmentos fotossintéticos

Os pigmentos fotossintéticos foram determinados em amostras de três discos foliares (0,5 cm^2 cada) de cada folha coletada a plena luz e colocadas imediatamente em N_2 líquido e armazenado a -80°C até posterior utilização (Figura 5 A) de acordo com o método otimizado para *Coffea* spp. (Ramalho et al., 1998; Partelli, 2008).

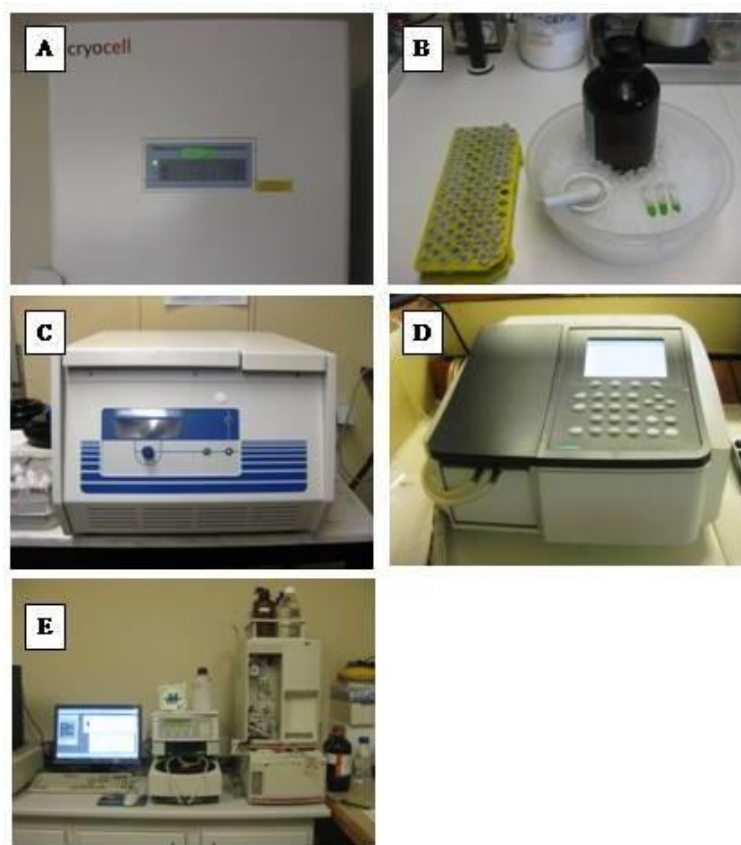


Figura 5. Visualização do ultra congelador (-80 °C) (A), da etapa de maceração dos discos foliares em acetona 90% (B), da centrifugação do homogenato em centrífuga refrigerada (C), do espectrofotômetro para quantificação de pigmentos fotossintéticos (clorofilas e carotenóides) (D) e do sistema de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) para a separação, identificação e quantificação dos carotenóides (E).

A homogeneização das amostras (em ambiente com luz reduzida) procedeu-se em 1,5 mL de solução de acetona (90%), em almofariz de porcelana, em banho de gelo. O homogenato foi colocado em tubos Eppendorf (Figura 5 B) e deixado a completar a extração de pigmentos durante 30 min a 4 °C. O homogenato foi então centrifugado (12.000 g, 4 °C, 10 min) em centrífuga refrigerada (3-30KS, Sigma, Alemanha) (Figura 5 C), recolhendo-se e filtrando-se (filtros de nylon, 0,45 µm).

Em cada amostra foi retirada uma alíquota de 200 µL a que se juntaram 25 µL de H₂O deionizada e 1194 µL de acetona (80%) para quantificação espectrofotométrica de clorofilas *a*, clorofilas *b* e carotenóides totais (carotenos + xantofilas). Para tal usaram-se respectivamente, os comprimentos de onda de 663,2 nm, 647,8 nm e 470,0 nm (Figura 5 D). A partir das

absorbâncias foram estimados os valores das concentrações ($\mu\text{g g}^{-1}$ MF) desses pigmentos com base nos coeficientes descritos por Lichtenthaler (1987) para um homogenato a 80% de acetona:

$$\text{Clorofila } a = 12,25 * Abs_{663,2} - 2,79 * Abs_{647,8}$$

$$\text{Clorofila } b = 21,50 * Abs_{647,8} - 5,10 * Abs_{663,2}$$

$$\text{Carotenóides totais} = \frac{1000 * Abs_{470,0} - 1,82 * Cl_a - 85,02 * Cl_b}{198}$$

Para a separação, identificação e quantificação dos carotenóides foliares foi utilizado um método de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) (Beckman, System Gold, EUA, com detector de fotodiodos) (Figura 5 E), com uma coluna C18 de fase reversa, 5 μm Spherisorb ODS (250 x 4,6 mm), acoplada a uma pré-coluna do mesmo material. A detecção foi efetuada a 440 nm e a eluição dos pigmentos decorreu a 23-24 °C, durante 21 minutos com fluxo de 1,0 mL min⁻¹, utilizando um gradiente não-linear de 25-100% de acetato de etilo em solução de acetonitrilo/água (9:1, v/v), contendo 0,1% trietilamina, conforme previamente otimizado para o cafeeiro (adaptado de Ramalho et al., 1998; Partelli, 2008), com ligeiras alterações. O procedimento ocorreu da seguinte forma: 1) 0-10,5 minutos em gradiente linear 25-41% de acetato de etila; 2) 10,5-20 minutos em gradiente linear 41-100% de acetato de etilo; 3) 20-21 minutos par retorno do sistema às condições iniciais; 4) 10 minutos nestas condições para reequilíbrio da coluna (Figura 6). Os carotenóides foram identificados e quantificados através do uso de curvas padrão efetuadas para cada pigmento.

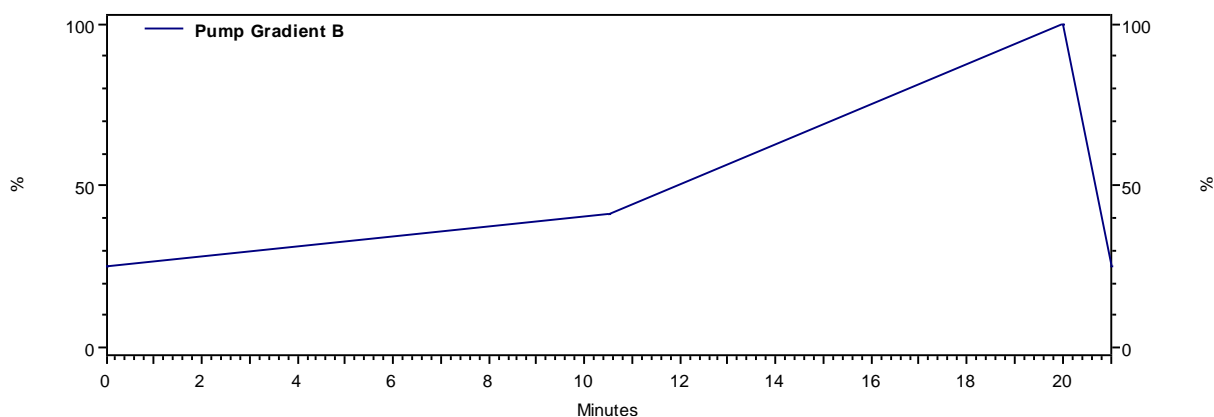


Figura 6. Perfil otimizado do gradiente não-linear de 25-100% de acetato de etilo, utilizado para a separação, identificação e quantificação dos carotenóides por HPLC.

Taxas de transporte de elétrons nos tilacóides

O isolamento do cloroplasto foi realizado, de acordo com Droppa et al. (1987), utilizando 4-5 g de material foliar recém-cortados. A taxa de transporte de elétrons foi determinada usando 1 mL de mistura de reação contendo frações de cloroplastos com um teor de aproximadamente 100-150 μg clorofila, em um sistema polarográfico de O_2 do tipo Clark (LD2/2, Hansatech, Inglaterra) com uma densidade de fluxos de fótons fotossintéticos de $4000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ fornecida por uma lâmpada Björkman (Hansatech, Inglaterra), a temperatura de 25°C , com modificações descritas por Ramalho et al. (1999).

Para avaliar a taxa de transporte de elétrons associado ao PSII incluindo o complexo de oxidação da água ($\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{DCPIP}$), utilizou-se 25 μL de solução de 2,6-diclorofenolindofenol (DCPIP) 1 mM, que funcionou como aceitador de elétrons provenientes da reserva de quinonas. Para a avaliação da taxa associada ao PSII sem o complexo de oxidação da água ($\text{DPC} \rightarrow \text{DCPIP}$) foram utilizados 25 μL de solução de DCPIP e 30 μL de 3-(3,4-diclorofenil)-1,1-dimetilurea (DPC) a 25 mM, com intuito de fornecer elétrons para o PSII.

Para avaliar a taxa de transporte de elétrons associado ao PSI ($\text{DCPIPH}_2 \rightarrow \text{MV}$) foram utilizados 200 μL de DCMU a 250 mM (inibindo o transporte de elétrons antes do PQ-9), 400 μL de DCPIP, 25 μL de ascorbato a 50 mM (para redução de DCPIP que atua como doador de elétrons para citocromo *f*) e também 300 μL de metilviologênio (MV) (10 mM) utilizado como receptor de elétrons. O composto Azida de sódio (400 μL a 6 M) foi utilizado em todas as reações a fim de inibir a atividade da peroxidase.

Fuga de eletrólitos para análise de permeabilidade da membrana

O grau de integridade das membranas foliares foi estimado pela fuga de eletrólitos de acordo com Campos et al. (2003). Cortaram-se 15 discos foliares frescos ($0,5 \text{ cm}^2$ cada), de 3 folhas da mesma planta (Figura 7 A), procedendo-se imediatamente a três lavagens com água deionizada (1 minuto cada) com intuito de lavar as zonas de corte dos discos (Figura 7 B); depositando-se, posteriormente, a amostra em frasco de vidro vedado com 15 mL de água deionizada (Figura 7 C).

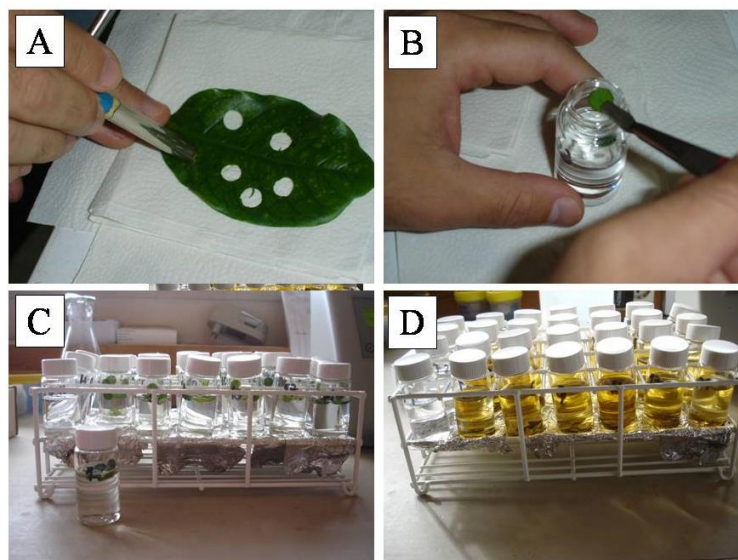


Figura 7. Visualização das fases da análise de permeabilidade da membrana.

Após os discos foliares flutuarem durante 22 h a temperatura de 20 °C (Figura 7 D), que avaliação prévia apontou como o tempo adequado para as leituras, foram registrados os valores de condutividade elétrica ($\mu\text{S m}^{-1}$) correspondente à extrusão de eletrólitos permitida pelas membranas nesse período (C_{22}), utilizando para isso um condutivímetro (Crison 31, Crison Instruments, SA, Espanha). Posteriormente, os frascos foram colocados em estufa a 90 °C, por 2 h com intuito de permeabilizar totalmente as membranas, assim, após os frascos alcançarem a temperatura ambiente (*ca.* 20 °C) efetuaram-se as leituras da condutividade elétrica total (C_T). O dano das membranas das folhas (DMF) foi calculado pela seguinte equação:

$$DMF(\%) = \left(\frac{C_T - C_{22}}{C_T} \right) * 100$$

Análise dos lipídios das membranas dos cloroplastos

Isolamento das membranas e extração dos lipídios totais

O isolamento das membranas dos cloroplastos foi realizado de acordo com Allen et al. (1966), utilizando 3-4 g de folhas recém-cortadas (Figura 8 A). Imediatamente após o corte procedeu-se à maceração do material em almofariz previamente arrefecido com 25 mL de tampão MES 50 mM (Figura 8 B e C) (pH 6,4; contendo: 0,4 M D-sorbitol, 10 mM NaCl, 5 mM MgCl_2 , 2 mM EDTA, 1 mM MnCl_2 , 0,4% (p/v) BSA e 2 mM Na-ascorbato). O homogenato (Figura 8 D) foi filtrado em oito camadas sobrepostas de gaze e centrifugado (4500 g, 5 min a 4 °C), após se descartou o sobrenadante. O sedimento (membranas dos cloroplastos)

foi ressuspendido em 9 mL de uma solução água/clorofórmio/metanol (1:1:1, v/v/v), sendo que esta mistura foi novamente centrifugada (4500 g, 10 min, 4 °C). Paralelamente, antes da centrifugação, foram retirados 100 µL para a determinação espectrofotométrica das clorofilas e carotenóides totais (Lichtenthaler, 1987). Após a centrifugação, com uma pipeta de Pasteur, a fase inferior que contém os lipídios dos cloroplastos foi recolhida e evaporada sob fluxo de nitrogênio. Posteriormente, resuspendeu-se o resíduo seco em 1 mL de solução de etanol/tolueno (1:4, v/v); sendo este extrato de lipídios totais dos cloroplastos armazenado a -20 °C.

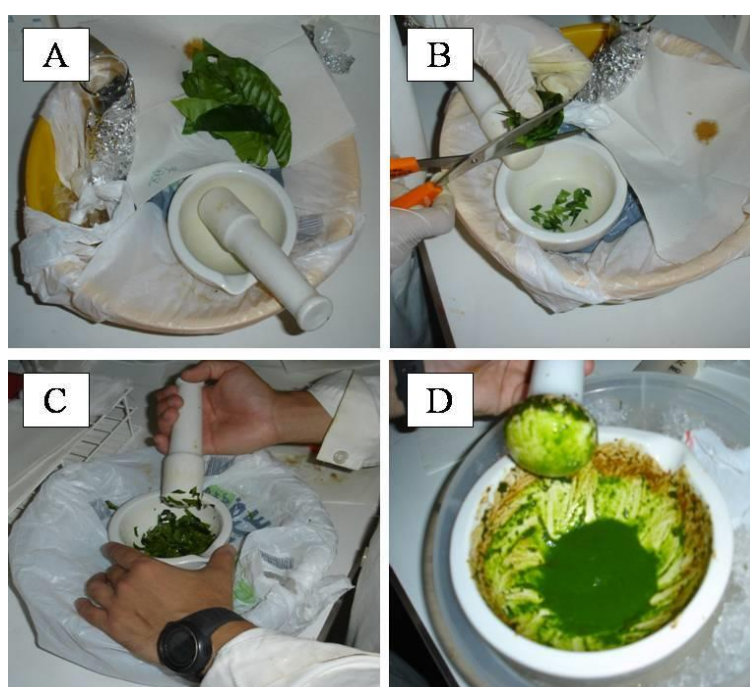


Figura 8. Visualização do processo de extração das membranas dos cloroplastos de folhas de *Coffea* spp. para determinação de classes lipídicas.

Determinação dos ácidos graxos totais (AGT)

Retirou-se uma alíquota (150 µL) de cada extrato lipídico e procedeu-se à saponificação do mesmo adicionando 4 mL de 0,5 M NaOH em metanol a cada tubo. Após agitação, os tubos foram colocados em banho termostatizado a 65 °C por 15 min. Após arrefecimento dos tubos com água corrente, adicionou-se a cada tubo 50 µg de ácido heptadecanóico (C17:0) como padrão interno, procedendo-se seguidamente à metilação das amostras, mediante a adição de 2 mL de metanol-BF₃ (trifluoreto de boro em metanol). Após homogeneização da mistura no vórtex, os tubos foram colocados novamente em banho termostatizado a 65 °C por 15 min e decorrido este período os tubos foram arrefecidos com água corrente. Adicionaram-se 10 mL

de pentano e 2 mL de água destilada, e agitou-se a amostra que foi mantida em repouso (*ca.* 1 h) ocorrendo uma separação de fases no tubo; a fase superior (pentano), contendo os ácidos gordos metilados, foi recolhida com uma pipeta de Pasteur. O pentano foi evaporado sob fluxo de nitrogênio, seguindo-se a resuspensão do resíduo seco em 400 μL de etanol:tolueno (1:4, v/v). Para recuperar todo o resíduo procedeu-se a uma lavagem adicionando mais 200 μL (duas aplicações 100 μL) de etanol:tolueno. As amostras foram acondicionadas a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sob atmosfera de nitrogênio, para posterior análise.

Análise dos ácidos graxos metilados

As amostras de ácidos totais foram evaporadas à secura e resuspendidas com 50 μL de hexano para o início da análise por cromatografia gás-líquido, utilizando um cromatógrafo UNICAM 610 (Unicam, Inglaterra) equipado com um detector de ionização de chama. Para cada amostra injetou-se cerca de 1 μL , sendo os compostos separados por coluna capilar de sílica fundida DB-Wax (J & W Scientific, Estados Unidos), com temperatura programada de 80 para 200 $^{\circ}\text{C}$ (aumento de 12 $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ após 2 min à temperatura inicial), utilizando o hidrogênio como gás de transporte (fluxo de 1 mL min^{-1} , razão de mistura de 1:50), estando o injetor e o detector a 200 e 250 $^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

A identificação dos ácidos gordos foi feita por comparação com padrões conhecidos (Supelco, mistura FAME C8-C22 e Restek C16-C24) e a quantificação utilizando como referência a área do padrão interno (C17:0), sendo que o valor dos ácidos gordos totais correspondeu à soma dos ácidos gordos individuais, enquanto o índice de saturação, DBI = $[(\% \text{ monoenes} + 2 \times \% \text{ dienes} + 3 \times \% \text{ trienes})/(\% \text{ ácidos gordos saturados})]$, foi calculado conforme Mazliak (1983).

Atividades enzimáticas da fotossíntese e respiração

As atividades das enzimas do metabolismo do carbono foram determinadas em amostras de três discos foliares (0,5 cm^2 cada) de cada folha coletada a plena luz e colocadas imediatamente em N_2 líquido e armazenado a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ até posterior utilização. A homogeneização das amostras procedeu-se em almofariz de porcelana (em gelo) adicionando 100 mg de PVPP insolúvel e 1 mL de tampão de extração Tris-HCl (100 mM, pH 8), contendo 10 mM de MgCl_2 , 10 mM de NaHCO_3 , 10 mM de β -mercaptoetanol, 2 mM de DTT, 1% (v/v) de Triton X-100, 2% (v/v) de inibidor completo da protease e 10% (v/v) de glicerol.

O homogenato foi colocado em tubos Eppendorf e centrifugado (16.000 g, 4° C, 20 min) em centrífuga refrigerada, recolhendo-se o sobrenadante, sendo a atividade mensurada com base na oxidação do NADH a 340 nm em 1 mL de volume final na cuvete, a 25 ° C.

O total de ribulose-1,5-bifosfato-carboxilase/oxigenase (RuBisCo: EC 4.1.1.39) foi determinado (com modificações de Gerard et al., 1996) adicionando 20 µL do extrato em uma cuvete contendo Tris- HCl (50 mM, pH 8,0), 15 mM de MgCl₂, 20 mM de NaHCO₃, 100 mM de fosfato-creatina, 10 mM de ATP, 0,2 mM de NADH, 20 µmL⁻¹ de creatina-quinase, 15 µmL⁻¹ de 3-fosfoglicerato-quinase e 15 µmL⁻¹ de gliceraldeído-3-fosfato desidrogenase. Após incubação de 10 min, foi adicionado 50 µL de RuBP (20 mM) para iniciar a reação.

A atividade da ribulose-5-fosfato-quinase (RuB5PK: EC 2.7.1.19) foi determinado (com modificações de Souza et al., 2005) adicionando 20 µL em uma cuvete contendo Tris-HCl (100 mM, pH 8,0), 8 mM de MgCl₂, 40 mM de KCl, 20 mM de fosfoenolpiruvato, 5 mM de ATP, 1 mM NADH, 20 mM DTT, 8 unidades de piruvato-quinase, 10 µmL⁻¹ lactatedehidrogenase e 5 µmL⁻¹ fosforiboisomerase. Após incubação de 15 min, foi adicionado 10 µL de ribose-5-fosfato (500 mM) para iniciar a reação.

A atividade da RuBisCo e da RuB5PK foi calculado de acordo com o coeficiente de extinção molar do NADH ($\epsilon = 6,22$) e a densidade óptica (DO, em segundos) sendo:

$$Atividade\ enzimática = \left(\frac{DO}{\text{área} * 6,22} \right) * 10000 [\mu mol\ NADH\ m^{-2}\ s^{-1}]$$

A atividade da piruvato-quinase (PK: EC 2.7.1.40) foi determinada (com modificações de Diaz et al., 1996) adicionando 20 µL do extrato em uma cuvete contendo Tris-HCl (100 mM; pH 8,0), 10 mM de MgCl₂, 0,2 mM de NADH, 1 mM de frutose-1,6-bifosfato, 45 mM de ADP, 6,3 µmL⁻¹ lactatodesidrogenase, sendo a reação iniciada pela adição de 100 µL de fosfoenolpiruvato (10 mM).

A atividade da malato-desidrogenase (MDH: EC 1.1.1.37), foi determinada (com modificações de López-Millan et al., 2000) adicionando 20 µL do extrato em uma cuvete contendo Tris-HCl (50 mM, pH 8,0) e 0,1 mM de NADH, sendo a reação iniciada pela adição de 20 µL de oxaloacetato (20 mM).

Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA, $p \leq 0,05$), utilizando-se o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2011) e quando significativos, foi utilizado o teste de Tukey (a $p \leq 0,05$) para comparação de médias entre genótipos e também entre as $[\text{CO}_2]$.

RESULTADOS

Anatomia foliar

Foi encontrada, em todos os genótipos, uma tendência consistente de redução da densidade estomática (5-14%) e aumento do índice estomático (3-7%) em alta $[\text{CO}_2]$, embora a significância estatística tenha sido alcançada apenas no cultivar Icatu (Tabela 1). Não houve diferença estatística para o tamanho dos estômatos e para a área foliar específica dos genótipos, em relação os níveis de $[\text{CO}_2]$ estudados.

Tabela 1. Valores médios de densidade estomática - DE (nº de estômatos mm^{-2}), tamanho dos estômatos - TE (μm^2), índice estomático - IE (%) e área foliar específica - AFE ($\text{m}^2 \text{kg}^{-2}$) em folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivados em 380 ou 700 $\mu\text{L CO}_2 \text{L}^{-1}$

Genótipos	CL 153		Icatu		IPR 108	
	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$
DE	195,2 aA	174,8 aA	193,9 aA	165,9 aB	190,7 aA	180,6 aA
TE	273,2 cA	289,8 cA	349,7 bB	374,8 bA	398,1 aA	409,3 aA
IE	14,0 bA	14,8 bA	24,0 aA	20,7 aA	26,2 aA	22,6 aA
AFE	13,5 aA	13,6 aA	13,4 aA	11,6 aA	15,8 aA	12,9 aA

Valores médios seguidos da mesma letra minúscula para genótipos e maiúscula para $[\text{CO}_2]$ não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Trocas gasosas foliares

Independentemente dos genótipos estudados, a taxa de fotossíntese líquida (P_n) foi elevada (entre 49 e 68%) quando medida em função da concentração interna de CO_2 (C_i) de 700 em relação a 380 $\mu\text{L CO}_2 \text{L}^{-1}$ (Figura 9), revelando que o resultado foi independente dos níveis de CO_2 em que as plantas foram cultivadas. Em relação à condutância estomática ao vapor de água, não foram observadas alterações significativas entre os níveis de CO_2 , para cada genótipo, no entanto, a g_s tendeu a valores reduzidos, quando medido com C_i de 700 $\mu\text{L CO}_2 \text{L}^{-1}$, a partir de 3% (Icatu crescido em 380 $\mu\text{L CO}_2 \text{L}^{-1}$) até 19% (IPR 108 crescido em 380 $\mu\text{L CO}_2 \text{L}^{-1}$)

(Figura 9). Tomadas em conjunto, as mudanças na P_n e na g_s , quando medidas em C_i de $700 \mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$, conduziram a aumentos da EUA em todos os genótipos, entre 68 e 123%, independentemente do nível de $[\text{CO}_2]$ em que as plantas se desenvolveram (Figura 9).

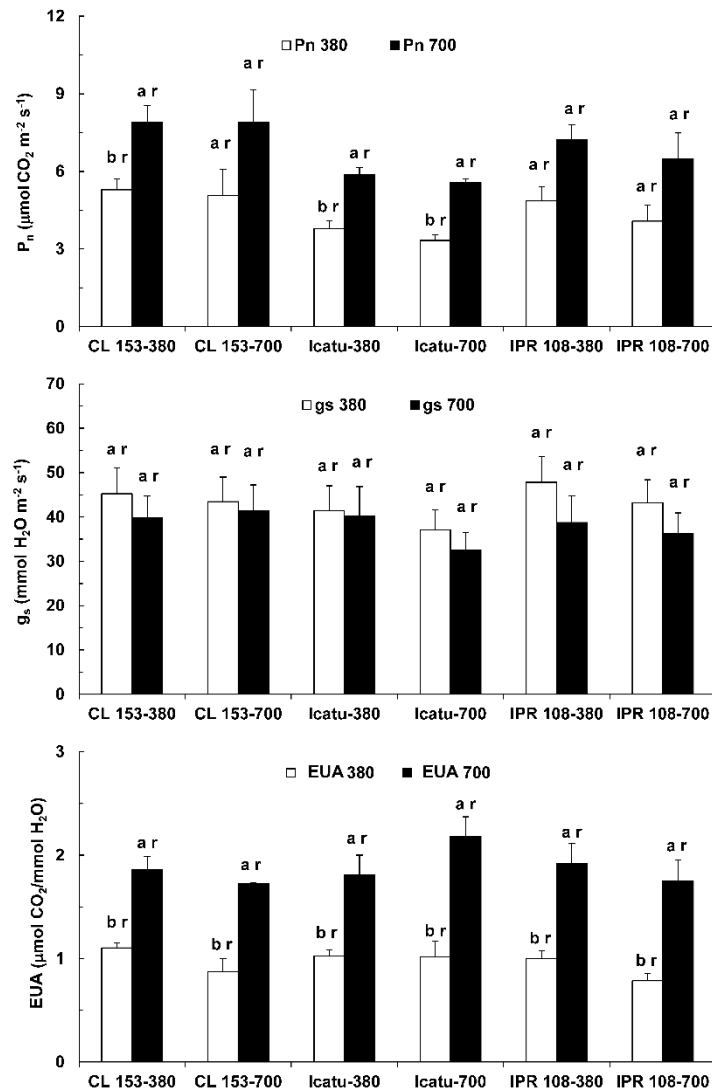


Figura 9. Valores médios da taxa de fotossíntese líquida de folhas (P_n), condutância estomática (g_s) e eficiência instantânea do uso da água (EUA) em *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) medido em ambos 380 (barra branca) e 700 (barra preta) $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$ para as plantas cultivadas em 380 e 700 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$. Valores médios seguidos por diferentes letras, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade expressam diferenças significativas entre as determinações a 380 e 700 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$ para as plantas cultivadas na mesma $[\text{CO}_2]$ (a, b) ou entre as plantas crescidas $[\text{CO}_2]$ diferentes, determinado a 380 ou 700 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$ (r, s).

Na Tabela 2 verificam-se diferenças no funcionamento do aparato fotossintético entre os genótipos estudados, pois no clone 153 e IPR 108 a V_{cmax} e a J_{max} foram insensíveis ao enriquecimento de CO_2 , enquanto que no Icatu estes parâmetros aumentaram 52% e 37%, respectivamente, em relação às plantas crescidas em $[CO_2]$ normal (Tabela 2).

Tabela 2. Taxa de carboxilação máxima (V_{cmax}), taxa de carboxilação máxima limitada por transporte de elétrons (J_{max}), taxa de respiração na presença de luz (R_d), taxa de utilização da triose-fosfato – TPU (todos calculados a partir das curvas de P_n/C_i e expressa em $\mu L CO_2 L^{-1} m^{-2} s^{-1}$) e razão J_{max}/V_{cmax} , em folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivada em 380 ou 700 $\mu L CO_2 L^{-1}$

Genótipos	CL 153		Icatu		IPR 108		
	$[CO_2]$	380 $\mu L L^{-1}$	700 $\mu L L^{-1}$	380 $\mu L L^{-1}$	700 $\mu L L^{-1}$	380 $\mu L L^{-1}$	700 $\mu L L^{-1}$
V_{cmax}		50,2 aA	48,5 aA	34,8 bB	53,0 aA	43,7 aA	51,8 aA
J_{max}		58,6 aA	62,0 aA	45,1 bB	62,0 aA	52,7 abA	53,4 aA
R_d		2,11 aA	2,38 aA	1,74 aA	3,68 aA	1,80 aA	3,14 aA
TPU		3,19 aA	3,51 aA	2,91 aA	3,68 aA	3,26 aA	3,41 aA
J_{max}/V_{cmax}		1,25 aA	1,25 aA	1,31 aA	1,25 aA	1,22 aA	1,12 aA

Valores médios seguidos da mesma letra minúscula para genótipos e maiúscula para $[CO_2]$ não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O balanço entre a carboxilação da RuBisCo e o transporte de elétrons (V_{cmax}/J_{max}) se manteve inalterada pelo aumento do nível de CO_2 , com média de 1,21 em todos os genótipos, da mesma forma, TPU, R_d e A_{max} também não responderam ao aumento do CO_2 (Tabela 2 e Figura 10), embora A_{max} tendesse a aumentar no clone 153 (18%) e no Icatu (25%).

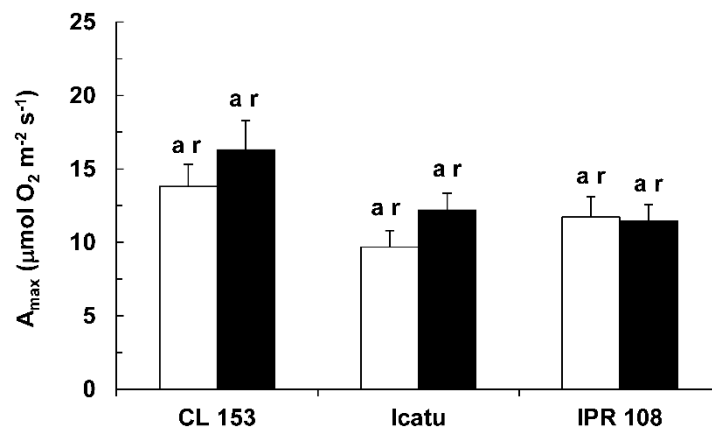


Figura 10. Capacidade fotossintética - A_{\max} ($\mu\text{mol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) nas folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivadas em 380 (barra branca) e 700 (barra preta) $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$. Valores médios seguidos por diferentes letras, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, expressam diferenças significativas entre as cultivares para o mesmo tratamento de $[\text{CO}_2]$ (a, b) ou entre os tratamentos com $[\text{CO}_2]$ na mesma cultivar (r, s).

Parâmetros de fluorescência da clorofila

Não foi possível observar mudanças pontuais na eficiência fotoquímica máxima do FSII (F_v/F_m) nos genótipos crescidos em elevada $[\text{CO}_2]$, apenas uma redução de 3% em Icatu (Tabela 3). Os valores encontrados de F_v/F_m são próximos aos esperados em condições de sombra (0,78), onde há uma maior contribuição do FSI em relação a fluorescência inicial (F_0) (Baker e Oxborough, 2004). Considerando apenas os níveis de CO_2 , não foram encontradas mudanças significativas em condições do estado estacionário da fotossíntese, tanto para q_p e F_v'/F_m' (Tabela 3).

Tabela 3. Eficiência fotoquímica máxima do FSII (F_v/F_m), eficiência de captura de energia de excitação pelos centros de reação abertos do FSII (F_v'/F_m') e coeficiente de extinção fotoquímica (q_p) em folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivadas em 380 ou 700 $\mu\text{L CO}_2 \text{L}^{-1}$

Genótipos	CL 153		Icatu		IPR 108	
	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$
F_v/F_m	0,776 aA	0,760 aA	0,754 bA	0,732 bB	0,758 bA	0,748 abA
q_p	0,682 aA	0,558 aA	0,659 aA	0,572 aA	0,590 aA	0,621 aA
F_v'/F_m'	0,575 aA	0,577 abA	0,589 aA	0,664 aA	0,531 aA	0,542 bA

Valores médios seguidos da mesma letra minúscula para genótipos e maiúscula para $[\text{CO}_2]$ não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Taxas de transporte de elétrons nos tilacóides

As taxas de transporte de elétrons nos tilacóides que envolvam ambos fotossistemas dos genótipos de cafés estudados foram alteradas com o aumento da contração de CO_2 , embora de forma diferente entre os genótipos (Figura 11). Aumentos no transporte de elétrons do FSII, incluindo o complexo de evolução do oxigênio (PSII + CEO) sob alta $[\text{CO}_2]$ variaram de 10% (em genótipos *C. arabica*, sendo não significativa em IPR 108) a 30% no clone 153. A atividade do FSII (PSII-CEO) também apresentou aumentos significativos, variando de 12% no IPR 108 a 25% no clone 153 (Figura 11). A atividade do FSI seguiu um padrão próximo ao encontrado para FSII, com melhorias significativas de 20% no clone 153 e 9% no Icatu, o genótipo IPR 108 mostrou aumento de 6% na atividade FSI, entretanto, sem significância estatística (Figura 11).

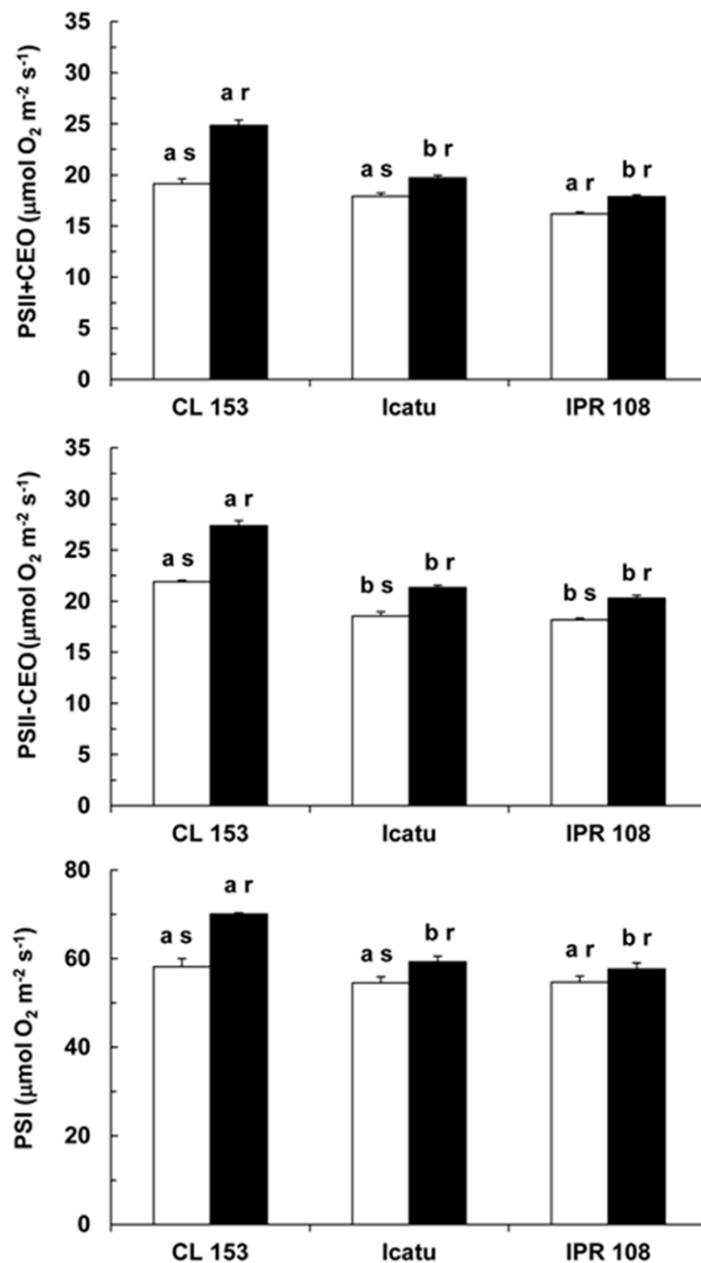


Figura 11. Valores da taxa de transporte de elétrons no tilacoide associados ao FSII (com e sem a participação do complexo de evolução de oxigênio) e FSI, em folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivadas em 380 (barra branca) e 700 (barra preta) μL CO₂ L⁻¹. Valores médios, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, seguidos por diferentes letras expressam diferenças significativas entre as cultivares para o mesmo tratamento de [CO₂] (a, b) ou entre os tratamentos com [CO₂] na mesma cultivar (r, s).

Atividade das enzimas do ciclo de calvin e do metabolismo respiratório

As atividades enzimáticas foram claramente afetadas pelo aumento da $[CO_2]$ em todos os genótipos (Figura 12). A atividade da fotossíntese relativa às enzimas RuBisCO e Ru5PK foram semelhantes entre os genótipos quando cultivados em $380 \mu L CO_2 L^{-1}$, aumentando significativamente com a elevação para $700 \mu L CO_2 L^{-1}$, de 37% (IPR 108) a 46% (Icatu) para RuBisCO e de 35% (Clone 153) a 63% (IPR 108) para Ru5PK (Figura 12). Um padrão similar foi evidenciado em relação às enzimas chave da via-respiratória, MDH e PK (Figura 13), com aumentos variando de 20% (Clone 153) a 75% (Icatu) para MDH, e de 76% (Clone 153) a 86% (Icatu) para PK.

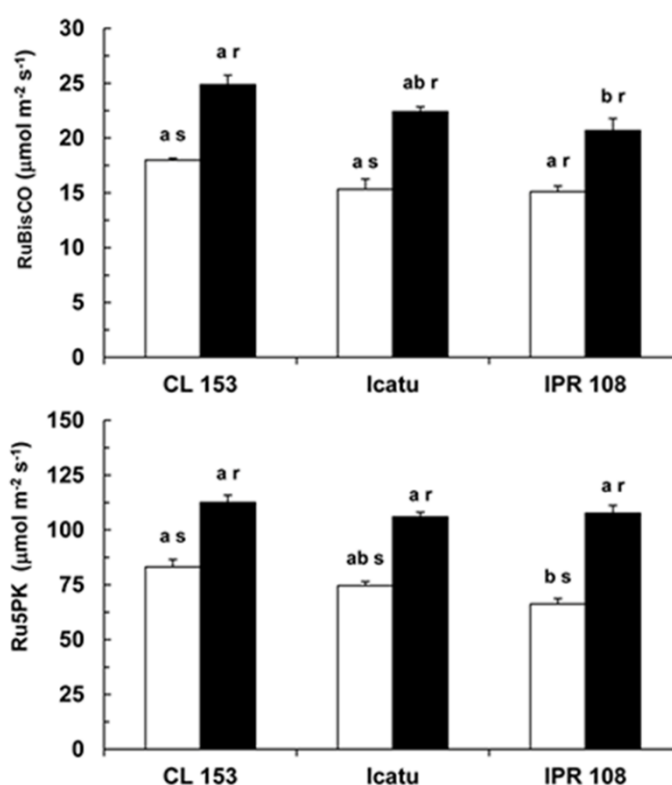


Figura 12. Variação da atividade total da ribulose-1,5-bifosfato-carboxilase/oxigenase (RuBisCo) ribulose-5-fosfato quinase (Ru5PQ) nas folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivadas em 380 (barra branca) e 700 (barra preta) $\mu L CO_2 L^{-1}$. Valores médios, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, seguidos por diferentes letras expressam diferenças significativas entre as cultivares para o mesmo tratamento de $[CO_2]$ (a, b) ou entre os tratamentos com $[CO_2]$ na mesma cultivar (r, s).

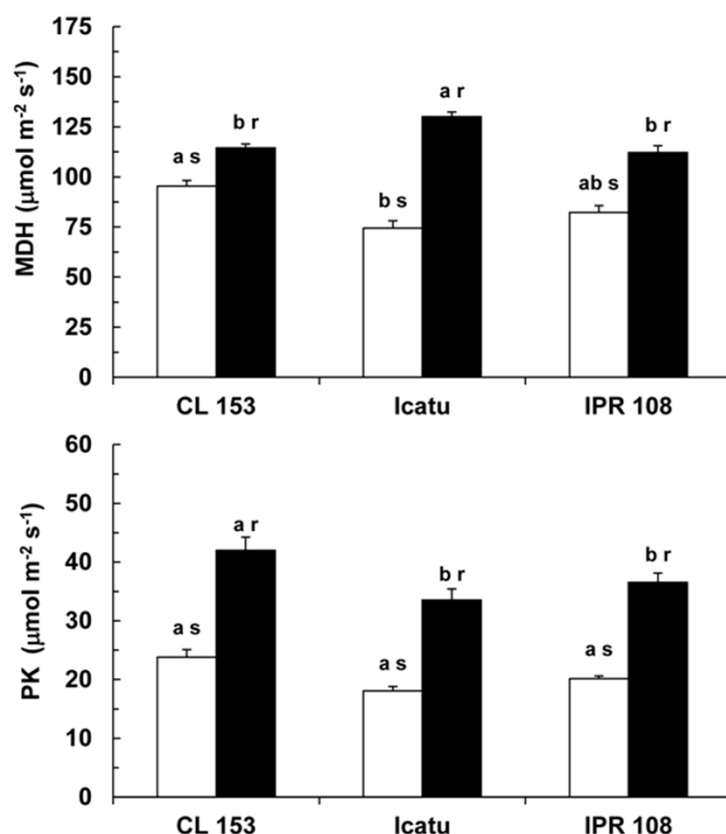


Figura 13. Variação das atividades totais da malato desidrogenase (MDH) e piruvato quinase (PK) em folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivadas sob 380 (barra branca) e 700 (barra preta) μL CO₂ L⁻¹. Valores médios, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, seguidos por diferentes letras expressam diferenças significativas entre as cultivares para o mesmo tratamento de [CO₂] (a, b) ou entre os tratamentos com [CO₂] na mesma cultivar (r, s).

Carboidratos não-estruturais

No geral, observa-se que vários açúcares solúveis apresentaram variações diferentes nas plantas cultivadas em [CO₂] elevada (Tabela 4). Como se pode notar, a sacarose, o açúcar mais abundante, aumentou 20% em IPR 108, ao passo que manteve suas concentrações em clone 153 e Icatu. A glicose não se alterou significativamente em clone 153 e Icatu mas diminuiu 42% em IPR 108, enquanto que a frutose foi mantida em Icatu e diminuiu nos outros dois genótipos. A rafinose não se alterou e arabinose diminuiu (32%) apenas no clone 153, em resposta ao aumento da [CO₂]. As reduções significativas sob [CO₂] elevada foram encontrados na trealose (entre 78 e 92%), estaquiase (63-88%), galactose (58-89%) e manitol (51-77%), por este conjunto de mudanças houve uma diminuição do teor de açúcares solúveis totais em todos os genótipos, entre 15% (Icatu) a 33% (CL 153).

Tabela 4. Valores médios de carboidratos não-estruturais (açúcares solúveis e amido) em folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivadas em 380 ou 700 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$

Genótipos	CL 153		Icatu		IPR 108	
	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$
[CO ₂]						
Estaquiose ¹	1,35 bA	0,28 abB	1,11 cA	0,41 aB	1,60 aA	0,20 bA
Rafinose ¹	3,54 cA	3,65 bA	4,06 bA	3,62 bA	4,98 aA	5,11 aA
Trealose ¹	8,12 abA	1,09 abB	7,61 bA	1,69 aB	8,64 aA	0,73 bB
Sacarose ¹	38,76 bA	37,67 bA	44,12 aA	41,52 aA	32,12 cB	38,70 abA
Glicose ¹	4,69 cA	5,23 cA	16,87 bA	16,92 aA	25,53 aA	14,80 aB
Frutose ¹	23,31 bcA	11,47 bB	21,57 cA	19,91 aA	26,93 aA	17,60 aB
Galactose ¹	0,47 bA	0,05 bB	0,38 cA	0,16 aB	0,72 aA	0,12 aB
Arabinose ¹	4,74 aA	3,19 aB	4,38 abA	3,88 aA	3,76 bA	3,13 aA
Manitol ¹	11,23 aA	2,58 bB	9,67 bA	4,73 aB	10,70 abA	2,59 bB
Solúveis totais ¹	96,20 bA	64,86 cB	109,77 aA	92,83 aB	114,99 aA	82,98 bB
Amido ²	33,16 bB	56,32 aA	54,68 aA	49,21 aA	25,09 bA	21,44 bA
ST/AM ^{*3}	2,90	1,15	2,01	1,89	4,58	3,87
Açúcares totais ^{*1}	129,36	121,18	164,45	142,04	140,08	104,42

*Valores obtidos com valores médios de cada componente açúcar. ¹ST: mg g⁻¹ em massa seca; ²AM: mg g⁻¹ em massa seca – equivalente glicose; ³ST/AM: g g⁻¹. Valores médios seguidos da mesma letra minúscula para genótipos e maiúscula para [CO₂] não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A variação no conteúdo de amido em relação aos níveis de CO₂ foram dependentes das espécies, mostrando um aumento de 69% no clone 153, enquanto houve uma diminuição de 10 e 15% em Icatu e IPR 108, respectivamente (Tabela 4), desta forma pode-se observar que no geral os carboidratos não-estruturais (NSC) mostraram uma tendência para diminuir, em particular no IPR 108 e Icatu.

Pigmentos fotossintéticos

Não foram encontradas diferenças estatísticas significativas para o conteúdo total de clorofilas, de carotenóides totais e suas relações dentro dos tratamentos estudados (genótipos e níveis de CO₂) (Figura 14).

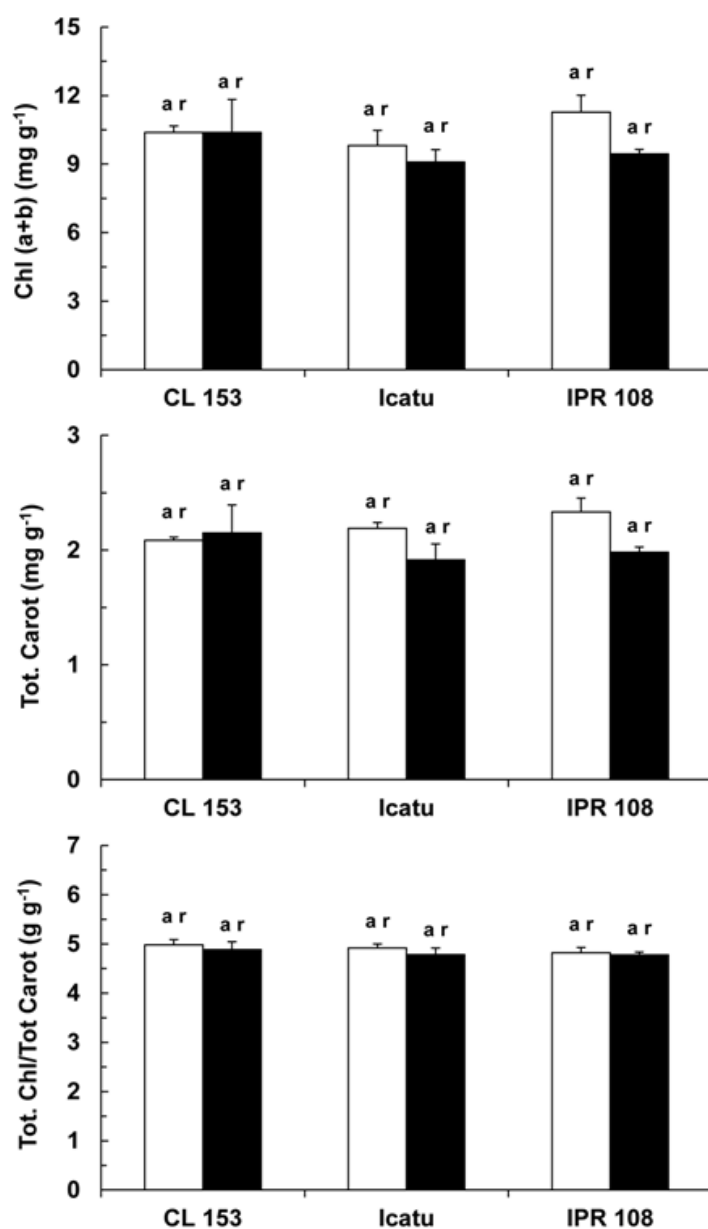


Figura 14. Variações no teor de clorofila total ($Cl\ a + b$), de carotenóides totais, e sua relação ($Cl\ a + b$ /carotenóides) em folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivada em 380 (barra branca) e 700 (barra preta) $\mu\text{L CO}_2\ \text{L}^{-1}$. Valores médios, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, seguidos por diferentes letras expressam diferenças significativas entre as cultivares para o mesmo tratamento de $[\text{CO}_2]$ (a, b) ou entre os tratamentos com $[\text{CO}_2]$ na mesma cultivar (r, s).

Quantificação da permeabilidade e dos lipídios da membrana cloroplástica

A permeabilidade da membrana do cloroplasto dos genótipos não foi alterada quando submetidos a [CO₂] elevada (Figura 15), em contraste, a fração dos lipídios apresentou significativas reduções de conteúdo em AGT para o CL 153 e Icatu (Figura 16). Isto foi acompanhado por uma diminuição do nível de insaturação (baixos valores de IMC) em CL 153, embora não tenha sido encontrada uma tendência oposta para Icatu e IPR 108.

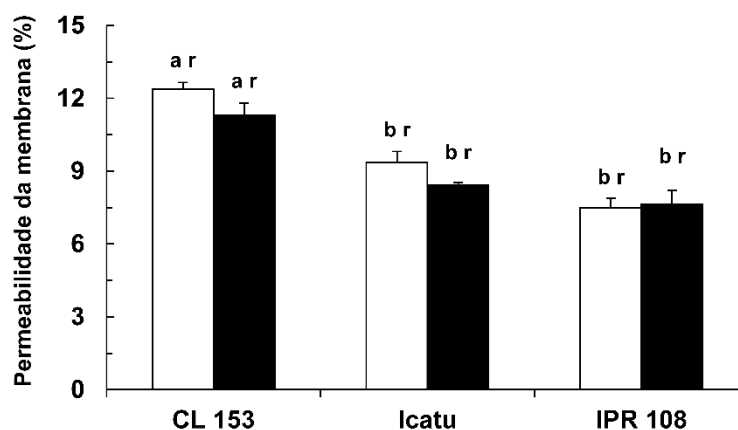


Figura 15. Permeabilidade da membrana de folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivadas em 380 (barra branca) e 700 (barra preta) μL CO₂ L⁻¹. Valores médios, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, seguidos por diferentes letras expressam diferenças significativas entre as cultivares para o mesmo tratamento de [CO₂] (a, b) ou entre os tratamentos com [CO₂] na mesma cultivar (r, s).

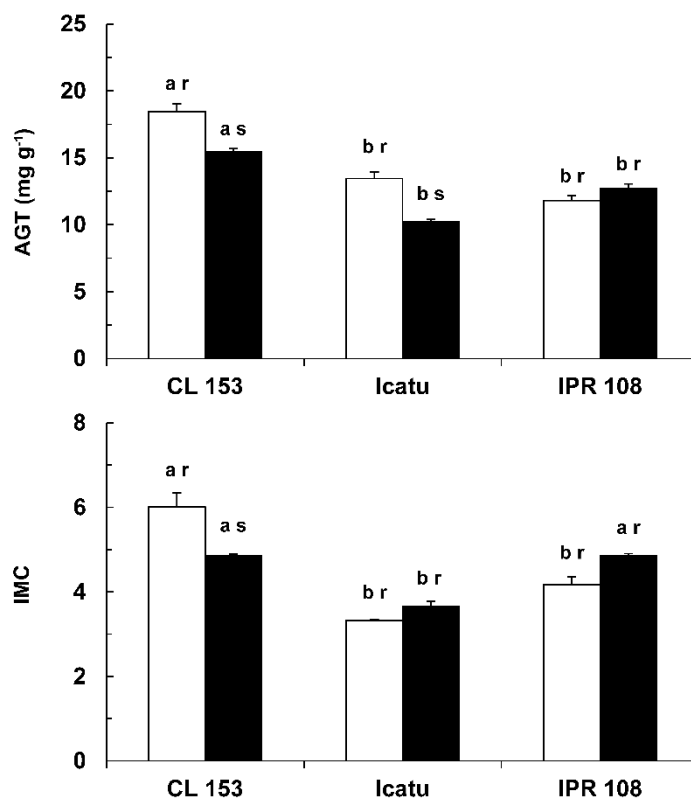


Figura 16. Valores médios de ácidos graxos totais (AGT) e nível de conteúdo e insaturação de membranas de cloroplastos (IMC) de folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivadas sob 380 (barra branca) e 700 (barra preta) $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$. Valores médios, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, seguidos por diferentes letras expressam diferenças significativas entre as cultivares para o mesmo tratamento de $[\text{CO}_2]$ (a, b) ou entre os tratamentos com $[\text{CO}_2]$ na mesma cultivar (r, s).

Estas alterações na insaturação das membranas em clone 153 resultaram de alterações no peso individual dos ácidos gordos (Tabela 5), e também pelo fato dos dois mais importantes (C16: 0 e C18:3) terem seguido tendências opostas, sendo que o último diminuiu significativamente em alta $[\text{CO}_2]$. Nos genótipos de *C. arabica* o peso dos ácidos gordos individuais permaneceu praticamente inalterados, embora pequenas alterações ocorressem em C16:0 e C18:3, resultando em pequenas elevações da IMC. Além disso, em genótipos de *C. arabica* o C16:1 c+t tendeu a aumentar, embora de forma significativa apenas no IPR 108.

Tabela 5. Valores médios de proporções de ácidos graxos individuais de tilacóides de folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivada em 380 ou 700 $\mu\text{LCO}_2\text{L}^{-1}$

Genótipos [CO ₂]	CL 153		Icatu		IPR 108	
	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$
< C16:0	2,54 bB	5,62 bA	4,57 aB	7,56 aA	5,33 aA	4,80 cA
C16:0	21,9 cA	24,6 aA	32,3 aA	27,8 aB	26,8 bA	24,8 aA
C16:1c + t	3,26 aA	2,10 bA	2,31 aA	4,07 aA	1,69 bB	4,43 aA
C18:0	7,42 aA	5,86 aA	7,88 aA	7,18 aA	7,53 aA	6,80 aA
C18:1c + t	1,71 bA	2,13 aA	2,30 aA	1,95 aA	2,26 aA	1,59 bB
C18:2	11,1 bB	14,1 aA	14,2 aA	12,8 aA	13,7 aA	13,5 aA
C18:3	52,1 aA	45,6 aB	36,4 cA	38,6 bA	42,7 bA	44,1 aA

Valores médios seguidos da mesma letra minúscula para genótipos e maiúscula para [CO₂] não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

DISCUSSÃO

Elevadas concentrações de CO₂ a longo prazo não provocou baixa regulação da condutância estomática e fotossíntese

Pode-se afirmar que o tamanho e a densidade dos estômatos são os principais determinantes da máxima g_s (Woodward e Kelly, 1995; Franks e Beerling, 2009), desta forma, os resultados apresentam que o comportamento destas variáveis, ou seja, a não modificação da anatomia foliar em ambos os genótipos, provavelmente contribuiu para a g_s imutável em resposta ao enriquecimento da [CO₂] (Tabela 1), invalidando a hipótese que possivelmente a modificação da anatomia foliar será um componente de adaptação a longo prazo em espécies de *Coffea* spp. como pode ser evidenciado quando submetidas, por exemplo, ao sombreamento (Ricci et al., 2006; Braun et al., 2007; DaMatta et al., 2007).

Estes resultados (Tabela 1) são semelhantes ao relatado em estudos de espécies lenhosas que apresentaram respostas invariantes de g_s quando submetidas à elevada [CO₂] (Field et al., 1995; Ainsworth e Rogers, 2007; Montinho-Pereira et al., 2009). Entretanto, tem sido sistemático o relato de diminuição da g_s quando as plantas são cultivadas em elevadas [CO₂] (Woodward, 2002; Possel e Hewitt, 2009; Zhu et al., 2012), apesar destas reduções ocorrerem em menor grau, principalmente em árvores e plantas herbáceas (Ainsworth e Rogers, 2007).

No estudo da avaliação dos genótipos a elevada $[\text{CO}_2]$ em longo prazo, não foi observado nenhum sinal aparente de regulação negativa da fotossíntese, em vez disso, alguns componentes da maquinaria fotossintética apresentaram regulação positiva em alta $[\text{CO}_2]$, sendo que os resultados do presente trabalho apresentam evidências convincentes que apóiam esta afirmação (Figura 9; Figura 10; Tabela 2).

Esta regulação positiva da fotossíntese pode ser explicada pelo aumento significativo de P_n , em todas as espécies, sob elevada $[\text{CO}_2]$ (Figura 9). A elevação da fotossíntese está relacionada, além de uma maior taxa de carboxilação ligado ao aumento de CO_2 como substrato, mas também pode ser justificado pela inibição competitiva da reação de oxigenação da RuBisCO o que conseqüentemente implica em uma redução da perda de CO_2 e dos custos de energia associados com a via fotorrespiratória (Long et al., 2004; Ainsworth e Rogers, 2007).

Pode-se notar também, na Figura 9, que o aumento da P_n foi independente da $[\text{CO}_2]$ em que as plantas foram submetidas, uma vez que não existem diferenças significativas entre as plantas crescidas a $[\text{CO}_2]$ normal ou elevada, quando as medições foram realizadas a 380 ou 700 μL de $\text{CO}_2 \text{ L}^{-1}$, o que leva a acreditar que o estímulo da fotossíntese líquida (P_n) é semelhante ao estímulo potencial obtido pela resposta modelada de P_n/C_i na atual $[\text{CO}_2]$.

Pode-se verificar que a capacidade fotossintética máxima (A_{max}) foi semelhante, não diferindo entre genótipos e entre os níveis de $[\text{CO}_2]$ estudados (Figura 10), o que indica não existir uma maior amplitude para elevação das taxas de fotossíntese em plantas submetidas à elevada $[\text{CO}_2]$, indicando que apesar da P_n ser elevada em 700 μL de $\text{CO}_2 \text{ L}^{-1}$ (C_i), a A_{max} é insensível as elevações de CO_2 . Observa-se também, que não houve aclimação dos principais parâmetros fotossintéticos (V_{cmax} e J_{max}) (Tabela 2), resultado que contrasta com o que tem sido demonstrado em alguns estudos (Drake et al., 1997; Ainsworth e Rogers, 2007).

Na verdade, é sabido que as alterações na fotossíntese estão ligadas a capacidade de carboxilação da RuBisCo em consumir RuBP em condição de C_i reduzido (porque o CO_2 é o substrato), a limitação de regeneração da RuBP em condição de maior $[\text{CO}_2]$, e a capacidade do tilacoide em fornecer ATP e NADPH (Ainsworth e Rogers, 2007; Kirschbaum, 2011), tem-se também como limitações a capacidade de síntese e utilização de sacarose e de amido, a utilização da triose-fosfato e, subseqüentemente, a regeneração do P_i (Sage, 1994).

Independentemente dessas premissas, são encontradas reduções pontuais (6%) na V_{cmax} , principalmente em espécies florestais, sob alta $[\text{CO}_2]$ (Ainsworth e Rogers, 2007), enquanto que a redução da J_{max} é encontrada em menor freqüência (Long et al., 2004). Esta ausência de aclimação em J_{max} e V_{cmax} (Bader et al., 2010) ou a regulação positiva em condições de

elevada [CO₂] pode ocorrer pelo fato de haver uma mudança do investimento de recursos da RuBisCo para os processos de suporte a RuBP e regeneração de P_i.

A taxa de utilização da triose-fosfato (TPU), o que pode tornar-se limitada sob alta [CO₂] até mesmo em plantas (e.g. espécies florestais) que apresentam regulação negativa da fotossíntese (Bader et al., 2010), manteve-se inalterada. Isto sugere que a P_n não foi limitada pela capacidade de sintetizar e utilizar amido e sacarose, pela utilização da triose-fosfato e pela regeneração do P_i (Sage, 1994).

A taxa de transporte de elétrons nos tilacóides envolvendo o FSII e FSI e as atividades das enzimas fotossintéticas apresentaram, no geral, regulação positiva em resposta a elevada [CO₂] (Figura 11). Outro efeito promovido pelo crescimento em alta [CO₂] é o aumento da eficiência do uso da água instantânea (EUA_i), na maioria dos casos este aumento está relacionado a reduções na *g*, e aumentos da P_n (Ainsworth e Rogers, 2007, Tricker et al., 2006; Leakey et al., 2009), mesmo quando ocorre uma regulação negativa da fotossíntese parcial (Woodward, 2002). Neste estudo, o aumento da EUA_i foi promovido principalmente pela elevação da P_n (Figura 9), como também encontrado em videira (Montinho-Pereira et al., 2009) e em espécies florestais (Bader et al., 2010).

Assim, tomadas todas as informações em conjunto (Figura 9; Figura 10; Tabela 1; Tabela 2), é concebível propor que, caso não exista limitação radicular (Arp, 1991; Ronchi et al., 2006), como neste ensaio, o cafeeiro apresenta capacidade para sustentar altas taxas fotossintéticas quando submetido a elevada [CO₂], em longo prazo.

Ajuste da maquinaria metabólica em resposta a alta [CO₂]

Em todos os genótipos testados, o efeito mais proeminente do enriquecimento da [CO₂] reside na regulação positiva das atividades das enzimas-chave do metabolismo do carbono, nomeadamente a Ru5PK (enzima-chave da via de regeneração da RuBP), a RuBisCO (Figura 12), a MDH e a PK (Figura 13), sugerindo um reforço das capacidades potencial bioquímico da fotossíntese e da respiração, nestas condições.

Este reforço pode evitar a regulação negativa da fotossíntese, por estar associado à redução da alocação de N, o que eleva a regeneração RuBP e de proteínas associadas com o transporte de elétrons (Bader et al., 2010). No entanto, o aumento total da atividade da RuBisCo não corresponde ao comportamento de V_{cmax}, com destaque para o clone 153, o que pode ser explicado, por exemplo, pela redução da atividade da RuBisCo. Assim, o aumento da atividade de MDH e PK também não foram acompanhadas pelo aumento das taxas de respiração (R_d),

que se manteve inalterada em resposta à alta [CO₂] (Figura 10). Na verdade, dependendo da espécie, o declínio ou a constante taxa de respiração têm sido comumente observados sob alta [CO₂] (Drake et al., 1997; Woodward, 2002; Crous et al., 2012).

Ressalta-se que para haver aumento da P_n sob alta [CO₂], obviamente, haverá a necessidade de aumento de energia, o que é suplantado pelos resultados de aumento da capacidade de transporte de elétrons (Figura 11). Estes aumentos paralelos podem estar associados com a manutenção de um equilíbrio funcional entre carboxilação e o transporte de elétrons ($J_{\max}/V_{c\max}$), que parece ser uma característica imutável nos genótipos de café independentemente do crescimento em elavada [CO₂] (Tabela 2).

Resultados semelhantes foram relatados em espécies de acácia (Possell e Hewitt, 2009; Evans et al., 2000), e também em outras espécies de plantas, onde a relação imutável de $J_{\max}/V_{c\max}$ pode ser interpretada como um reflexo da ausência de redistribuição de recursos entre os componentes fotossintéticos (Akita et al., 2012).

Além disso, o reforço dos componentes fotossintéticos sob alta [CO₂] também pode ser relacionado com mudanças na eficiência fotoquímica, através da fluorescência da clorofila *a*, ressaltando também que o F_v/F_m , F_v'/F_m' e q_p (Tabela 3) foram mantidos, como também encontrado em videira (Montinho-Pereira et al., 2009). Notadamente, esses resultados concordam com a ausência de mudanças perceptíveis nos estoques (*pools*) de clorofila total e de carotenóides (Figura 14), como também relatado em espécies florestais (Long et al., 2004; Bader et al., 2010).

Em conjunto, esses dados indicam um padrão de um maior investimento em componentes-chave do sistema de fotossíntese e das vias respiratórias das plantas de café em alta [CO₂].

Acúmulo de carboidratos não-estruturais

Observa-se, nos genótipos de cafeeiro estudados, que vários açúcares solúveis apresentaram reduções significativas em condições de elevada [CO₂], com especial relevância para a trealose, estaquiose, galactose e manitol, enquanto que os conteúdos de frutose e glicose não apresentaram modificações, resultando em uma redução dos açúcares solúveis totais e do conteúdo de carboidratos não-estruturais (Tabela 4).

Esta ausência de acúmulo de açúcar nas folhas contribuiu para evitar uma regulação negativa da fotossíntese (Figura 9, Tabela 2), além de estar em acordo com a ausência de efeitos negativos sobre as enzimas fotossintéticas estudadas (Figura 12). Nestas condições, a ausência

de acúmulo de carboidratos não-estruturais também foi encontrada em folhas jovens de girassol (Sims et al., 1999), bem como em *Populus nigra*, que demonstrou capacidade de exportar acima de 90% do seu fotossintato durante o dia, além da elevada capacidade de armazenamento temporário em forma de amido (Davey et al., 2006).

Neste ensaio, o fato dos genótipos não terem acumulado carboidratos não-estruturais está relacionado ao elevado desenvolvimento vegetativo (produção de folhas e ramos plagiotrópicos) e reprodutivo (produção de flores e frutos) que os mesmos aprestaram durante o período de estudo. Assim, para manter a contínua e elevada produção de estruturas vegetativas e reprodutivas foi necessário um maior consumo de fotossintatos, o que implicou na manutenção da estabilidade da relação fonte-dreno, mesmo existindo um aumento potencial da capacidade fotossintética dos genótipos de cafeeiro, cultivados em elevada [CO₂].

Esta manutenção da estabilidade da relação fonte-dreno face ao aumento ou estímulo da capacidade fotossintética sob enriquecimento de CO₂ tem sido observado em outras espécies como *Vernonia herbacea* (Oliveira et al, 2010), *Pinus taeda* (LaDeau e Clark, 2001), *Citrus aurantium* (Idso e Kimball, 1997) e *Vitis vinifera* (Montinho-Pereira et al., 2009), com implicações positivas de rendimento.

O acúmulo de carboidratos não-estruturais em folhas de plantas, principalmente em espécies perenes e em florestais, encontra-se amplamente citado como umas das principais implicações do aumento da [CO₂] (Ainsworth e Rogers, 2007), este fato foi suposto que seria também umas das implicações no cafeeiro, até pelo fato de acreditar que o gênero *Coffea* apresenta baixa tolerância aos estresses ambientais, como o déficit hídrico (Martins et al., 2007; Busato et al., 2007) e térmico (Ramalho et al., 2012).

Preservação da permeabilidade da membrana celular e alterações nos lípidos do cloroplasto

A elevação da [CO₂] não implicou na alteração da permeabilidade da membrana celular (Figura 15), entretanto pôde-se observar uma redução da matriz lipídica das membranas dos cloroplastos em relação ao teor total de ácidos graxos em clone 153 e Icatu, quando comparados com a testemunha em [CO₂] normal (Figura 16).

Além disso, as variações nos conteúdos de C16:0 e C18:3, conduziram a um declínio na insaturação da membrana lipídica (Tabela 5), em clone 153; entretanto, tendências opostas foram encontradas nos genótipos *C. arabica*, o que pode levar a possíveis modificações na fluidez da membrana (Partelli et al., 2011). Nota-se, que os valores de C16:1 *c+t* tendem a

umentar em genótipos de *C. arabica*, tornando-se um pouco mais elevados do que no clone 153. O ácido graxo C16:1 *t* é um importante e específico fosfoglicérido dos tilacoides (Öquist, 1982; Siegenthaler e Trémolières, 1998; Partelli et al., 2011), pelo fato de contribuir para a organização das proteínas e pigmentos na membrana dos tilacoides, com destaque para a conformação ideal da proteína D1, além da estabilidade dos complexos dos fotossistemas, permitindo a eficiência do fluxo de elétrons (Siegenthaler e Trémolières, 1998; Yang et al., 2005).

Apesar de existir algumas diferenças entre os genótipos cultivados em elevada [CO₂], pontualmente sobre o grau de insaturação dos lipídios e no conteúdo de alguns ácidos graxos das membranas dos cloroplastos, no geral não se pode caracterizá-los como um impacto expressivo.

Respostas dos genótipos de cafeeiro a elevada [CO₂]

Na comparação entre as espécies em resposta ao aumento da [CO₂] pode-se verificar que existiu algumas diferenças, podendo destacar no cultivar IPR 108 pequenas modificações na maioria dos parâmetros estudados; em relação à Icatu pode-se destacar os aumentos significativos da V_{cmax} e da J_{max} .

O maior número de modificações a elevação da [CO₂] foi apresentado pelo clone 153 (cafeeiro conilon) obtendo maior estabilidade para os valores da V_{cmax} e da J_{max} (Tabela 2), além de uma maior capacidade de transporte de elétrons na membrana do tilacoide (Figura 11) e aumento de amido nas folhas (Tabela 4), acompanhado por uma redução na insaturação de lipídios na membrana do cloroplasto (Tabela 5 e Figura 16).

Apesar do exposto acima, não foram encontradas respostas significativas que possibilite evidenciar diferença de comportamento entre as espécies quando submetida a elevada [CO₂], em longo período. No geral, com base nos resultados pode-se afirmar que os três genótipos estudados apresentam tendências de comportamento semelhantes para a maioria das variáveis analisadas.

Assim, os resultados sugerem que o cafeeiro apresenta capacidade de suportar o aumento da [CO₂] atmosférico, em condições ideais (água, temperatura e disponibilidade de nutrientes), entretanto deve-se ressaltar a necessidade de estudos para avaliar a sua resposta a um cenário amplo de mudanças climáticas, incluindo alteração da disponibilidade de água e altas temperaturas.

Outro fator de essencial necessidade para o avanço científico no âmbito que insere este ensaio é a utilização de novas espécies de cafeeiro, principalmente de *C. canephora*; utilizando genótipos melhorados e também genótipos contrastantes para alguns aspectos de interesse (e.g. tolerância a agentes bióticos; qualidade de bebida; produtividade).

CONCLUSÕES

Neste estudo, não foi observado regulação negativa (down-regulation) para a P_n e o g_s das espécies de *Coffea* spp. submetidas a elevada $[CO_2]$ por um longo período. Os valores médios do tamanho e da densidade dos estômatos apresentaram relação inversa (aumento e diminuição), entretanto a g_s foi semelhante nas espécies de *Coffea* spp. submetidas a elevada $[CO_2]$ por um longo período. Não foram verificados impactos negativos nos valores da P_n , da J_{max} e da V_{cmax} , provavelmente pela ausência de acúmulo de carboidratos não-estruturais nas espécies de *Coffea* spp. submetidas a elevada $[CO_2]$ por um longo período.

Verifica-se aumento da RuBisCo, Ru5PK, MDH e da atividade PK nas espécies de *Coffea* spp. submetidas a elevada $[CO_2]$, contribuindo para elevação do V_{cmax} (Icatu, IPR 108), J_{max} (Icatu) e uma tendência de aumento do A_{max} , embora sem impacto na seletividade da membrana, nos pigmentos fotossintéticos, no fluxo de energia dirigida para eventos fotoquímicos (q_p) e na eficiência de funcionamento do FSII (F_v/F_m , F_v / F_m').

Foram encontradas alterações pontuais no grau de insaturação dos tilacóides das espécies de *Coffea* spp. submetidas a elevada $[CO_2]$, devido a alterações nos ácidos graxos mais representativos (C16:0 e C18:3), entretanto não foi possível determinar uma relação significativa destes com o funcionamento do aparato fotossintético. Há evidências de existir diferenças pontuais em alguns parâmetros, porém não é possível evidenciar respostas diferenciadas das espécies estudadas de *Coffea* spp. em relação a elevação $[CO_2]$ por um longo período.

REFERÊNCIAS

AINSWORTH, E.A.; LONG, S.P. What have we learned from 15 years of free-air CO_2 enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO_2 . **New Phytologist**, v. 165, p. 351-372, 2005.

AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. **Plant, Cell & Environment**, v. 30, p. 258-270, 2007.

AKITA, R.; KAMIYAMA, C.; HIKOSAKA, K. *Polygonum Sachalinense* alters the balance between capacities of regeneration and carboxylation of ribulose-1,5-bisphosphate in response to growth CO₂ increment but not the nitrogen allocation within the photosynthetic apparatus. **Physiologia Plantarum**, v. 146, p. 404-412, 2012.

ALLEN, C.F.; GOOD, P.; DAVIS, H.F.; CRISUM, P.; FOWLER, S.D. Methodology for the separation of plant lipids and application in spinach leaf and chloroplast lamellae. **Journal of the American Oil Chemists Society**, v. 43, p. 223-231, 1966.

ARAÚJO, W.L.; DIAS, P.C.; MORAES, G.A.B.K.; CELIN, E.F.; CUNHA, R.L. Limitations to photosynthesis in coffee leaves from different canopy positions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 46, p. 884-890, 2008.

ARP, W.J. Effects of source-sink relations on photosynthetic acclimation to elevated CO₂. **Plant, Cell & Environment**, v.14, p.869-875, 1991.

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO, JR.J.; ÁVILA, A.M.H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 1057-1064, 2004.

BADER, M.K.F.; SIEGWOLF, R.; KÖRNER, C. Sustained enhancement of photosynthesis in mature deciduous forest trees after 8 years of free air CO₂ enrichment. **Planta**, v. 232, p. 1115-1125, 2010.

BAKER, N.R.; OXBOROUGH, K. **Chlorophyll fluorescence as a probe of photosynthetic productivity**. In: PAPAGEORGIOU, G.C.; GOVINDJEE (eds.) Chlorophyll a fluorescence: A signature of photosynthesis. The Netherlands: Springer, 2004. pp. 65-82.

BATISTA, K.D.; ARAÚJO, W.L.; ANTUNES, W.C.; CAVATTE, P.C.; MORAES, C.A. Photosynthetic limitations in coffee plants are chiefly governed by diffusive factors. **Trees**, v. 26, p. 459-468, 2012.

BATISTA-SANTOS, P.; LIDON, F.C.; FORTUNATO, A.; LEITÃO, A.E.; LOPES, E.; PARTELLI, F.; RIBEIRO, A.I.; RAMALHO, J.C. The impact of cold on photosynthesis in genotypes of *Coffea* spp. - Photosystem sensitivity, photoprotective mechanisms and gene expression. **Journal of Plant Physiology**, v. 168, p. 792-806, 2011.

BERNACCHI, C.J.; PORTIS, A.R.; NAKANO, H.; VON CAEMMERER, S.; LONG S.P. Temperature Response of Mesophyll Conductance. Implications for the Determination of RuBisCO Enzyme Kinetics and for Limitations to Photosynthesis *in Vivo*. **Plant Physiology**, v. 130, p. 1992-1998, 2002.

BRAUN, H.; ZONTA, J.H.; LIMA, J.S.S.; REIS, E.F. Produção de mudas de café conilon propagadas vegetativamente em diferentes níveis de sombreamento. **Idesia**, v. 25, n. 3, p. 85-89, 2007.

BUSATO, C.; REIS, E.F.; MARTINS, C.C.; PEZZOPANE, J.E.M. Lâminas de irrigação aplicadas ao café conilon na fase inicial de desenvolvimento. **Revista Ceres**, v. 54, p. 351-357, 2007.

CAMPOS, P.S.; QUANTIN, V.; RAMALHO, J.C.; NUNES, M.A. Electrolyte leakage and lipid degradation account for cold sensitivity in leaves of *Coffea* sp. Plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 160, p. 283-292, 2003.

CARVALHO, G.R.; GUERREIRO FILHO, O.; PEREIRA, A.A.; ALMEIDA, S.R.; MATIELO, J.B.; BARTOLO, G.F.; SERA, T.; MOURA, W.M.; MENDES, A.N.G.; REZENDE, J.C.; FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, M.A.G.; FERRÃO, R.G.; NACIF, A.P.; SILVAROLLA, M.B. **Cultivares de café arábica**. In: CARVALHO, C.H.S. de. (Ed.). **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília-DF: Embrapa Café, 2008. v.1, p.33-55.

CAVATTE, P.C.; OLIVEIRA, A.A.G.; MORAIS, L.E.; MARTINS, S.C.V.; SANGLARD, L.M.V.P. Could shading reduce the negative impacts of drought on coffee? A morphophysiological analysis. **Physiologia Plantarum**, v. 114, p. 111-122, 2012.

CHATTOPADHYAY, S.; ALI, K.A.; DOSS, S.G.; DAS, N.K.; AGGARWAL, R.K. Association of leaf micro-morphological characters with powdery mildew resistance in field-grown mulberry (*Morus* spp.) germplasm. **AoB Plants**, v. 31, p. 102-114, 2011.

CROUS, K.Y.; ZARAGOZA-CASTELLS, J.; ELLSWORTH, D.S.; DUURSMA, R.A.; LÖW, M.; TISSUE, D.T.; ATKIN, O.K. Light inhibition of leaf respiration in field-grown *Eucalyptus saligna* in whole-tree chambers under elevated atmospheric CO₂ and summer drought. **Plant, Cell & Environment**, v. 35, p. 966-981, 2012.

DaMATTA, F.M.; RONCHI, C.P.; SALES, E.F.; ARAÚJO, J.B.S. O café conilon em sistemas agroflorestais. In: FERRÃO, R.G.; FONSECA, A.F.A.; BRAGANÇA, S.M.; FERRÃO, M. A. G.; DeMUNER, L. H. **Café Conilon**. Vitória: Incaper, 2007. p. 375-389.

DAMATTA, F.M.; GRANDIS, A.; ARENQUE, B.C.; BUCKERIDGE, M.S. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. **Food Research International**, v. 43, p.1814–1823, 2010.

DaMATTA, F.M.; RAMALHO, J.D.C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.18, p. 55-81, 2006.

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: UFV, 2002. p.93-135.

DAVEY, P.A.; OLCER, H; ZAKHLENIUK, O.; BERNACCHI, C.J.; CALFAPIETRA, C.; LONG, S.P.; RAINES, C.A. Can fast-growing plantation trees escape biochemical down-regulation of photosynthesis when grown throughout their complete production cycle in the

open air under elevated carbon dioxide? **Plant, Cell & Environment**, v. 29, p. 1235-1244, 2006.

DAVIS, A.P.; GOLE, T.W.; BAENA, S.; MOAT, J. The impact of climate change on indigenous arabica coffee (*Coffea arabica*): Predicting future trends and identifying priorities. **PLoS One**, v. 7, n. 11, e47981, 2012.

DEMMIG-ADAMS, B.; ADAMS, W.W.; BAKER, D.H.; LOGAN, B.A.; BOWLING, D.R.; VERHOEVEN, A.S. Using chlorophyll fluorescence to assess the fraction of absorbed light allocated to thermal dissipation of excess excitation. **Physiologia Plantarum**, v. 98, p. 253-264, 1996.

DIAZ, A.; LACUESTA, M; MUÑOZ-RUEDA, A. Comparative effects of phosphinothricin on nitrate and ammonium assimilation and on anaplerotic CO₂ fixation in N-deprived barley plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 149, p. 9-13, 1996.

DRAKE, B.G.; GONZÁLEZ-MELER, M.A.; LONG, S.P. More efficient plants: A consequence of rising atmospheric CO₂? **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 48, p. 609-639, 1997.

DROPPA, M.; MASOJIDEK, J.; RÓSZA, Z.; WOLAK, A.; HORVÁTH L.; FARKAS I.; HORVÁTH, E. Characteristics of Cu deficiency-induced inhibition of photosynthetic electron transport in spinach chloroplasts. **Biochimica et Biophysica Acta**, v. 891, p. 75-84, 1987.

EVANS, J.R.; SCHORTEMAYER, M.; McFARLANE, N.; ATKIN, O.K. Photosynthetic characteristics of 10 Acacia species grown under ambient and elevated atmospheric CO₂. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 27, p. 13-25, 2000.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, p. 1039-1042, 2011.

FERRIS, R.; TAYLOR, G. Stomatal characteristics of four native herbs following exposure to elevated CO₂. **Annals of Botany**, v. 73, p. 477-486, 1994.

FIELD, C.B.; JACKSON, R.B.; MOONEY, H.A. Stomatal responses to increased CO₂: implications from the plant to the global scale. **Plant, Cell & Environment**, v. 18, p. 1214-1225, 1995.

FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, R.G.; FERRÃO, M.A.G.; VOLPI, P.S.; VERDIN FILHO, A.C.; FAZUOLI, L.C. **Cultivares de café robusta**. In: CARVALHO, C.H.S. (Ed.). Cultivares de café: origem, características e recomendações. Brasília-DF: Embrapa Café, 2008, v.1, p. 255-280.

FORTUNATO, A.; LIDON, F.C.; BATISTA-SANTOS, P.; LEITÃO, A.E.; PAIS, I.P.; RIBEIRO, A.I.; RAMALHO, J.C. Biochemical and molecular characterization of the antioxidative system of *Coffea* sp. under cold conditions in genotypes with contrasting tolerance. **Journal of Plant Physiology**, v. 167, p. 333–342, 2010.

FRANKS, P.J.; BEERLING, D.J. Maximum leaf conductance driven by CO₂ effects on stomatal size and density over geologic time. **PNAS**, v. 106, p. 10343-10347, 2009.

GAY, C.; ESTRADA, F.; CONDE, C.; EAKIN, H.; VILLERS, L. Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. **Climatic Change**, v. 79, p. 259–288, 2006

.

GERARD, V.A.; DRISCOLL, T. A spectrophotometric assay for RuBisCO activity: application to the kelp *Laminaria saccharina* and implications for radiometric assays. **Journal of Phycology**, v. 32, p. 880-884, 1996.

IDSO, S.B.; IDSO, K.E.; GARCIA, R.L.; KIMBALL, B.A.; HOOBER, J.K. Effects of atmospheric CO₂ enrichment and foliar methanol application on net photosynthesis of sour orange tree (*Citrus aurantium*; Rutaceae) leaves. **American Journal of Botany**, v. 82, p. 26-30, 1995.

IPCC. **Climate change 2007**: the physical science basis: summary for policymakers. Geneva: IPCC, 2007. 18p. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2013.

KIRSCHBAUM, M.U.F. Does enhanced photosynthesis enhance growth? Lessons learned from CO₂ enrichment studies. **Plant Physiological**, v. 155, p. 117-124, 2011.

KRAUSE, G.H.; JAHNS, P. Non-photochemical energy dissipation determined by chlorophyll fluorescence quenching: characterization and function. In: PAPAGEORGIOU G.C.; GOVINDJEE, C. (Eds), **Chlorophyll a Fluorescence: a signature of photosynthesis**. Springer. The Netherlands, 2004. p. 463-495.

KRUPA, Z.; ÖQUIST, G.; HUNER, N.P. The effects of cadmium on photosynthesis of *Phaseolus vulgaris* – a fluorescence analysis. **Physiologic Plantarum**, v. 88, p. 626-630, 1993.

LaDEAU, S.L.; CLARK, J.S. Rising CO₂ levels and the fecundity of forest trees. **Science**, v. 292, p. 95-98, 2011.

LEAKEY, A.D.B.; AINSWORTH, E.A.; BERNACCHI, C.J.; ROGERS, A.; LONG, S.P.; ORT, D.R. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, p. 2859-2876, 2009.

LICHTENTHALER, H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzimology**, v.148, p. 350-382, 1987.

LIN, J.; JACH, M.E.; CEULEMANS, R. Stomatal density and needle anatomy of Scots pine (*Pinus sylvestris*) are affected by elevated CO₂. **New Phytologist**, v. 150, p. 665-674, 2001.

LONG, S.P. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentrations: Has its importance been underestimated? **Plant, Cell and Environment**, v. 14, p. 729-739, 1991.

LONG, S.P.; AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A.; ORT, D.R. Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, p. 591-628, 2004.

LÓPEZ-MILLAN, A.F.; MORALES, F.; ABADÍA, A.; ABADÍA, J. Responses of sugar beet roots to iron deficiency. Changes in carbon assimilation and oxygen use. **Plant Physiology**, v. 124, p. 885-897, 2000.

LUO, Y.; REYNOLDS, J.; WANG, Y.; WOLFE, D. A search for predictive understanding of plant responses to elevated [CO₂]. **Global Change Biology**, v. 5, p. 143-156, 1999.

MARTINS, C.C.; SOARES, A.A.; BUSATO, C.; REIS, E.F. Manejo da Irrigação por Gotejamento no Cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Bioscience Journal**, v. 23, p. 61-69, 2007.

MAZLIAK, P. Plant membrane lipids: changes and alterations during aging and senescence. In: LIEBERMAN, M. (ed.): **Postharvest Physiology and Crop Preservation**. New York: Plenum Press, 1983. pg. 123-140.

MIYAZAWA, S.I.; LIVINGSTON, N.J.; TURPIN, D.H. Stomatal development in new leaves is related to the stomatal conductance of mature leaves in poplar (*Populus trichocarpa* x *P. deltoides*). **Journal of Experimental Botany**, v. 57, p. 373-380, 2006.

MORAIS, L.E.; CAVATTE, P.C.; DETMANN, K.C.; SANGLARD, L.M.V.P.; RONCHI, A.B. The source capacity increases with increasing precociousness of fruit maturation in field-grown clones of Conilon coffee (*Coffea canephora*) trees. **Trees**, v. 26, p. 1397-1402, 2012.

MOUTINHO-PEREIRA, J.; GONÇALVES, B.; BACELAR, E.; CUNHA, J.B.; COUTINHO, J.; CORREIA, C.M. Effects of elevated CO₂ on grapevine (*Vitis vinifera* L.): Physiological and yield attributes. **Vitis**, v. 48, p. 159-165, 2009.

OLIVEIRA, V.F.; ZAIDAN, L.B.P.; BRAGA, M.R.; AIDAR, M.P.M.; CARVALHO, M.A.M. Elevated CO₂ atmosphere promotes plant growth and inulin production in the Cerrado species *Vernonia herbacea*. **Functional Plant Biology**, v. 37, p. 223-231, 2010.

ÖQUIST, G. Seasonally induced changes in acyl lipids and fatty acids of chloroplast thylakoids of *Pinus silvestris*. A correlation between the level of unsaturation of monogalatosyl diglyceride and the rate of electron transport. **Plant Physiology**, v. 69, p. 869-875, 1982.

PARTELLI, F.L. Aspectos microbiológicos, nutricionais, fisiológicos e bioquímicos em Cafeeiro. **Tese (Doutorado em Produção Vegetal)**. Campos dos Goytacazes-RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, UENF, Brasil, 2008, 245p.

PARTELLI, F.L.; BATISTA-SANTOS, P.; CAMPOS, P.S.; PAIS, I.P.; QUARTIN, V.L.; VIEIRA, H.D.; RAMALHO, J.C. Characterization of the main lipid components of chloroplast membranes and cold induced changes in *Coffea* sp. **Environmental and Experimental Botany**, p. 74, p. 194–204, 2011.

POLLEY, H.W. Implications of atmospheric and climate change for crop yield. **Crop Science**, v. 42, p. 131-140, 2002.

POSSELL, M.; HEWITT, C.N. Gas exchange and photosynthetic performance of the tropical tree *Acacia nigrescens* when grown in different CO₂ concentrations. **Planta**, v. 229, p. 837-846, 2009.

RAMALHO, J.C., CAMPOS, P.S., TEIXEIRA, M., NUNES, M.A. Nitrogen dependent changes in antioxidant system and in fatty acid composition of chloroplast membranes from *Coffea arabica* L. plants submitted to high irradiance. **Plant Science**, v.135, p.115-124, 1998.

RAMALHO, J.C.; CAMPOS, P.S.; QUARTIN, V.L.; SILVA, M.J.; NUNES, M.A. 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**, v. 154, p. 319-326, 1999.

RAMALHO, J.C.; LEITÃO, A.E.; PARTELLI, F.L.; SANTOS, P.B.; FORTUNATO, A.S.; VIEIRA, H.D.; LIDON, F.C.; CAMPOS, P.S.; PAIS, I.P.; RODRIGUES, A.D. **Impacto das baixas temperaturas positivas e mecanismos de tolerância no cafeeiro**. In: TOMAZ, M. A.; AMARAL, J.F.T.; JESUS JUNIOR, W.C.; FONSECA, A.F.A.; FERRAO, R.G.; FERRAO,

M.A.G.; MARTINS, L.D.; RODRIGUES, W.N. (Org.). Inovação, difusão e integração: bases para a sustentabilidade da cafeicultura. 1ed. Alegre-ES: CAUFES, 2012, v. 1, p. 203-226.

RAMALHO, J.C.; MARQUES, N.C.; SEMEDO, J.N.; MATOS, M.C.; QUARTIN, V.L. Photosynthetic performance and pigment composition of leaves from two tropical species is determined by light quality. **Plant Biology**, v.4, p.12-20, 2002.

RAMALHO, J.C.; QUARTIN, V.; FAHL, J.I.; CARELLI, M.L.; LEITÃO, A.E.; NUNES, M.A. Cold acclimation ability of photosynthesis among species of the tropical *Coffea* genus. **Plant Biology**, v. 5, p. 631-641, 2003.

RICCI, M.S.F.; COSTA, J.R.; PINTO, A.N.; SANTOS, V.L.S. Cultivo orgânico de cultivares de café a pleno sol e sombreado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 4, p. 569-575, 2006.

RONCHI, C.P.; DaMATTA, F.M.; BATISTA, K.D.; MORAES, G.A.B.K.; LOUREIRO, M.E.; DUCATTI, C. Growth and photosynthetic down-regulation in *Coffea arabica* in response to restricted root volume. **Functional Plant Biology**, v. 33, p.1013-1023, 2006.

RUBAN, A.V.; HORTON, P. Regulation of Non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence in plants. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 22, p. 221-230, 1995.

SAGE, R.F. Acclimation of photosynthesis to increasing atmospheric CO₂: The gas exchange perspective. **Photosynthesis Research**, v. 39, p. 351-368, 1994.

SCHREIBER, U. Pulse-Amplitude-Modulation (PAM) fluorometry and saturation pulse method: An overview. - In PAPAGEORGIOU G.C.; GOVINDJEE, C. (Eds), **Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis**. Springer. The Netherlands, 2004. p. 279-319.

SICHER, R.C, BUNCE, J.A. Photosynthetic enhancement and conductance to water vapor of field-grown *Solanum tuberosum* (L.) in response to CO₂ enrichment. **Photosynthesis Research**, v. 62, p. 155-163, 1999.

SIEGENTHALER, P.A.; TRÉMOLIÈRES, A. **Role of acyl lipids in the function of photosynthetic membranes in higher plants.** In: SIEGENTHALER, P-A.; MURATA, N. (eds.). *Lipids in Photosynthesis: Structure, Function and Genetics*, Series Advances in Photosynthesis, v. 6. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. pp. 145-173, 1998.

SIMS, D.A.; CHENG, W.; LUO, Y.; SEEMANN, J.R. Photosynthetic acclimation to elevated CO₂ in sunflower canopy. **Journal of Experimental Botany**, v. 50, p. 645-653, 1999.

SOUZA, C.R.; MAROCO, J.; SANTOS, T.P.; RODRIGUES, M.L.; LOPES, C.; PEREIRA, J.S.; CHAVES, M.M. Control of stomatal aperture and carbon uptake by deficit irrigation in two grapevine cultivars. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 106, p. 261–274, 2005.

STITT, M. Rising CO₂ level and their potential significance for carbon flow in photosynthetic cells. **Plant, Cell & Environment**, v. 14, p. 741-762, 1991.

TRICKER, P.J.; TREWIN, H.; KULL, O.; CLARKSON, G.J.J.; EENSALU, E.; TALLIS, M.J.; COLELLA, A.; DONCASTER, C.P.; SABATTI, M.; TAYLOR, G. Stomatal conductance and not stomatal density determines the long-term reduction in leaf transpiration of poplar in elevated CO₂. **Oecologia**, v. 143, p. 652-660, 2005.

VALVERDE, P.L.; FORNONI, J.; NUNEZ-FARFAN, J. Defensive role of leaf trichomes in resistance to herbivorous insects in *Datura stramonium*. **Journal of Evolution Biology**, v. 14, p. 424-432, 2001.

WHITE, A.J.; CRITCHLEY, C. Rapid light curves: a new fluorescence method to assess the state of the photosynthetic apparatus. **Photosynthesis Research**, v. 59, p. 63-72, 1999.

WOODWARD, F.I. Potential impacts of global elevated CO₂ concentrations on plants. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 5, p. 207-211, 2002.

WOODWARD, F.I.; KELLY, C.K. The influence of CO₂ concentration on stomatal density. **New Phytologist**, v. 131, p. 311-327, 1995.

YANG, Z.; SU, X.; WU, F.; GONG, Y.; KUANG, T. Effect of phosphatidyl glycerol on molecular organization of photosystem I. **Biophysical Chemistry**, v. 115, p. 19-27, 2005.

ZHU, C.; ZISKA, L.; ZHU, J.; ZENG, Q.; XIE, Z.; TANG, H.; JIA, X.; HASEGAWA, T. The temporal and species dynamics of photosynthetic acclimation in flag leaves of rice (*Oryza sativa*) and wheat (*Triticuma estivum*) under elevated carbon dioxide. **Physiologia Plantarum**, v.145, p. 395-405, 2012.

ZISKA, L.H.; BUNCE, J.A. Plant responses to rising atmospheric carbon dioxide. In: MORISON, J.I.L.; MORECROFT, M.D. **Plant Growth and Climate Change**, Oxford: Blackwell. p. 17-47, 2006.

CAPÍTULO 2

EFEITOS COMBINADOS DA [CO₂] ELEVADA E ALTA TEMPERATURA NO EQUILÍBRIO MINERAL FOLIAR EM PLANTAS *Coffea* spp.

RESUMO

Estudos de modelagem previram que as alterações climáticas terão forte impacto sobre a cultura do café, embora não exista nenhuma informação sobre o impacto efetivo de elevada [CO₂] sobre esta planta. Aqui, pretende-se proporcionar um primeiro vislumbre sobre o efeito do impacto combinado da elevada [CO₂] e da alta temperatura sobre o conteúdo mineral e equilíbrio nessa importante cultura tropical. Plantas em vasos de dois genótipos de *Coffea arabica* (cv. Icatu e IPR 108) e um de *C. canephora* (cv. Conilon Clone 153) foram cultivadas em 380 ou 700 µL de CO₂ L⁻¹, por um ano, após foram expostas a um aumento gradual da temperatura de 25/20 °C (dia/noite) até 42/34 °C, ao longo de oito semanas. Na temperatura de controle, plantas crescidas em 700 µL de CO₂ L⁻¹ apresentaram um efeito de diluição moderada (entre 7% e 25%) no clone 153 (para N, Mg, Ca, Fe) e Icatu (para N, K e Fe), mas não em IPR 108 (exceto para Fe) quando comparada com plantas crescidas a 380 µL de CO₂ L⁻¹, nesta mesma condição, com o aumento da temperatura houve uma diminuição dos teores nutricionais. Não há respostas claras em relação as espécies considerando [CO₂] e os impactos de temperatura, embora a IPR 108 se apresente menos sensível a [CO₂]. Apesar das mudanças promovidas pela [CO₂] e temperatura, a grande maioria das relações minerais foram mantidas dentro de uma faixa consideravelmente adequada, o que sugere que esta planta pode manter estável em relação ao balanço mineral em um contexto de mudanças climáticas e do aquecimento global.

ABSTRACT

Modelling studies predicted that climate change will have strong impacts on the coffee crop, although no information on the effective impact of elevated CO₂ on this plant exists. Here, we aim at providing a first glimpse on the effect of the combined impact of enhanced [CO₂] and high temperature on the leaf mineral content and balance on this important tropical crop. Potted plants from two genotypes of *Coffea arabica* (cv. Icatu and IPR 108) and one from *C. canephora* (cv. Conilon Clone 153) were grown under 380 or 700 µL CO₂ L⁻¹ air, for 1 year, after which were exposed to an stepwise increase in temperature from 25/20 °C (day/night) up to 42/34 °C, over 8 weeks. Leaf macro – (N, P, K, Ca, Mg, S) and micronutrients (B, Cu, Fe,

Mn, Zn) concentrations were analyzed at 25/20 °C (control), 31/25 °C, 37/30 °C and 42/34 °C. At the control temperature, the 700 $\mu\text{L L}^{-1}$ grown plants showed a moderate dilution effect (between 7 % and 25 %) in CL 153 (for N, Mg, Ca, Fe) and Icatu (for N, K and Fe), but not in IPR 108 (except for Fe) when compared to the 380 $\mu\text{L L}^{-1}$ plants. For temperatures higher than control most nutrients tended to increase, frequently presenting maximal contents at 42/34 °C (or 37/30 °C), although the relation between $[\text{CO}_2]$ treatments did not appreciably change. Such increases offset the few dilution effects observed under high growth $[\text{CO}_2]$ at 25/20 °C. No clear species responses were found considering $[\text{CO}_2]$ and temperature impacts, although IPR 108 seemed less sensitive to $[\text{CO}_2]$. Despite the changes promoted by $[\text{CO}_2]$ and heat, the large majority of mineral ratios were kept within a range considered adequate, suggesting that this plant can maintain mineral balances in a context of climate changes and global warming.

INTRODUÇÃO

Independentemente das projeções para o futuro, pode-se afirmar que entre o período pré-revolução industrial (280 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$) até o ano de 2013 a $[\text{CO}_2]$ atmosférica aumentou aproximadamente 43%. Estimativas atuais apontam para um aumento da concentração de CO_2 atmosférico entre 450 e 600 $\mu\text{L L}^{-1}$ até o ano de 2050, e entre 730 e 1020 $\mu\text{L L}^{-1}$ em 2100, de acordo com os cenários futuros de emissões antrópicas (IPCC, 2013). Aliado a isto, considerando os efeitos naturais e antrópicos no ajuste dos dados simulados em modelos matemáticos, existe a previsão de aumento global entre 1,4 e 5,8 °C da temperatura média do ar até ao fim do presente século (IPCC, 2013).

Numerosos trabalhos têm reportado aumento do crescimento das plantas em resposta à elevação da $[\text{CO}_2]$ (Ainsworth e Long; 2005; DaMatta et al., 2010). Os resultados indicam que existe regulação do sistema fotossintético das plantas (Sage, 1994), associado em alguns casos a diminuição da condutância estomática (Ainsworth e Rogers, 2007), aumento das taxas de fotossíntese líquida (Kirschbaum, 2011), aumento da taxa de carboxilação da RuBisCO (Long, 1995), diminuição das taxas de transpiração e melhoria da eficiência na utilização da água e nitrogênio (Ainsworth e Rogers, 2007). Com isso, é possível afirmar que estas mudanças afetam os processos fundamentais das plantas, alterando o crescimento, a produção e a qualidade do produto.

Também é reportado que a elevação da temperatura, atuando isoladamente, modifica o crescimento das plantas. Os resultados indicam que temperaturas elevadas implicam em alterações na condutância estomática e na distribuição de energia (Singsaas et al., 1997), na

estrutura dos tilacóides e na difusividade no mesófilo (Lambers et al., 2008), reduzindo o ganho líquido de carbono (espécies C3) por aumentar a fotorrespiração (Long, 1991) e em última instância modificam a atividade do ciclo de Calvin (Rennenberg et al., 2007).

Vistos em conjunto, os cenários indicam que o aumento do CO₂ implicará na elevação dos índices de temperatura do ar (IPCC, 2013). Neste âmbito, os estudos indicam que a elevada [CO₂] poderá atenuar os impactos causados pelas altas temperaturas (Sheu et al., 1999; Lewis et al., 2001; Idso et al., 1995; Osório et al., 2011; Wertin et al., 2012).

Pela implicação que a elevação da [CO₂] pode exercer sobre o crescimento das plantas, principalmente associado a altas temperaturas, foram conduzidos inúmeros estudos (Ainsworth e Long; 2005), que focaram particularmente o N, em especial a razão C/N (Conroy, 1992; Cotrufo et al., 1998; Ainsworth et al., 2003; Taub e Wang, 2008). A partir desses estudos, foram observados decréscimos de N nos tecidos foliares e elevação da relação C/N em nível elevado de [CO₂], tendo sido sugeridas inúmeras hipóteses em relação ao fundo fisiológico desta observação (Taub e Wang, 2008; Cheng et al., 2010). No entanto, também têm sido relatadas várias reduções de outros minerais, como K, Ca, Mg, Mn, Fe em espécies herbáceas e lenhosas (Overdiek, 1993), P, K, Ca, S, Na, Al, Cu, Fe, Mn, Zn e Sr em amostras de herbário (Penuelas e Matamala 1993), nos macronutrientes N, P, K, Mg, S e Ca em *Picea abies* (Roberntz e Linder, 1999) e em N, Ca e Mn em *Quercus rubra* (Thiec et al., 1995). Assim, tendo em conta a importância da concentração e o equilíbrio dos minerais para praticamente todos os processos biológicos, o entendimento do impacto do aumento da [CO₂] é de importância crucial.

Independente das projeções relacionadas com as alterações de CO₂ e temperaturas atmosféricas, há crescente preocupação em relação aos efeitos que as mudanças climáticas poderão causar na cadeia produtiva de matérias-primas naturais, nomeadamente no café. O café é uma cultura tropical, cultivada em cerca de 80 países, tornando-se um dos produtos agrícolas mais negociados no mundo. O comércio de café gera aproximadamente US\$ 90.000 milhões por ano, sendo a base econômica de muitos países tropicais em desenvolvimento. O gênero *Coffea* inclui mais de 100 espécies, com particular importância de *C. arabica* L. e *C. canephora* Pierre ex. Froehner A., sendo responsáveis por aproximadamente 99% da produção mundial de café (Davis et al., 2012; Partelli et al., 2011; Ramalho et al., 2013a).

No que respeita à temperatura as condições ótimas de desenvolvimento de *C. arabica* L. encontram-se entre 18 e 23 °C de média anual, enquanto para *C. canephora* situa-se entre 22 e 26 °C ou mesmo até 30 °C (DaMatta e Ramalho, 2006). Desta forma, as alterações climáticas relacionadas com o aumento de temperatura certamente afetarão estas espécies de forma

diferente, no que diz respeito à adequação de áreas tradicionais de produção de café. Vários estudos, a maioria que prevêem o aumento da temperatura do ar, prediziram graves impactos sobre a cultura do café, com fortes perdas de rendimento (Gay et al., 2006), áreas adequadas (Assad et al., 2004) e variabilidade genética, relacionada com a extinção de populações selvagens de *C. arabica* (Davis et al., 2012). Ainda assim, tais estimativas dos efeitos de mudanças climáticas globais sobre a produção de café não levam em conta possíveis efeitos atenuantes do aumento da [CO₂] atmosférica sobre os impactos negativos das temperaturas elevadas. Além disso, a capacidade da planta de café para metabolicamente ajustar sob condições ambientais que limitam, por exemplo, de temperatura, irradiância, água e nutrientes, também tem que ser levado em conta (Ramalho et al., 1999; DaMatta e Ramalho, 2006; Fortunato et al., 2010; Batista-Santos et al., 2011; Scotti-Campos et al., 2014).

Poucos estudos relatam o efeito da elevação da [CO₂] e temperatura na partição dos nutrientes minerais dos tecidos verdes foliares, não havendo trabalhos para espécies do gênero *Coffea*. O estudo das implicações do aumento da [CO₂] e da temperatura em relação à constituição de nutrientes minerais em folhas de café é sustentado por três justificativas. Primeiramente, a manutenção dos níveis adequados dos nutrientes minerais no tecido foliar do cafeeiro são de fundamental importância pelo fato de ser uma planta que possui as fases vegetativa e reprodutiva acontecendo em paralelo, assim, qualquer modificação nos níveis de nutrientes afeta o metabolismo e conseqüentemente a produção e a qualidade dos grãos (Malavolta, 1996). Segundo, que há possibilidade de modificação geográfica das áreas de cultivo, com deslocamento da área produtiva para regiões de maior altitude que as atuais e com temperaturas médias anuais abaixo de 23 °C (Assad et al., 2004). Contudo, muitos dos solos destas áreas apresentam reduzida fertilidade natural o que aumenta a importância dos estudos de dinâmica de nutrientes minerais. Terceiro, pelo fato que o suprimento tem sido considerado como uma medida de mitigação as mudanças climáticas globais, principalmente ao incremento da [CO₂] que ao funcionar como uma fertilização em C, poderá modificar a relação do C com o N (C/N) e com os demais nutrientes no tecido foliar (Thiec et al., 1995).

Este trabalho pretende elucidar os impactos da ação combinada do aumento atmosférico da [CO₂] e da temperatura, em condições ambientais controladas, nos níveis de elementos minerais foliares e nos índices nutricionais em três importantes genótipos de *C. arabica* e *C. canephora*.

MATERIAL E MÉTODOS

Local de estudo, material vegetal, delineamento e implementação do ensaio

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação e em fitoclimas (com controle de variáveis ambientais), no Grupo de Interações Planta-Ambiente, Centro de Ambiente, Agricultura e Desenvolvimento, do Instituto de Investigação Tropical (Plant Stress – BioTrop - IICT) em Oeiras, Portugal.

Adotou-se o delineamento inteiramente casualizado em parcela subdividida, na qual a parcela consistiu de níveis de [CO₂] atmosférico (380 e 700 µL L⁻¹), a subparcela em níveis de temperatura (25/20 31/25 °C, 37/30 °C e 42/35 °C dia/noite), e a subsubparcela em genótipos de *Coffea spp.* (*C. arabica* e *C. canephora*), com dez repetições. As plantas foram cultivadas em vasos plásticos com capacidade de 12 L até a idade de um ano, após foram transplantadas para vasos com capacidade de 26 L utilizando 30 dm³ de solo.

Os genótipos utilizados no ensaio foram o Icatu e o Catucaí IPR 108, ambos *C. arabica*, descritos por Carvalho et al. (2008) e o clone 153 (*C. canephora* cv. Conilon) descrito por Fonseca et al. (2008) com aproximadamente 12 meses de idade, cultivados em vasos em casa de vegetação, após estes foram transferidos para câmaras de crescimento (Fitoclima 10000-EHFF, *Walk-in*, ARALAB, Portugal) com ambiente controlado de irradiância de 700-800 µmol m⁻² s⁻¹, proporcionada por uma combinação otimizada de lâmpadas fluorescentes de alta frequência, de vapor de sódio e de halogênio (Ramalho et al., 2013b), umidade relativa de 70%, fotoperíodo de 12 h, temperatura de 25/20 °C (dia/noite) e concentração de CO₂ de 380 ou 700 µL L⁻¹.

Os níveis de temperatura foram escolhidos com base na faixa de aptidão térmica média anual (DaMatta e Rena, 2002) para *C. arabica* (22 °C) e para *C. canephora* (26 °C), sendo estipulados valores superiores com intuito de prever possíveis cenários, sujeitando os genótipos de *C. arabica* e *C. canephora* desde a temperatura controle de 25/20 °C (dia/noite) até 42/34 °C e retorno às condições controle.

Após um ano (em 25/20 °C), as plantas foram expostas a um aumento gradual da temperatura (0,5 °C diários) desde 25/20°C até 42/34 °C, para permitir a expressão gradual do potencial de aclimação ao estresse ambiental causado, com permanência entre seis a sete dias em cada temperatura (31/25 °C, 37/30 °C e 42/35 °C). As determinações foram efetuadas em folhas recém maduras, amostrando no mínimo cinco plantas de cada genótipo para utilização em análises imediatas e, também, passadas em N₂ líquido, e armazenadas a -80 °C (Cryocell, DD86-750 P, Portugal).

As plantas foram cultivadas sem restrições de água, nutrientes ou o desenvolvimento das raízes, este último tal como avaliado por exame visual, até ao final do ensaio, quando as plantas foram removidas dos vasos. As plantas foram supridas mensalmente com *ca.* 500 mg de fertilizante, contendo: 7% de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 5% de KNO_3 , 7.8% de P_2O_5 , 17% de K_2O , 1.6% de MgO , 20% de MgSO_4 , 0,02% de H_3BO_3 e 0,01% de ZnSO_4 . Para reforçar a disponibilidade de N e Ca, uma fertilização complementar de *ca.* 200 mg, foi feita a cada três meses, com 27% de NH_4NO_3 e 6% de CaO . Ambos os fertilizantes foram fornecidos como esferas sólidas que dissolvia lentamente ao longo de irrigações sucessivas, permitindo uma liberação gradual dos minerais ao solo. Para melhorar a disponibilidade de micronutrientes, foram adicionados mensalmente *ca.* 500 mL de uma solução contendo: 0,02% de Fe-EDTA, 0,01% de CuSO_4 , 0,01% de MnCl_2 , e 0,005% H_2MoO_2 .

Amostragem de folhas

Todas as amostras foram retiradas de folhas recém-maduras completamente desenvolvidas de 8 a 10 plantas, em ambos os ramos (plagiotrópico e ortotrópico), depois de *ca.* 2 horas de iluminação, após o terceiro ou quarto dia de exposição para cada tratamento estudado.

Análise de nutrientes nos tecidos foliares

As amostras de folhas foram lavadas com água deionizada, levadas à estufa de circulação forçada de ar à temperatura de 65 °C (STF CIR SP-102/2000), até peso constante, e moídas (CIENLAB CE-430; 8 lâminas, 1725 rpm, malha 20 mesh) para obtenção de um pó homogêneo.

Os teores de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn, foram determinado em triplicata, pesando-se *ca.* 400 mg (+/- 0,001 g) de material seco e moído diretamente em tubos de Taylor (25 mm x 200 mm), sendo submetidas à digestão nítrico e perclórica (65% e 70%), sendo a determinação obtida por espectrometria de absorção atômica (VARIAN AA-240-FS, Agilent Technologies, USA) (EMBRAPA, 1997). A concentração total de nitrogênio foi determinada em *ca.* 100 mg (+/-0.001g) de material seco e moído, em triplicata, pelo método “Micro-Kjeldahl” (Ma e Zuazaga, 1942). Foi realizado as etapas de digestão (H_2SO_4), destilação (NaOH 40%) e titulação (NaOH 0,02 mol L⁻¹) em destilador de nitrogênio “Kjeldahl” (Marconi MA-036).

Para a quantificação do teor de B foi pesado *ca.* 200 mg (± 0.001 g) de material seco e moído, em triplicata, diretamente para tubos de polipropileno, adicionando 2,0 mL de tampão acetato de amônio (40 mM, 7,5% de EDTA p/v) e 2,0 mL de solução de azometina-H (10 mM) para promover a reação, agitando e deixando em repouso *ca.* 30 minutos. A quantificação foi realizada espectrofotometricamente (420 nm, a 25 °C), sendo calculada de acordo com curva padrão de boro (Bataglia et al., 1983).

Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA, $p \leq 0,05$), utilizando-se o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2011) e quando significativos, foi utilizado o teste de Tukey (a $p \leq 0,05$) para comparação de médias entre fatores qualitativos (genótipo e [CO₂]), e análise de regressão para comparação entre fatores quantitativos (temperatura). Os modelos de regressão foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão (Teste t de Student, $p \leq 0,05$) e no coeficiente de determinação (R²).

RESULTADO

Efeitos da elevação da [CO₂] na concentração dos nutrientes minerais foliares

Os níveis de macronutrientes nos tecidos foliares dos genótipos de *Coffea* spp. não foram alterados sob elevada [CO₂], exceto para o clone 153 e o Icatu que tiveram a concentração de N e K dos tecidos foliares reduzidas quando cultivados em 700 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$ (Tabela 1). Em todas as temperaturas estudadas, as concentrações dos macronutrientes dos tecidos foliares foram semelhantes entre os genótipos quando cultivados em 380 $\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$, sendo que a elevação [CO₂] não modificou esta constatação, pelo fato das concentrações dos macronutrientes foliares dos genótipos permanecerem semelhantes (Tabela 1).

Tabela 1. Valores médios do teor de macronutrientes (mg g^{-1}) em folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon clone 153) cultivadas em diferentes $[\text{CO}_2]$ (380 e 700 $\mu\text{L CO}_2 \text{L}^{-1}$) e temperaturas (25/20; 31/25; 37/30; 42/34 °C dia/noite)

Genótipos	CL 153		Icatu		IPR 108		
	$[\text{CO}_2]$	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$
25/20 °C							
N		34,28 aA	31,72 bB	37,13 aA	31,13 bB	36,45 aA	36,22 aA
P		1,35 aA	1,46 aA	1,29 aA	1,04 aA	1,74 aA	1,64 aA
K		18,98 aA	17,53 aAB	18,54 aA	14,08 bB	18,49 aA	19,25 aA
Ca		13,52 aA	11,07 bA	9,75 aB	10,42 aA	8,05 aB	8,60 aA
Mg		2,22 aA	1,68 bA	1,83 aA	1,53 aA	1,94 aA	1,77 aA
S		1,99 aA	1,86 aA	2,19 aA	1,83 aA	2,14 aA	2,12 aA
31/25 °C							
N		38,51 aA	34,29 bA	36,86 aA	34,68 aA	36,73 aA	34,19 bA
P		1,35 aA	1,38 aA	1,27 aA	1,22 aA	1,71 aA	1,59 aA
K		21,85 aA	17,97 bA	20,65 aA	16,78 bB	18,35 aA	19,07 aA
Ca		10,78 bA	13,22 aA	10,74 aA	11,2 aAB	10,62 aA	9,55 aB
Mg		2,22 aA	1,79 aA	2,17 aA	2,03 aA	2,40 aA	1,95 aA
S		2,27 aA	2,01 aA	2,17 aA	2,04 aA	2,15 aA	2,07 aA
37/30 °C							
N		39,61 aA	35,12 bA	38,41 aA	37,29 aA	38,56 aA	35,76 bA
P		1,26 aA	1,18 aA	1,51 aA	1,21 aA	1,71 aA	1,24 aA
K		24,92 aA	21,43 bA	23,57 aA	21,97 bA	22,03 aA	16,80 bB
Ca		11,03 aA	12,26 aA	11,12 aA	12,19 aA	10,01 aA	10,26 aA
Mg		2,48 aA	2,25 aA	2,94 aA	2,69 aA	2,80 aA	2,36 bA
S		2,32 aA	2,06 aA	2,25 aA	2,20 aA	2,25 aA	2,10 aA
42/34 °C							
N		40,84 aA	37,80 bA	41,32 aA	38,75 bA	41,69 aA	39,49 aA
P		1,15 aA	1,01 aA	1,52 aA	1,26 aA	1,78 aA	1,43 aA
K		24,72 aA	20,88 bB	25,23 aA	24,88 aA	26,39 aA	21,12 bB
Ca		11,67 aA	10,54 aA	12,31 aA	12,97 aA	11,65 aA	10,84 aA
Mg		2,85 aA	2,80 aA	3,18 aA	3,16 aA	3,31 aA	3,07 aA
S		2,41 aA	2,23 aA	2,42 aA	2,30 aA	2,44 aA	2,32 aA

Médias seguidas de mesma letra minúscula para os níveis de $[\text{CO}_2]$ e maiúscula para genótipos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Pode-se evidenciar, nas temperaturas estudadas, que o aumento da [CO₂] não modificou o teor dos micronutrientes foliares dos genótipos estudados (Tabela 2). Verifica-se apenas diferenças pontuais, como por exemplo, as concentrações de B no clone 153 e Icatu foram maiores em 380 µL CO₂ L⁻¹; no IPR-108, houve uma elevação da concentração de B devido aumento combinado de CO₂ e temperatura. A concentração de Fe no tecido dos genótipos é maior em 380 µL CO₂ L⁻¹ sendo que com o aumento da [CO₂], em função da temperatura do ar, esta se torna semelhante, exceto no Icatu, que na mesma condição, o teor de Fe permanece elevado em condições de CO₂ ambiental (Tabela 2).

Tabela 2. Valores médios do teor de micronutrientes ($\mu\text{g g}^{-1}$) em folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon clone 153) cultivadas em diferentes $[\text{CO}_2]$ (380 e 700 $\mu\text{L CO}_2 \text{L}^{-1}$) e temperaturas (25/20; 31/25; 37/30; 42/34 °C dia/noite)

Genótipos [CO ₂]	CL 153		Icatu		IPR 108	
	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$	380 $\mu\text{L L}^{-1}$	700 $\mu\text{L L}^{-1}$
25/20 °C						
B	59,55 aA	58,59 aA	54,70 aB	53,61 aB	59,63 aA	58,30 aA
Cu	18,74 bA	20,14 aA	14,56 bB	16,31 aB	13,73 aB	11,47 bC
Fe	23,34 aA	17,39 bA	19,73 aB	17,64 bA	24,15 aA	19,25 bA
Mn	253 aA	216 aA	288 aA	298 aA	208 aA	220 aA
Zn	9,18 aA	9,00 aA	8,52 aA	8,24 aA	9,07 aA	9,02 aA
31/25 °C						
B	67,86 aA	58,92 bA	55,44 aB	54,76 aB	55,97 bB	59,73 aA
Cu	19,17 aB	14,55 bB	14,95 aC	12,78 bB	30,4 aA	24,07 bA
Fe	22,52 aA	12,76 bC	24,61 aA	17,27 bB	25,06 aA	21,85 bA
Mn	286 aA	248 aA	291 aA	283 aA	214 aA	211 aA
Zn	10,58 aA	9,07 bA	8,68 aA	8,43 aA	8,64 aA	9,17 aA
37/30 °C						
B	73,69 aA	62,97 bA	57,97 aB	57,93 aB	60,65 bB	66,86 aA
Cu	16,77 bB	19,96 aA	14,05 aB	13,70 aB	23,69 aA	14,52 bB
Fe	21,98 aB	19,93 aA	24,69 aA	20,07 bA	25,38 aA	22,76 bA
Mn	314 aA	295 aA	253 bA	306 aA	220 bA	288 aA
Zn	11,03 aA	9,68 aA	9,07 aA	8,90 aA	9,28 aA	10,28 aA
42/34 °C						
B	69,80 aB	63,71 bB	76,57 aA	59,00 bB	59,49 bC	71,79 aA
Cu	19,74 bB	30,92 aA	23,96 aA	22,73 aB	13,31 bC	14,86 aC
Fe	18,38 aB	18,36 aB	21,78 aAB	21,01 aAB	25,01 aA	24,02 aA
Mn	355 aA	371 aA	272 aAB	307 aA	234 aB	276 aB
Zn	10,84 aB	9,75 aAB	16,34 aA	9,06 bB	9,14 bB	11,07 aA

Médias seguidas de mesma letra minúscula para os níveis de $[\text{CO}_2]$ e maiúscula para genótipos não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em condições ambientais os genótipos apresentam valores semelhantes de Mn e Zn foliar e o aumento da $[\text{CO}_2]$ não modificou esta relação. O clone 153 apresentou maior concentração de B em seus tecidos do que IPR-108 e o Icatu, que possuem concentrações semelhantes, sendo esta diferença mantida em 700 $\mu\text{L CO}_2 \text{L}^{-1}$. Em condições ambientes o clone 153 e o IPR-108 possuem, respectivamente, elevadas concentrações de Cu e Fe comparados aos demais, e esta

relação parece se manter quando cultivados em elevada [CO₂] e temperatura. Com isso, os dados indicam que existem diferenças pontuais na concentração dos micronutrientes entre os genótipos, porém não há evidências claras de modificação (Tabela 2).

Concentrações dos nutrientes foliares sob aumento da temperatura do ar

No geral, a elevação gradual da temperatura do ar implicou em aumento linear das concentrações dos macronutrientes no tecido foliar das plantas do *Coffea* ssp. Contudo, existem exceções pontuais que podem ser destacadas como o decréscimo linear da concentração de P nos tecidos foliares do clone 153 em função do aumento da temperatura, em ambas as [CO₂]. Verifica-se também, comportamento quadrático para concentrações de macronutrientes nos tecidos foliares em alguns tratamentos (Tabela 3) com tendência para estabelecer em [CO₂] elevada (700 µL CO₂ L⁻¹). Outra exceção dá-se ao comportamento quadrático das concentrações de Ca no tecido foliar do clone 153, em ambas as condições de [CO₂], sendo os maiores valores encontrados entre 25/20 °C e 31/25 °C, respectivamente, para 380 e 700 µL CO₂ L⁻¹ (Tabela 3).

Tabela 3. Equações de regressão, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), para teor foliar de macronutrientes em função do aumento da temperatura (25/20; 31/25; 37/30; 42/34 °C dia/noite) em *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivadas em diferentes $[CO_2]$ (380 e 700 $\mu L CO_2 L^{-1}$)

Nutriente	Genótipo	380 $\mu L L^{-1}$	R^2	700 $\mu L L^{-1}$	R^2
N	CL 153	0,367*T + 25,91	0,90	0,332*T + 23,51	0,95
	Icatu	0,279*T + 28,99	0,90	0,449*T + 20,31	0,97
	IPR 108	0,324*T + 27,30	0,89	0,237*T + 28,47	0,73
P	CL 153	-0,012*T + 1,68	0,94	-0,027*T + 2,17	0,96
	Icatu	0,016*T + 0,83	0,81	0,001*T ² - 0,104*T + 3,10	0,77
	IPR 108	1,75	-	0,003*T ² - 0,270*T + 6,01	0,91
K	CL 153	0,360*T + 10,44	0,90	-0,004*T ² + 0,535*T + 6,59	0,79
	Icatu	0,404*T + 8,35	0,99	0,659*T - 2,83	0,98
	IPR 108	0,486*T + 4,86	0,88	0,035*T ² - 2,300*T + 54,64	0,91
Ca	CL 153	0,026*T ² - 1,879*T + 43,76	0,94	-0,031*T ² + 2,06*T - 20,68	0,96
	Icatu	0,140*T + 6,24	0,95	0,151*T + 6,59	0,99
	IPR 108	0,200*T + 3,31	0,95	0,130*T + 5,42	0,99
Mg	CL 153	0,037*T + 1,18	0,84	0,066*T - 0,10	0,91
	Icatu	0,084*T - 0,33	0,96	0,097*T - 0,93	0,99
	IPR 108	0,078*T - 0,05	0,99	0,074*T - 0,22	0,90
S	CL 153	0,023*T + 1,46	0,88	0,018*T + 1,39	0,97
	Icatu	0,013*T + 1,80	0,73	0,027*T + 1,16	0,98
	IPR 108	0,017*T + 1,66	0,83	0,014*T + 1,71	0,72

* e ^{ns}, respectivamente, significativo e não significativo, pelo teste t, a 5% de probabilidade.

Não há diferenciação no padrão de ajuste (modelo da curva) da concentração dos macronutrientes nos tecidos foliares entre os genótipos. A diferença pontual que deve ser ressaltada está na concentração de K, em $[CO_2]$ elevada, onde os genótipos Icatu e IPR 108, ambos *C. arabica*, apresentaram concentrações máximas em 42/34 °C, respectivamente com comportamento linear e quadrático ($a > 0$), e de forma contrária o clone 153 apresenta concentrações superiores em 37/30 °C, com comportamento quadrático ($a < 0$) (Tabela 3).

O aumento da temperatura implicou em uma diferenciação do padrão de ajuste (modelo da curva) da concentração dos micronutrientes nos tecidos foliares dos genótipos de *Coffea* spp. entre os níveis de $[CO_2]$. Verifica-se que os genótipos crescidos em 380 $\mu L CO_2 L^{-1}$ possuem curvas quadráticas, que figuram pontos de máxima concentração dos micronutrientes em elevadas temperaturas 37/30 °C ($a < 0$) ou 42/34 °C ($a > 0$) (Tabela 4). Nota-se que as

concentrações máximas dos micronutrientes nos tecidos foliares do clone 153 e do IPR-108 nas temperaturas de 37/30 °C (B e Zn) e de 42/34 °C (Mn). Para o Icatu houve máxima concentração de Fe e Mn em 31/25 °C, e de B e Zn em 42/34 °C (Tabela 5).

Tabela 4. Equações de regressão, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), para teor foliar de micronutrientes em função do aumento da temperatura (25/20; 31/25; 37/30; 42/34 °C dia/noite) em *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivadas em diferentes $[CO_2]$ (380 e 700 $\mu L CO_2 L^{-1}$)

Nutriente	Genótipo	380 $\mu L L^{-1}$	R^2	700 $\mu L L^{-1}$	R^2
B	CL 153	$-0,089*T^2 + 6,66*T - 51,38$	0,96	$0,340*T + 49,54$	0,89
	Icatu	$0,146*T^2 - 8,67*T + 180,40$	0,94	$0,341*T + 44,84$	0,96
	IPR 108	59,63	-	$0,83*T + 36,13$	0,94
Cu	CL 153	$0,030*T^2 - 2,01*T + 50,73$	0,79	$0,137*T^2 - 8,53*T + 147,60$	0,99
	Icatu	$0,076*T^2 - 4,63*T + 83,46$	0,78	$0,101*T^2 - 6,43*T + 114,20$	0,97
	IPR 108	$-0,219*T^2 + 14,56*T - 212,60$	0,94	$-0,123*T^2 + 8,30*T - 117,90$	0,70
Fe	CL 153	$-0,269*T + 30,58$	0,82	17,11	-
	Icatu	$-0,056*T^2 + 3,91*T - 42,75$	0,99	$0,225*T + 11,38$	0,82
	IPR 108	$-0,013*T^2 + 0,93*T + 8,85$	0,90	$0,267*T + 12,94$	0,95
Mn	CL 153	$5,831*T + 105,20$	0,98	$8,894*T - 17,67$	0,94
	Icatu	$0,092*T^2 - 7,754*T + 4,285$	0,84	$0,146*T^2 - 8,947*T + 4,274$	0,99
	IPR 108	$1,456*T + 169,80$	0,92	$4,628*T + 9,262$	0,80
Zn	CL 153	$-0,011*T^2 + 0,88*T - 5,56$	0,99	$0,050*T + 7,68$	0,88
	Icatu	$0,323*T - 0,518$	0,76	$0,051*T + 6,93$	0,96
	IPR 108	9,04	-	$0,126*T + 5,61$	0,92

* e ns, respectivamente, significativo e não significativo, pelo teste t, a 5% de probabilidade.

Em 700 $\mu L CO_2 L^{-1}$ o aumento da temperatura elevou de forma crescente e retilínea a concentração dos micronutrientes nos tecidos foliares dos genótipos, evidenciando maiores concentrações dos micronutrientes em plantas cultivadas em 42/34 °C (Tabela 4).

Deve-se ressaltar que o padrão da concentração de Cu nos tecidos foliares dos genótipos de *Coffea* spp. quando submetidos ao aumento da temperatura, não foi alterado pela influência da $[CO_2]$. O clone 153 e o Icatu apresentaram aumento quadrático com valores de máxima concentração de Cu em seus tecidos na temperatura de 42/34 °C, e o IPR-108 obteve maiores concentrações de Cu em seus tecidos quando cultivado em 31/25 °C ($a > 0$) (Tabela 4).

Elevação de [CO₂] e temperatura modifica o balanço dos nutrientes foliares

A Tabela 5 apresenta as relações de maior importância entre nutrientes para o café (Malavolta, 1996). Verifica-se que os genótipos tiveram as relações N/S, N/Cu, P/Zn semelhantes à recomendada para a cultura (Malavolta, 1996), sendo que as demais relações (N/P; K/Mg; Ca/Mg; B/Zn e Cu/Zn) mostraram-se elevadas quando comparadas ao recomendável.

Tabela 5. Relação entre o teor de nutrientes em folhas de *C. arabica* (Icatu e IPR 108) e *C. canephora* (conilon CL 153) cultivadas em diferentes [CO₂] (380 e 700 µL CO₂ L⁻¹) e temperaturas (25/20 e 42/34 °C dia/noite)

[CO ₂]	380 µL L ⁻¹	700 µL L ⁻¹	380 µL L ⁻¹	700 µL L ⁻¹	380 µL L ⁻¹	700 µL L ⁻¹	380 µL L ⁻¹	700 µL L ⁻¹
Temperatura	25/20 °C							
	N/P		N/S		N/Cu		P/Zn	
CL 153	25,4	21,7	17,2	17,1	1829,2	1575	147,1	162,2
Icatu	28,8	29,9	17	17	2550,1	1908,6	151,4	126,2
IPR 108	20,9	22,1	17	17,1	2654,8	3157,8	191,8	181,8
	42/34 °C							
CL 153	35,5	37,4	16,9	17	2068,9	1222,5	106,1	103,6
Icatu	27,2	30,8	17,1	16,8	1724,5	1704,8	93	139,1
IPR 108	23,4	27,6	17,1	17	3132,2	2657,5	194,7	129,2
	25/20 °C							
	K/Mg		Ca/Mn		B/Zn		Cu/Zn	
CL 153	8,5	10,4	53,4	51,3	6,5	6,5	2	2,2
Icatu	10,1	9,2	33,9	35,0	6,4	6,5	1,7	2
IPR 108	9,5	10,9	38,7	39,1	6,5	6,5	1,85	1,3
	42/34 °C							
CL 153	8,7	7,5	32,8	28,4	6,4	6,5	1,8	3,2
Icatu	7,9	7,9	45,2	42,2	4,6	6,5	1,5	2,5
IPR 108	8	6,9	49,7	39,3	6,5	6,5	1,65	1,3

Valores aproximados considerado globalmente adequados ao *C. arabica* e *C. canephora* cv. Conilon: N/P: 16-18/18-26; N/S: 16-18/12-16; N/Cu: 2000-3375/1450-3200; P/Zn: 125-187/80-160; K/Mg: 6,1-6,6/5-7; Ca/Mn: 66-75/12,5-25; B/Zn: 5,0-7,3/3,3-6; Cu/Zn: 1/0,7-2 (Malavolta, 1996; Bragança et al. 2007).

Pode notar também que o aumento da [CO₂] e de temperatura diminui a concentração do Mg em relação a Ca e a K, sendo isso evidente também para N em relação ao Cu, e para o P em relação ao Zn. De forma contrária o aumento da [CO₂] e da temperatura eleva a concentração de P e Zn, respectivamente, em detrimento a concentração de N e Cu nos tecidos foliares dos genótipos (Tabela 5).

Pode-se ressaltar que parece não existir uma tendência de modificação (ou manutenção) das relações nutricionais em relação ao fator de estudo genótipo, pelo fato das modificações citadas acima serem generalizadas (Tabela 5).

O aumento da [CO₂] e a elevação da temperatura não modificaram a ordem de concentração dos macronutrientes no tecido foliar dos genótipos, sendo que na maioria dos tratamentos a ordem encontrada foi N > K > Ca > Mg > S > P (Tabela 1), além disso, todas os níveis nutricionais encontrados estão de acordo com os recomendáveis para a cultura, em condição ideal de cultivo (Malavolta, 1996).

DISCUSSÃO

O conteúdo mineral foliar e as proporções específicas entre alguns nutrientes minerais são muitas vezes utilizados para avaliar o estado nutricional das plantas ou para explicar os sintomas visuais, nomeadamente no café (Malavolta, 1993; Bragança et al., 2007). Considerando valores na temperatura de controle (25/20 °C), os níveis de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) estavam dentro de um bom intervalo para essa cultura, apesar do N e do P e Mg, respectivamente, apresentarem acima e abaixo do adequado. No que diz respeito aos micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn), apenas Fe pode ser considerado abaixo dos níveis adequados (Malavolta, 1993; Ramalho et al., 1995; Bragança et al., 2007; Guimarães e Reis, 2010; Ramalho et al., 2013a). Portanto, foi visto através da observação visual e confirmado pelo conteúdo mineral dos tecidos verdes foliares, que as plantas tinham adequada disponibilidade de nutrientes ao longo do período experimental.

Impacto do aumento da [CO₂] na concentração de minerais

No geral, os resultados indicam que as concentrações dos nutrientes nos tecidos foliares dos genótipos de café não foram alteradas estatisticamente com a elevação da [CO₂], apesar de existir uma forte tendência que mostra que os valores de nutrientes são superiores em [CO₂] ambiente, e que em temperaturas elevadas a concentração dos macronutrientes tendem a ser diminuída em levada [CO₂] (Tabela 1 e 2).

Resultados semelhantes foram encontrados em outros estudos (Reeves et al., 1994; Curtis, 1996; Fangmeier et al., 1997; Lieffering et al., 2004; Leakey et al., 2009; Blank et al., 2011) que reportam que os principais fatores ligados a manutenção e/ou diminuição de macronutrientes no tecido foliar de plantas crescidas em [CO₂] elevada estão suportados pela regulação positiva

do aparato fotossintético (e.g. influenciando a concentração de N e S), aumento da atividade enzimática (e.g. influenciando a concentração de K e P); pelo aumento do crescimento vegetativo (e.g. influenciando concentração de Ca) e pelo efeito de diluição devido à maior produção de matéria seca (e.g. influenciando concentração P, Ca e Mg).

Especificamente, as concentrações de N nos tecidos foliares dos genótipos (mais evidente no clone 153 e Icatu) foram reduzidas sob elevada $[CO_2]$ (Tabela 1), estando de acordo com uma gama de estudos que confirmam o fato do CO_2 elevado induzir uma redução estatisticamente significativa na concentração de N do tecido da planta, em inúmeras espécies C3 e C4 (Curtis, 1996; Cotrufo et al., 1998; Leakey et al., 2009). Os estudos indicam que plantas sob elevada $[CO_2]$ apresentam regulação positiva da P_n , V_{cmax} e aumento do conteúdo de RuBisCO, elevando a eficiência fotossintética de uso de nitrogênio (montante líquido de CO_2 assimilado por unidade de N foliar), assim a aclimatação fotossintética oferece uma oportunidade para otimizar a distribuição de N para maximizar o ganho de C.

O atual estudo também está em linha com o reportado para genótipos de café crescidos em elevada $[CO_2]$, onde foi observado ausência de impactos negativos em P_n , J_{max} , V_{cmax} e na eficiência de funcionamento do PSII, justificado provavelmente pela ausência de acúmulo de carboidratos não-estruturais e pelo aumento da atividade da RuBisCO, Ru5PK, MDH e PK (Ramalho et al., 2013b). A manutenção do funcionamento da raiz, por sua vez permite manter a força dreno para reforçar a síntese de fotossintatos que vêm de uma elevação da capacidade de funcionamento fotossintético (Ramalho et al. 2013a).

Os micronutrientes do tecido foliar dos genótipos estiveram em concentrações inferiores (e.g. Fe) ou semelhantes (e.g. Mn e Zn) em elevada $[CO_2]$, sendo que existe uma tendência de que o aumento da temperatura incremente as concentrações dos micronutrientes (e.g. Cu, B e Zn) dos genótipos crescidos em elevada $[CO_2]$ (Tabela 2 e 4). Os efeitos de enriquecimento de CO_2 sobre outros nutrientes além do N e do P foram pouco investigados, embora estimasse que com a elevação da $[CO_2]$ a concentração de micronutrientes em tecidos foliares pode ser diminuída em cerca de 10-30% (Overdieck, 1993; Huluka et al., 1994; Manderscheid et al., 1995; Fangmeier et al., 1997). Em tecidos foliares de trigo as concentrações de Fe e Zn diminuíram linearmente com a elevação da $[CO_2]$ (Fangmeier et al., 1997), decréscimos também foram reportados para as concentrações de Fe, Mn e Zn em plantas lenhosas e herbáceas (Overdieck, 1993) e em cereais (Manderscheid et al., 1995).

A redução da concentração dos micronutrientes sob elevação da $[CO_2]$ é justificada por vários fatores, estando atrelado ao requerimento de maiores quantidades para as atividades

enzimáticas (Mn e Fe) e para reações redox (Fe, Zn e Cu), para a fotossíntese e respiração (Fe) e para o armazenamento de energia e manutenção da integridade estrutural das membranas do cloroplasto (B) (Overdieck, 1993; Manderscheid et al., 1995; Fangmeier et al., 1997; Fangmeier et al., 2002; Lieffering et al., 2004; Leakey et al., 2009; Blank et al., 2011).

Além disso, o aumento da [CO₂] e da temperatura não alterou a ordem do conteúdo de macronutrientes (N>K>Ca>Mg>S>P) (Tabela 1) estando semelhante ao recomendado para esta cultura (Malavolta, 1993).

Mudanças nos minerais foliares devido ao aumento da temperatura

Durante o presente estudo não houve limitação de nutrientes e água no solo, proporcionando condições ótimas e semelhantes de crescimento para os genótipos em todos os fatores de estudo ([CO₂] e temperatura). O aumento da temperatura do ar não foi limitante a manutenção das concentrações dos nutrientes nos tecidos foliares dos genótipos de café, mantendo a ordem do teor e os níveis dos nutrientes das folhas dentro dos índices adequados como em condições ideais de cultivo (Malavolta, 1996). No geral, pode-se verificar que a concentração dos nutrientes apresenta um padrão de aumento crescente e retilíneo em função do aumento da temperatura do ar até 42/34 °C (Tabela 3 e 4), sendo mais evidente em 700 µL CO₂ L⁻¹, como pode ser verificado para os micronutrientes (Tabela 4).

Foi relatado que em altas temperaturas há diminuição dos conteúdos de nutrientes (Waraich et al., 2012), marcadamente de N e P (Reich e Oleksyn, 2004), justificado pelo fato das plantas, especialmente em condições de estresse hídrico severo, apresentarem decréscimo da biomassa, da área verde e do potencial hídrico foliar, seguido por diminuição da taxa de fotossíntese, da eficiência de funcionamento do PSII e da atividade enzimática (Chen et al., 1982; Singsaas et al., 1997; Liu et al., 2003; Xu e Zhou, 2006; Rennenberg et al., 2007; Lambers et al., 2008; Waraich et al., 2012).

Contudo, alguns estudos realizados com café reportam que em condições de campo as temperaturas elevadas não implicam em limitações na fotossíntese líquida, na condutância estomática, na manutenção da área foliar, na supressão do crescimento vegetativo, nomeadamente do crescimento do ramo plagiotrópico (Barros e Maestri, 1974; Barros et al., 1978; Camargo, 1985; Barros et al., 1997; DaMatta e Ramalho, 2006; Amaral et al., 2006; Fernandes et al., 2012) e na produção de grãos de diferentes genótipos de café (Teixeira et al., 2013; Filho et al., 2013); sendo necessário para isso a presença constante de água disponível no solo (acima de 24°C) (DaMatta et al., 2007). Em segunda análise, o cafeeiro tem maiores taxas

de crescimento vegetativo em períodos de alta temperatura e de altos índices pluviométricos, quando também é evidenciado aumento da absorção de nutrientes (Silva et al., 2004; Bragança et al., 2008).

Neste contexto, acredita-se que o aumento dos teores dos nutrientes pelos genótipos em função do aumento da temperatura (até 42/34 °C) neste estudo, foi pelo fato de não ter limitação de nutrientes e água no solo durante o ensaio, e pelo fato do cafeeiro apresentar aumentos de suas taxas fotossintéticas, de crescimento vegetativo e da absorção de nutrientes quando cultivado em altas temperaturas.

Deve ser tomado em consideração que, a fim de contrariar o aumento da temperatura do ar, plantas de café podem ter aumentado fortemente as suas taxas de transpiração (ca. entre 4 a 6 vezes) para promover o arrefecimento da folha. Esse fluxo de transpiração superior pode ter, por sua vez suportado uma maior absorção e translocação mineral, possivelmente ligado a ausência de limitações no metabolismo fotossintético até 37/30 °C. Isso estaria relacionado com os papéis de minerais no metabolismo celular, com implicações na manutenção da performance fotossintética e o reforço dos mecanismos de defesa contra o estresse oxidativo (por exemplo, Cu, Zn, Fe, Mn) (Ramalho et al., 2013a).

Elevação da [CO₂] e da temperatura promove mudanças nas relações minerais foliares

As modificações na dinâmica e na presença dos minerais nos tecidos foliares, promovidas pelo aumento da [CO₂] e da temperatura, teve impacto no equilíbrio entre nutrientes nas plantas de *Coffea* ssp. (Tabela 5), apesar de nenhuma evidência clara ter sido atrelado aos genótipos. A maioria das proporções foram consideradas como adequada (N/P; N/S, N/Cu, P/Zn e B/Zn) ou próximo ao adequado (K/Mg e Cu/Zn), para ambas as espécies (Malavolta, 1993; Bragança et al 2007).

Apesar do relatado acima, a grande maioria dos conteúdos e proporções não sofrem mudança no nível de adequação em relação ao que foi observado a 25/20 °C e 380 µL CO₂ L⁻¹, e parece aceitável afirmar que essas proporções foram globalmente sensíveis à temperatura e ao aumento da [CO₂]. Portanto, sabendo que a maioria dos balanços de nutrientes foram mantidos e que a planta do café se beneficiaria com o aumento da maioria dos minerais em seus tecidos foliares sob temperaturas mais elevadas, parece provável que a planta de café poderia se adequar para lidar com as mudanças climáticas e as condições de aquecimento global.

CONCLUSÕES

No geral, sob temperatura adequada (25/20 °C), o crescimento sob elevada [CO₂] modificou o padrão de acúmulo de alguns minerais e seu equilíbrio nas folhas de café, com um efeito de diluição entre 7 e 25% em *C. canephora* cv. Conilon CL 153 (reduções de N, Mg, Ca, Fe) e *C. arabica* cv. Icatu (reduções de N, K e Fe), mas não em plantas de IPR 108 (exceto para Fe). Apesar destas [CO₂] modificações, os níveis de nutrientes foram mantidos dentro de uma faixa considerada adequada para esta cultura, semelhante ao de plantas crescidas a 380 µL CO₂ L⁻¹.

Em altas temperaturas do ar, independente dos níveis de [CO₂], praticamente todos os valores médios dos macronutrientes e dos micronutrientes tendem a subir, apresentando sua máxima em 37/30 °C ou 42/34 °C. Tais aumentos observados em altas temperaturas do ar compensaram o efeito de diluição para alguns minerais evidenciado sob elevada [CO₂], em comparação com os valores encontrados em 380 µL CO₂ L⁻¹ e 25/20 °C. Estas alterações implicaram em ajustes, mas o conteúdo e as proporções, para os demais tratamentos se mantiveram semelhantes ao observado a 25/20 °C e 380 µL CO₂ L⁻¹.

Apesar das modificações relatadas nos teores de minerais, não foram encontradas respostas claras em relação as espécies considerando o aumento da [CO₂] e os impactos de temperatura, apesar do IPR 108 se apresentar menos sensível a elevação da [CO₂].

REFERÊNCIAS

AINSWORTH, E.A.; DAVEY, P.A.; HYMUS, G.J.; OSBORNE, C.P.; ROGERS, A. BLUM, H.; NÖSBERGER, J.; LONG, S.P. Is stimulation of leaf photosynthesis by elevated carbon dioxide concentration maintained in the long term? A test with *Lolium perenne* grown for ten years at two nitrogen fertilization levels under free air CO₂ enrichment (FACE). **Plant, Cell and Environment**, v. 26, p. 705-714, 2003.

AINSWORTH, E.A.; LONG, S.P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. **New Phytologist**, v. 165, p. 351-372, 2005.

AINSWORTH, E.A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. **Plant, Cell & Environment**, v. 30, p. 258–270, 2007.

AMARAL, J.A.T.; RENA, A.B.; AMARAL, J.F.T. Crescimento vegetativo sazonal do cafeeiro e sua relação com fotoperíodo, frutificação, resistência estomática e fotossíntese. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 3, p. 377-384, 2006.

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO, JR.J.; ÁVILA, A.M.H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 1057-1064, 2004.

BARROS, R.; MOTA, J. W.S.; DAMATTA, F.M.; MAESTRI, M. Decline of vegetative growth in *Coffea arabica* L. in relation to leaf temperature, water potential and stomatal conductance. **Field Crops Research**, v. 54, n. 1, p. 65-72, 1997.

BARROS, R.S.; MAESTRI, M. Influência dos fatores climáticos sobre a periodicidade de crescimento vegetativo do café (*Coffea arabica* L.). **Revista Ceres**, v.21, p.268-279, 1974.

BARROS, R.S.; MAESTRI, M.; COONS, M.P. The physiology of flowering in coffee: a review. **Journal of Coffee Research**, v. 8, p. 29-73, 1978.

BATAGLIA, O.C., FURLANI, A.M.C., TEIXEIRA, J.P.F., FURLANI, P.R.; GALLO, J. **Métodos de Análise Química de Plantas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. 48 p. (Boletim Técnico do IAC, v.78.).

BATISTA-SANTOS, P.; LIDON, F.C.; FORTUNATO, A.; LEITÃO, A.E.; LOPES, E.; PARTELLI, F.; RIBEIRO, A.I.; RAMALHO, J.C. The impact of cold on photosynthesis in genotypes of *Coffea* spp.—Photosystem sensitivity, photoprotective mechanisms and gene expression. **Journal of Plant Physiology**, v. 168, p. 792–806, 2011.

BLANK, R.R.; MORGAN, T.; ZISKA, L.H.; WHITE, R.H. Effect of Atmospheric CO₂ Levels on nutrients in Cheatgrass tissue. **Natural Resources and Environmental Issues**, v. 16, n. 18, p. 01-06, 2011.

BRAGANÇA, S.M.; PREZOTTI, L.C.; LANI, J.A. Nutrição do cafeeiro Conilon. In: FERRÃO, R.G.; FONSECA, A.F.; BRAGANÇA, S.M.; FERRÃO, M.A.; MUNER, L.H. (eds) **Café Conilon**. DCM/Incaper, Vitória, E.S., Brazil, pp 297-327, 2007.

BRAGANÇA, S.M.; MARTINEZ, H.H.P.; LEITE, H.G.; SANTOS, L.P.; SEDIYAMA, C.S.; VENEGAS, V.H.A.; LANI, J.A. Accumulation of macronutrients for the conilon coffee tree. **Journal of Plant Nutrition**, v. 31, p. 103-120, 2008.

CAMARGO, A.P. Florescimento e frutificação de café arábica nas diferentes regiões cafeeiras do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 20, n. 7, p. 831-839, 1985.

CARVALHO, G.R.; GUERREIRO FILHO, O.; PEREIRA, A.A.; ALMEIDA, S.R.; MATIELO, J.B.; BARTOLO, G.F.; SERA, T.; MOURA, W.M.; MENDES, A.N.G.; REZENDE, J.C.; FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, M.A.G.; FERRÃO, R.G.; NACIF, A.P.; SILVAROLLA, M.B. **Cultivares de café arábica**. In: CARVALHO, C.H.S. de. (Ed.). **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília-DF: Embrapa Café, 2008. v.1, p.33-55.

CHEN, H.H.; SHEN, Z.Y.; LI, P.H. Adaptability of Crop Plants to High Temperatures Stress. **Crop Science**, v. 22, p. 719-725, 1982.

CHENG, W.; SAKAI, H.; YAGI, K.; HASEGAWA, T. Combined effects of elevated CO₂ and high night temperature on carbon assimilation, nitrogen absorption and the allocations of C and N by rice (*Oryza sativa* L.). **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, p. 1174-1181, 2010.

CONROY, J.P. 1992. Influence of elevated atmospheric CO₂ concentrations on plant nutrition. **Australian Journal of Botany**, v. 40, p. 445-456, 1992.

COTRUFO, M.F.; INESON, P. Elevated CO₂ reduces the nitrogen concentration of plant tissues. **Global Change Biology**, v. 4, p. 43-54, 1998.

CURTIS, P.S. A meta-analysis of leaf gas exchange and nitrogen in trees grown under elevated carbon dioxide. **Plant, Cell & Environment**, v. 19, p. 127-137, 1996.

DAMATTA, F.M.; GRANDIS, A.; ARENQUE, B.C.; BUCKERIDGE, M.S. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. **Food Research International**, v. 43, p.1814–1823, 2010.

DaMATTA, F.M.; RAMALHO, J.D.C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.18, p. 55-81, 2006.

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: UFV, 2002. p.93-135.

DaMATTA, F.M.; RONCHI, C.P.; MAESTRI, M.; BARROS, R.S. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, p.485-510, 2007.

DAVIS, A.P.; GOLE, T.W.; BAENA, S.; MOAT, J. The impact of climate change on indigenous arabica coffee (*Coffea arabica*): Predicting future trends and identifying priorities. **PLoS One**, v. 7, n. 11, e47981, 2012.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

FANGMEIER, A.; GRÜTERS, U.; HÖGY, P.; VERMEHREN, B.; JÄGER, H.J. Effects of elevated CO₂, nitrogen supply, and tropospheric ozone on spring wheat – II. Nutrients (N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn). **Environmental Pollution**, v. 96, p. 43–59, 1997.

FANGMEIER, A.; TEMMERMAN, L.D.; BLACK, C.; PERSSON, K.; VORNE, V. Effects of elevated CO₂ and/or ozone on nutrient concentrations and nutrient uptake of potatoes. **European Journal of Agronomy**, v.17, 353-368, 2002.

FERNANDES, A.L.T.; PARTELLI, F.L.; BONOMO, R.; GOLYNSKI, A. A moderna cafeicultura dos cerrados brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 2, p. 231-240, 2012.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, p. 1039-1042, 2011.

FILHO, J.F.; SILVA, S.M.S.; SANTOS, V.F.; FREITAS, Z.M.T.S.; SANTOS, J.P.O.; SÁ, V.A.L. JÚNIOR, I.S.O. SOUSA, A.R. Produtividade de cafeeiros arábica sob irrigação complementar no Agreste Meridional de Pernambuco. **Pesquisa agropecuária Pernambuco**, v. 18, n. 1, p. 27-33, 2013.

FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, R.G.; FERRÃO, M.A.G.; VOLPI, P.S.; VERDIN FILHO, A.C.; FAZUOLI, L.C. **Cultivares de café robusta**. In: CARVALHO, C.H.S. de. (Ed.). Cultivares de café: origem, características e recomendações. Brasília-DF: Embrapa Café, 2008, v.1, p. 255-280.

FORTUNATO, A.; LIDON, F.C.; BATISTA-SANTOS, P.; LEITÃO, A.E.; PAIS, I.P.; RIBEIRO, A.I.; RAMALHO, J.C. Biochemical and molecular characterization of the antioxidative system of *Coffea* sp. under cold conditions in genotypes with contrasting tolerance. **Journal of Plant Physiology**, v. 167, p. 333–342, 2010.

GAY, C.; ESTRADA, F.; CONDE, C.; EAKIN, H.; VILLERS, L. Potential impacts of climate change on agriculture: a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. **Climatic Change**, v. 79, p. 259-288, 2006.

GUIMARÃES, P.T.G.; REIS, T.H.P. Nutrição e adubação do cafeeiro. In: REIS, P.R.; CUNHA, R.L. (eds) **Café Arábica do Plantio à Colheita**. EPAMIG, Lavras, M.G., Brazil, pp. 343–414, 2010.

HULUKA, G.; HILEMAN, D.R.; BISWAS, P.K.; LEWIN, K.F.; NAGY, J.; HENDREY, G.R. Effects of elevated CO₂ and water stress on mineral concentration of cotton. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 70, p. 141-152, 1994.

IDSO, S.B.; IDSO, K.E.; GARCIA, R.L.; KIMBALL, B.A.; HOOBER, J.K. Effects of atmospheric CO₂ enrichment and foliar methanol application on net photosynthesis of sour orange tree (*Citrus aurantium*; Rutaceae) leaves. **American Journal of Botany**, v. 82, p. 26-30, 1995.

IPCC. **Climate change 2013**: the physical science basis: summary for policymakers. Geneva: IPCC, 2013. 18p. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2013.

KIRSCHBAUM, M.U.F. Does enhanced photosynthesis enhance growth? Lessons learned from CO₂ enrichment studies. **Plant Physiological**, v. 155, p. 117-124, 2011.

LAMBERS, H.; CHAPIN, S.F.; PONS, T. **Plant Physiological Ecology**. Second edition. Springer. p. 604, 2008.

LEAKEY, A.D.B.; AINSWORTH, E.A.; BERNACCHI, C.J.; ROGERS, A.; LONG, S.P.; ORT, D.R. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, p. 2859-2876, 2009.

LEWIS, J.D., LUCASH, M., OLSZYK, D. AND TINGEY, D.T. Seasonal patterns of photosynthesis in seedlings during the third and fourth year of exposure to elevated CO₂ and temperature. **Plant, Cell and Environment**, v. 24, p. 539-548, 2001.

LIEFFERING, M.; KIM, H.Y.; KOBAYASHI, K.; AND OKADA, M. The impact of elevated CO₂ on the elemental concentrations of field-grown rice grains. **Field Crops Research**, v. 88, p. 279-286, 2004.

LIU, Y.; CAO, T.; GLIME, J.M. The Changes of Membrane Permeability of Mosses under High Temperature Stress. **The Bryologist**, v. 106, n. 1, p. 53-60, 2003.

LONG, S.P. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentrations: Has its importance been underestimated? **Plant, Cell and Environment**, v. 14, p. 729-739, 1991.

MA, T.; ZUAZAGA, G. Micro-Kjeldahl determination of nitrogen. A new indicator and an improved rapid method. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. **14**, n. 3, 280-282, 1942.

MALAVOLTA, E. **Informação agrônômica sobre nutrientes para as culturas**. In: NUTRIFATOS. Piracicaba, 1996. p. 01-24. (POTAFOS. Arquivo do Agrônomo, 10).

MANDERSCHIED, R., BENDER, J., JA"GER, H.-J., WEIGEL, H.J. Effects of season long CO₂ enrichment on cereals. II. Nutrient concentrations and grain quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 54, p. 75-185, 1995.

OSORIO, M.L.; OSORIO, J.; VIEIRA, A.C.; GONCALVES, S.; ROMANO, A. Influence of enhanced temperature on photosynthesis, photooxidative damage, and antioxidant strategies in *Ceratonia siliqua* L. seedlings subjected to water deficit and rewatering. **Photosynthetica**, v. 49, p. 03-12, 2011.

OVERDIECK, D. Elevated CO₂ and the mineral content of herbaceous and woody plants. **Vegetation**, v. 104, p. 403-411, 1993.

PARTELLI, F.L.; BATISTA-SANTOS, P.; CAMPOS, P.S.; PAIS, I.P.; QUARTIN, V.L.; VIEIRA, H.D.; RAMALHO, J.C. Characterization of the main lipid components of chloroplast membranes and cold induced changes in *Coffea* sp. **Environmental and Experimental Botany**, p. 74, p. 194-204, 2011.

PENUELAS, J.; MATAMALA, R. Variations in the mineral composition of herbarium plant species collected during the last three centuries. **Journal of Experimental Botany**, v. 44, p. 1523-1525, 1993.

RAMALHO, J.C.; CAMPOS, P.S.; QUARTIN, V.L.; SILVA, M.J.; NUNES, M.A. 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**, v. 154, p. 319–326, 1999.

RAMALHO, J.C.; FORTUNATO, A.S.; GOULAO, L.F.; LIDON, F.C. Cold-induced changes in mineral content in *Coffea* spp. Leaves - Identification of descriptors for tolerance assessment. **Biologia Plantarum**, v. 57, p. 495-506, 2013a.

RAMALHO, J.C.; REBELO, M.C.; SANTOS, M.E.; ANTUNES, M.L.; NUNES, M.A. Effects of calcium deficiency on *Coffea arabica* L.. Nutrient changes and correlation of calcium levels with some photosynthetic parameters. **Plant and Soil**, v. 172, p. 87-96, 1995.

RAMALHO, J.C.; RODRIGUES, A.P.; SEMEDO, J.N.; PAIS, I.; MARTINS, L.D.; SIMÕES-COSTA, M.C.; LEITÃO, A.E.; FORTUNATO, A.S.; BATISTA-SANTOS, P. PALOS, I.; M.A.TOMAZ, M.A.; SCOTTI-CAMPOS, P.; LIDON, F.C.; DaMATTa, F.M. Sustained photosynthetic performance of *Coffea* spp. under long-term enhanced [CO₂]. **PLoS ONE**, v. 12, n. 08, e82712, 2013b.

REEVES, D.W.; ROGERS, H.H.; PRIOR, S.A.; WOOD, C.W.; RUNION, G.B. Elevated atmospheric carbon dioxide effects on sorghum and soybean nutrient status. **Journal of Plant Nutrition**, v. 17, p. 1939-1954, 1994.

REICH, P.B.; OLEKSYN, J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. **PNAS**, v. 101, n. 30, p. 11001-11006, 2004.

RENNENBERG, H.C.; HERSCHBACH, K.; HABERER, A.; KOPRIVA, S. Sulfur metabolism in plants: are trees different? **Plant Biology**, v. 9, p. 620-637, 2007.

ROBERTZ, P.; LINDER, S. Effects of long-term CO₂ enrichment and nutrient availability in Norway spruce. II. Foliar chemistry. **Trees**, v. 14, p. 17–27, 1999.

SAGE, R.F. Acclimation of photosynthesis to increasing atmospheric CO₂: The gas exchange perspective. **Photosynthesis Research**, v. 39, p. 351-368, 1994.

SCOTTI-CAMPOS, P; PAIS, I.P.; PARTELLI, F.L.; BATISTA-SANTOS, P.; RAMALHO, J.C. Phospholipids profile in chloroplasts of *Coffea* spp. genotypes differing in cold acclimation ability. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, p. 243–249, 2014.

SHEU, B.H.; LIN, C.K. Photosynthetic response of seedlings of the sub-tropical tree *Schima superba* with exposure to elevated carbon dioxide and temperature. **Environmental and experimental botany**, v. 41, p. 57-65, 1999.

SILVA, E.A.; DA MATTA, F.M.; DUCATTI, C.; REGAZZI, A.J.; BARROS, R.S. Seasonal changes in vegetative growth and photosynthesis of Arabica coffee trees. **Field Crops Research**, v.89, p.349-357, 2004.

SINGSAAS, E.L.; LERDAU, M.; WINTER, K.; SHARKEY, T.D. Isoprene increases thermotolerance of isoprene-emitting species. **Plant Physiology**, v. 115, p. 1413-1420, 1997.

TAUB, D.R.; WANG, X. Why are nitrogen concentrations in plant tissues lower under elevated CO₂? A critical examination of the hypotheses. **Journal of Integrative Plant Biology**, v.50, n. 11, p. 65-74, 2008.

TEIXEIRA, A.L.; SOUZA, F.F.; PEREIRA, A.A.; OLIVEIRA, A.C.B. ROCHA, R.B. Performance of arabica coffee cultivars under high temperature conditions. **African Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 33, p. 4402-4407, 2013.

THIEC, D.L.; DIXON, M.; LOOSVELDT, P.; GARREC. J.P. Seasonal and annual variations of phosphorus, calcium, potassium and manganese contents in different cross-sections of *Picea abies* (L.) Karst. needles and *Quercus rubra* L. leaves exposed to elevated CO₂. **Trees**, v.10, p. 55-62, 1995.

WARAICH, E.A; AHMAD, R.; HALIM, A.; AZIZ, T. Alleviation of temperature stress by nutrient management in crop plants: a review. **Journal of soil science and plant nutrition**, v.12, n.2, p. 221-244, 2012.

WERTIN, T.M.; MCGUIRE, M.A.; VAN IERSEL, M.; RUTER, J.M.; TESKEY, R.O. Effects of elevated temperature and [CO₂] on photosynthesis, leaf respiration, and biomass accumulation of *Pinus taeda* seedlings at a cool and a warm site within the species' current range. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 42, p. 943-957, 2012.

XU, Z.Z.; ZHOU, G.S. Combined effects of water stress and high temperature on photosynthesis, nitrogen metabolism and lipid peroxidation of a perennial grass *Leymus chinensis*. **Planta**, v. 224, n. 5, p. 1080-1090, 2006.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE SISTEMÁTICA INDICA ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO E ADAPTAÇÃO À VULNERABILIDADE CLIMÁTICA EM *Coffea canephora*

RESUMO

O café é a segunda commodity mais comercializada a nível mundial, sendo que atualmente muita atenção tem se voltado para o café robusta (*C. canephora* Pierre ex A. Froehner) principalmente por apresentar maior tolerância a eventos climáticos extremos comparado ao arábica. Apesar desta constatação, poucos trabalhos foram desenvolvidos com objetivo de discriminar a vulnerabilidade climática em regiões prioritariamente produtoras de café robusta. Neste trabalho, nosso objetivo foi analisar variáveis climáticas históricas de forma espacial e temporal para caracterização da vulnerabilidade climática de microrregiões na busca de estratégias de mitigação e adaptação que possam subsidiar a melhoria dos sistemas de produção de plantas de café conilon. O estudo de caso foi realizado na maior região de produção de café robusta do mundo, situado geograficamente entre os meridianos 39°38' e 41°50' de longitude Oeste e os paralelos 17°52' e 21°19' de latitude Sul. A vulnerabilidade foi caracterizada (dados históricos de 30 anos) pela variação espacial e temporal da temperatura máxima, média e mínima do ar, amplitude térmica do ar, precipitação pluvial e sazonalidade da precipitação pluvial, componentes do balanço hídrico climatológico, altitude, tipos de solo e área plantada com café robusta. A escolha das estratégias de mitigação e adaptação foram baseadas em critérios amplamente validados. Os resultados indicam que a vulnerabilidade em áreas de cultivo de café robusta está ligada a alta temperatura do ar, ao baixo índice de precipitação pluvial, a sazonalidade da precipitação pluvial e ao déficit hídrico. As estratégias de adaptação e mitigação de maior potencial apontam para o plantio de clones melhorados de café robusta, para a utilização de sistemas de policultivos, arborizados e sombreados, para o adensamento de plantas de café conilon, para implantação de sistemas de irrigação e para a utilização de manejo de plantas espontâneas.

ABSTRACT

Coffee is one of the world most traded agricultural commodities. Currently, a great deal of attention has been highlighted on Robusta coffee (*C. canephora* Pierre ex A. Froehner) because it seems to evince a greater tolerance to extreme climatic events than Arabic coffee (*C. arabica*

L.). Despite this, only a few works have been developed aimed at discriminating the climatic vulnerability in regions which prioritize robust coffee production. The aim of this work was to analyze historical climatic variables in space and time for the characterization of climatic vulnerability of micro-regions, in search of mitigation and adaptation, which might support the improvement of production systems of *C. canephora* cv. Conilon coffee trees. The case study was carried out for one of the largest production regions of Robusta coffee of the world, in Brazil, geographically located between the 39°38' and 41°50' West longitude meridians and the 17°52' and 21°19' parallels of South latitude. The sensitivity was characterized (30 years historical data) by the space and time variation of maximum, mean and minimum air temperature, rainfall and rainfall seasonal pattern, elements of balance, hydric climatological altitude, types of soil and area planted with Robusta coffee. The choice of mitigation and adaptation were based on widely validated criteria. The results show that the vulnerability of Robusta coffee crop is related to the high temperature of the air, the low index of rainfall, the rainfall season ability and the hydric deficit. The strategies of greater potential adaptation and mitigation point out the planting of improved clones of Robusta coffee, for the utilization of polyharvest systems, arbored and shaded, the plant density, the implementation of irrigation systems and the management of spontaneous plants.

INTRODUÇÃO

O gênero *Coffea* inclui pelo menos 124 espécies, das quais *Coffea arabica* L. e *C. canephora* Pierre ex A. Froehner são as mais relevantes em termos econômicos, pois são responsáveis por cerca de 99% da produção mundial de café (Davis et al., 2011). Nos últimos anos, a produção de café tem estado acima das 8 milhões de toneladas de café beneficiado (ca. 8,7 em 2012/2013), provenientes principalmente de países da América do Sul, América Central e Ásia (ICO, 2014a), estimando-se que a cadeia de valor do café gere receitas globais de ca. US\$ 173,4 mil milhões (ICO, 2014b).

Alguns países tradicionais produtores de café poderão ver a quantidade e qualidade da sua produção de café diminuir drasticamente nas próximas décadas por causa de aumento dos riscos de eventos climáticos extremos, principalmente as altas temperaturas do ar e a precipitação pluvial inferior e irregular ao recomendável (Eakin et al., 2006; Schroth et al., 2009; Tucker et al. 2010; Davis et al., 2012; Baca et al., 2014), além de alterações nas pressões de pragas e doenças (Ghini et al., 2008; Jaramillo et al. 2009; Moraes et al., 2012; Mendes et al., 2012). Este fato está ligado, parcialmente, a evidências de vulnerabilidade climática em

áreas de cultivo de café, especialmente no caso de regiões onde eventos climáticos extremos se tornam mais frequentes e intensos (IPCC, 2013) por isso, numerosos estudos indicam estratégias de adaptação e mitigação aos impactos atuais e futuros advindos da mudança do clima (Eakin, 2005; Gay et al., 2006; Schroth et al., 2009; Morales et al., 2010; Läderach et al., 2010; Lin, 2010; Hagggar e Schepp, 2012; Rahn et al., 2013; Eakin et al., 2014).

As estratégias de mitigação e adaptação a vulnerabilidade climática em áreas produtoras de café que mostram os mais altos potenciais abordam questões relativas ao (i) aumento o sequestro de carbono ou redução da pegada de carbono do produto; (ii) ao desenvolvimento e plantio de variedades tolerantes; (iii) a modificações dos sistemas de cultivo; (iv) a diminuição da dependência de insumos sintéticos e combustíveis fósseis e até (v) a transição e mobilidade das áreas de cultivo (Assad et al., 2004; Schroth et al., 2009; Morales et al., 2010; Läderach et al., 2010; Hagggar e Schepp, 2012; Rahn et al., 2013; Eakin et al., 2014; Rikxoort et al., 2014). Porém, a maioria destes esforços tem sido realizados em regiões entre 0° a 30° de latitude Norte, marcadamente em países de America e África Central e parte da Ásia, em regiões que predomina a produção de café arábica (Schroth et al., 2009; Rahn et al 2013; Jaramillo et al. 2009; Baca et al., 2014). Existem poucos relatos sobre estratégias de mitigação e adaptação à vulnerabilidade climática em regiões produtoras de café robusta situadas entre 0° a 30° de latitude Sul, sendo a maioria baseado em modelos de previsão de mudanças climáticas (Assad et a., 2004; Ghini et al., 2008; Mendes et al., 2012; Bragança, 2012).

Atualmente, tem sido evidenciado elevado interesse em café robusta (*ca.* 40% do mercado mundial), pelo fato do aumento do consumo de cafés solúveis e de blends e pela oscilação da produção mundial de café arábica resultante de eventos adversos do clima (BICC, 2014), e principalmente por apresentar maior tolerância a eventos climáticos comparado ao café arábica (DaMatta e Ramalho, 2006; Ramalho et al., 2013; Martins et al., 2014). Esta melhor tolerância pode estar ligada ao fato do café robusta ser nativo de uma vasta região de floresta equatorial densa que se estende da bacia do rio Congo até o Lago Vitória em Uganda com altitude, respectivamente, entre o nível do mar até 1.200 m. Nesta região, a temperatura média do ar situa-se entre 23 e 26 °C com precipitação superior a 2.000 milímetros distribuídas ao longo de 9 a 10 meses (Coste, 1992). O café robusta tem apresentado crescimento satisfatório em áreas entre o nível do mar e 800 m de altitude, com temperatura média anual ideal variando entre 22 a 26 °C (Matiello, 1991), não suportando extremos, como altas temperaturas, especialmente se o ar é seco (Coste, 1992) e temperaturas abaixo de 5-6 °C ou longos períodos abaixo de 15 °C (Willson, 1999). A faixa de precipitação anual ideal varia entre 1200-1800 mm (Coste, 1992),

porém, um curto período de seca, com duração de 2-4 meses, correspondentes à fase de repouso e crescimento vegetativo, é importante para desencadear o florescimento (Maestri e Barros, 1977).

O café robusta tem sido cultivado na República do Congo, Angola, Madagascar, Costa do Marfim, Vietnã, Indonésia, Uganda e no Brasil (Camargo, 2010). No Brasil, os principais cultivos estão em planícies do Estado do Espírito Santo (Sudeste) e do Estado de Rondônia (Norte). O Estado do Espírito Santo é considerado a maior região produtora de café robusta do mundo, sendo responsável por 20% da produção mundial, com uma área cultivada de *ca.* 303.000 hectares, em cerca de 40 mil propriedades, envolvendo *ca.* 78 mil famílias de produtores, gerando mais de 250 mil empregos diretos e com faturamento na safra de 2012/2013 em torno de *ca.* US\$ 860 milhões (IBGE, 2013).

Em conjunto, foi possível constatar que diversos trabalhos têm apresentado dados consistentes ligados à vulnerabilidade climáticas em regiões acima da linha do equador, prioritariamente destinadas ao cultivo de café arábica ou que cultivam ambos (arábica e robusta), com propósito de apontar estratégias de mitigação e adaptação ou simulando impactos climáticos futuros; por fim a literatura apresenta poucos ou nenhum trabalho que aborde temas semelhantes para regiões de cultivo de café robusta abaixo da linha do equador. Os objetivos deste estudo foram (1) analisar variáveis climáticas históricas de forma espacial e temporal (2) para caracterização da vulnerabilidade climática de microrregiões (3) na busca de estratégias de mitigação e adaptação que possam subsidiar a melhoria dos sistemas de produção de plantas de *C. canephora* Pierre ex A. Froehner

MATERIAL E MÉTODOS

Estudo de caso e dados climáticos

A área de estudo compreende o Estado do Espírito Santo (46.184,1 km²) situado geograficamente entre os meridianos 39°38' e 41°50' de longitude Oeste e os paralelos 17°52' e 21°19' de latitude Sul (Figura 1). A estratificação geográfica da área plantada com *C. canephora* Pierre ex A. Froehner (ha) foi realizada com base no censo agropecuário 2012/2013 (IBGE, 2013) e a estratificação das classes de solo predominantes foram obtidas pelo mapa digital de solos (escala 1:5.000.000) (EMBRAPA, 2013).

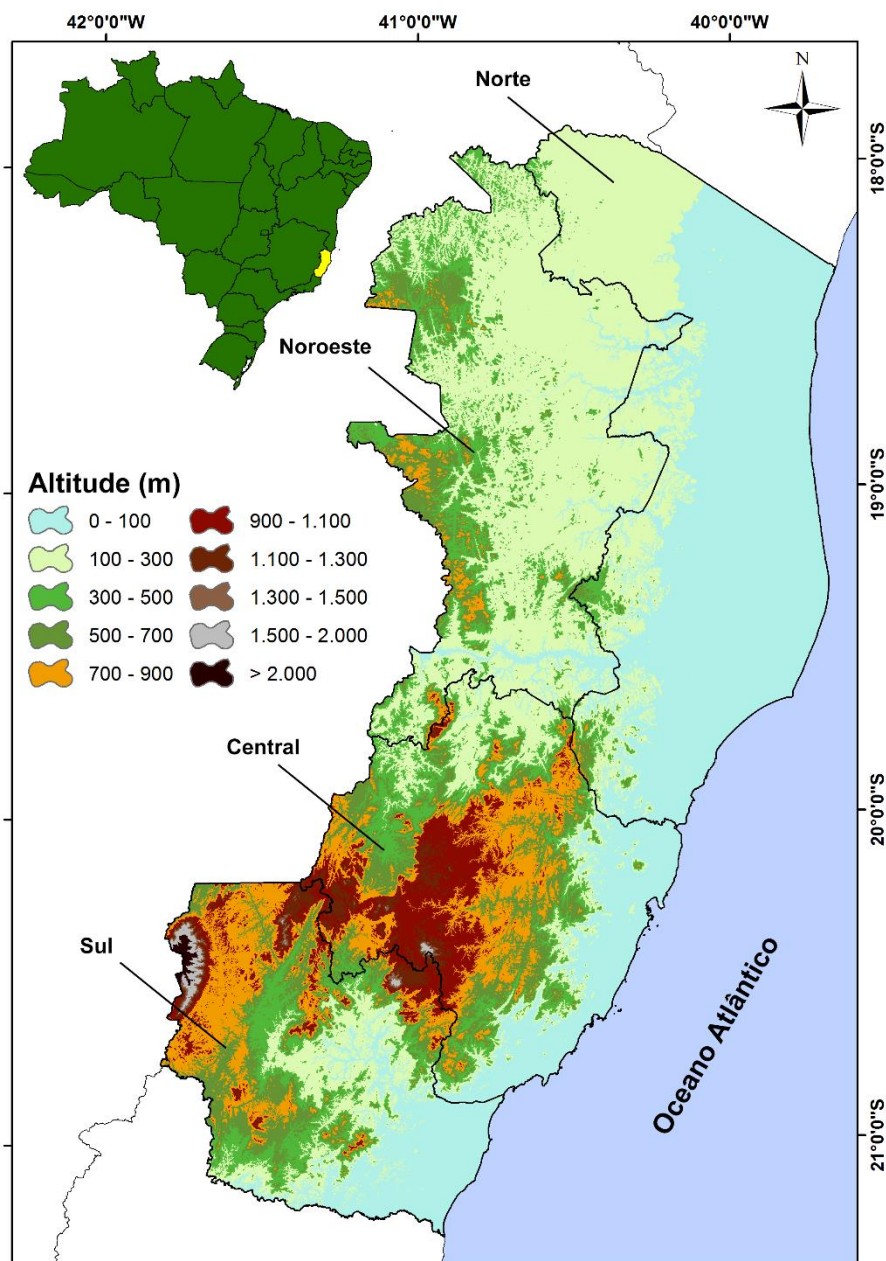


Figura 1. Localização geográfica, descrição e altitude da área de estudo. A área de estudo (46.184,1 km²) está localizada na Região Sudeste do território Brasileiro, tendo como limites o Oceano Atlântico a Leste, o Estado da Bahia a Norte, o Estado de Minas Gerais a Oeste e o Estado do Rio de Janeiro a Sul, entre os meridianos 39°38' e 41°50' de longitude Oeste e os paralelos 17°52' e 21°19' de latitude Sul (Projeção Universal Transversa de Mercator; Elipsóide SIRGAS 2000, zona 24 S). A altitude foi obtida com modelo digital de elevação (90 x 90 metros; escala 1:250.000 e projeção cartográfica WGS84) obtido pelo projeto *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM (Miranda, 2005) variando de zero metros (acerca do mar) até aproximadamente 2.800 metros (sudeste) (veja legenda interna).

Foram utilizados dados climáticos provenientes de séries históricas (1983-2013) de temperaturas do ar e precipitação pluvial em escala mensal, coletados em 110 pontos de medição, sendo 11 pertencentes à rede de estações meteorológicas do Instituto Capixaba de Pesquisas e Extensão Rural (INCAPER), três ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e 80 pertencentes à Agência Nacional de Águas (ANA). Para minimizar o efeito de borda no processo de interpolação foram adotados outros 16 postos pluviométricos (ANA) localizados fora da área de estudo, com objetivo de favorecer as interpolações estatísticas. Todas as operações foram baseadas nos pontos localizados no Estado do Espírito Santo e em áreas limítrofes.

Espacialização da temperatura do ar e da precipitação pluvial

As espacializações das temperaturas do ar mínimas, médias e máximas mensais foram realizadas aplicando álgebra de mapas, tendo como entrada equações de regressões lineares múltiplas, com coeficientes predeterminados (Castro et al., 2010a) e variáveis independentes representadas pelas imagens matriciais de altitude (MDE/SRTM) e por coordenadas *UTM X* e *Y*, conforme demonstrado abaixo:

$$T = \beta_0 + \beta_1 ALT + \beta_2 X + \beta_3 Y$$

Em que,

T : temperatura (°C);

ALT : altitude (m);

X : coordenada *UTM X* (m);

Y : coordenada *UTM Y* (m);

β_0 : constante de regressão;

β_1, β_2 e β_3 : coeficientes de regressão para as variáveis *ALT, X e Y* .

As imagens matriciais das coordenadas *UTM X* e *Y* foram processadas pela técnica geoestatística de interpolação espacial por tendência com base nas coordenadas *UTM X* e *Y* da imagem vetorial pontual representativa das estações meteorológicas. O modelo digital de elevação (90 x 90 metros) possui escala de 1:250.000 na projeção cartográfica WGS84 (Miranda, 2005) obtido pelo projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). A

espacialização da amplitude térmica mensal foi obtida por técnica de análise espacial pelo método de álgebra de mapas obtendo a diferença entre os mapas de temperaturas máximas e mínimas do ar.

A espacialização da precipitação pluvial média mensal foi realizada por técnica geoestatística de interpolação espacial por krigagem utilizando modelo esférico (janeiro, fevereiro, março e agosto), linear (abril, maio, junho, julho, setembro, novembro e dezembro) e exponencial (outubro) conforme determinado anteriormente com elevada confiabilidade e ajuste estatístico (Pirovani, 2014).

Balanco hídrico climatológico e sazonalidade da precipitação pluvial

O balanço hídrico climatológico foi realizado para cada região (sul, central, noroeste e norte) com base em dados climáticos de temperatura média do ar, precipitação pluvial média e latitude média, adotando a capacidade de água disponível de 100 mm (Thorntwaite e Matter, 1955). A sazonalidade da precipitação pluvial foi obtida para cada região (sul, central, noroeste e norte) com base na dispersão dos dados climáticos de precipitação pluvial (mediana, percentil 25 e 75, máximo e mínimo) e expressos em modelo boxplot (Ferrant et al., 2014).

A espacialização da deficiência hídrica anual e da evapotranspiração potencial anual foi realizada por técnica geoestatística de interpolação espacial por krigagem utilizando, respectivamente, o modelo exponencial e esférico (Castro et al., 2010b).

Caracterização da vulnerabilidade

A vulnerabilidade foi caracterizada de acordo com as faixas de aptidão térmica (temperatura média anual) e hídrica (deficiência hídrica anual) para ao cultivo de café conilon, sendo classificado como adequado ($22,5 \leq Ta \leq 24,0$ °C e $DHa \leq 200$ mm), restrita ($20,0 \leq Ta < 22,5$ °C; $200 \text{ mm} < DHa < 400$ mm) e inadequado ($Ta < 20$ °C e $Ta > 24,0$ °C; $DHa \geq 400$ mm) (Matiello, 1991). Além destas, foram utilizados: altitude, precipitação pluvial, tipos de solo, amplitude térmica, temperatura máxima do ar, temperatura mínima do ar e componentes do balanço hídrico climatológico.

Estratégias de mitigação e adaptação

As práticas potenciais de mitigação e adaptação, baseadas em critérios amplamente validados (Eakin, 2005; Gay et al., 2006; Schroth et al., 2009; Morales et al., 2010; Camargo, 2010; Läderach et al., 2010; Lin, 2010; Hagggar e Schepp, 2012; Jesus Junior et al., 2012; Rahn

et al., 2013; Eakin et al., 2014) foram escolhidas com base no seu potencial de (i) mitigar os impactos negativos do clima, (ii) contribuir para a adaptação à futuros cenários climáticos, (iii) aumentar o sequestro de carbono ou reduzir a pegada de carbono do produto e (iv) potencial de contribuição conforme identificado na avaliação de vulnerabilidade. Além destes aspectos, assegurou que as atividades de adaptação e mitigação priorizadas possam oferecer maiores benefícios para a subsistência local.

Análise dos dados

As falhas de registros da precipitação pluvial foram estimadas por ponderação regional de valores referentes aos três pontos próximos (Bertoni e Tucci, 2002; Castro et al., 2010b). A utilização do modelo de geostatística de interpolação espacial foi baseada no coeficiente de determinação da validação cruzada, na raiz do erro médio quadrático, no índice de concordância, no índice de confiança, no coeficiente de eficiência ajustado, no erro médio absoluto e no erro médio percentual (ver Pirovani, 2014). Todas as espacializações foram realizadas utilizando o aplicativo computacional *ArcGIS*[®] (versão 10.2, ESRITM).

Os dados climáticos para a realização do balanço hídrico climatológico, estratificação do balanço hídrico climatológico e da sazonalidade da precipitação pluvial foram agrupados para as regiões (sul, central, noroeste e norte) e analisados estatisticamente para a verificação da normalidade (Kolmogorov-Smirnov, nível de significância de 0,05) pelo programa computacional Genes (Cruz, 2013).

RESULTADOS

Área plantada com *Coffea canephora*

A estratificação do plantio de *Coffea canephora* (crop season 2012/2013) mostra que a região noroeste possui aproximadamente 42% (127.888 ha) da área plantada (Figura 2), com o município de Vila Valério (referência de 18°59' S 40°23' W, 238 m altitude) sendo o maior produtor atual de café conilon no mundo (safra 2012/2013) com produção estimada em 44.550 toneladas de grãos com valor de aproximadamente US\$ 73.798 mil (IBGE, 2012). A região norte possui a segunda maior área planta com aproximadamente 37% (111.030 ha) com destaque para o município de Jaguaré com aproximadamente 19.000 ha (referência de 18°54' S 40°04' W, 70 m altitude). A região central (38.974 ha) e sul (25.174 ha) possuem menor expressão, com respectivamente, 13% e 8% da área plantada (Figura 2).

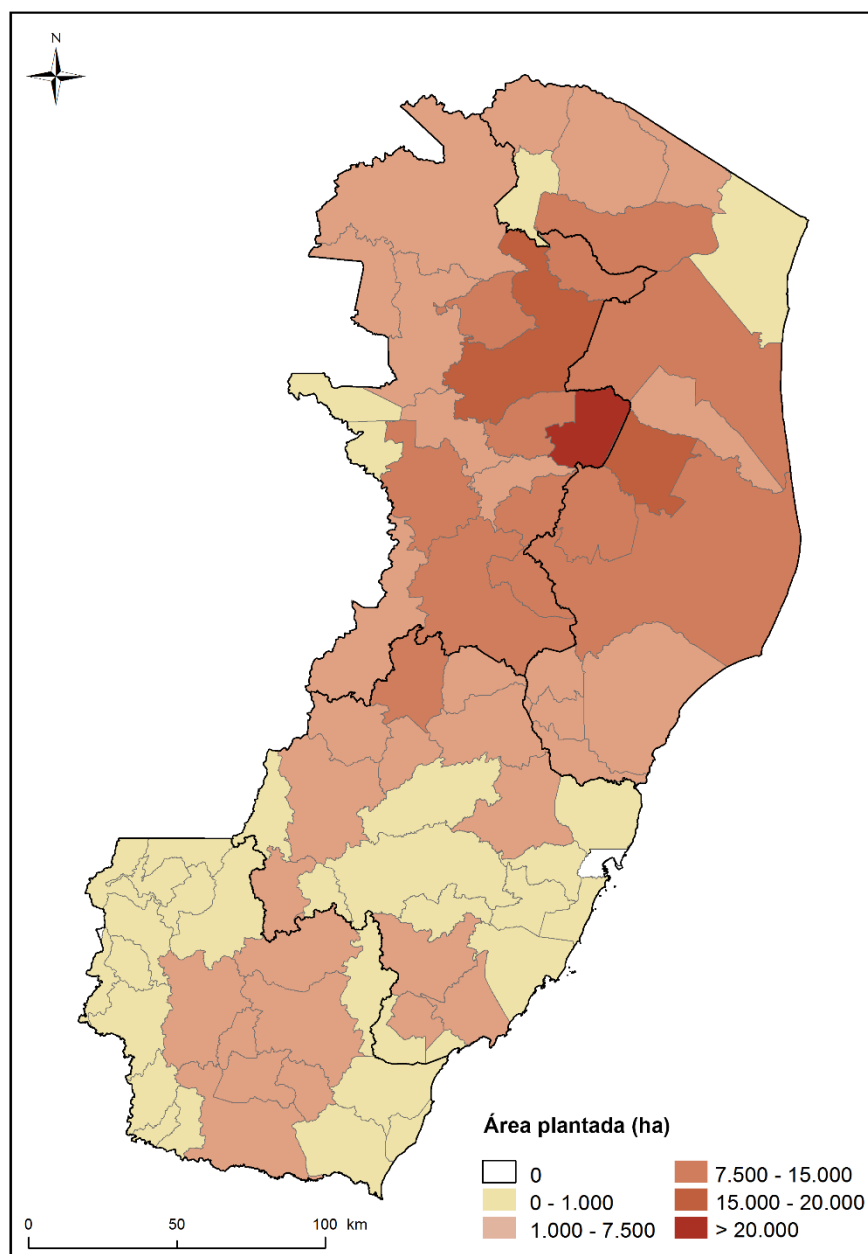


Figura 2. Estratificação da área plantada com *Coffea canephora*. Área plantada (ha) com *Coffea canephora* com base no censo agropecuário 2012/2013 (IBGE, 2012), situada geograficamente entre os meridianos 39°38' e 41°50' de longitude Oeste e os paralelos 17°52' e 21°19' de latitude Sul (Projeção Universal Transversa de Mercator; Elipsóide SIRGAS 2000, zona 24 S). Os valores de predição para cada localidade (sul, central, noroeste e norte) são representados por cor (veja legenda interna).

Variações da temperatura do ar

Verifica-se na espacialização dos valores mensais da temperatura média, máxima e mínima do ar (respectivamente Figura 3, 4 e 5) variabilidade espacial e temporal sob influência

marcante da altitude (Figura 1). A espacialização temporal indica valores de temperatura média do ar acima de 24 °C entre outubro e abril, identificado espacialmente, em áreas de menor altitude, marcadamente a região norte e noroeste, e a região sul e central a cerca do mar (Figura 3).

A tendência espacial observada para valores de temperatura média do ar também é evidente para os valores de temperatura máxima e mínima do ar (respectivamente Figura 4 e 5), havendo apenas modificações temporais. Foram observados valores de temperatura máxima do ar acima dos 28 °C entre os meses de outubro a maio (Figura 4) para regiões de menor altitude e, contrariamente, valores de temperatura mínima do ar abaixo de 12 °C entre os meses de maio a agosto (Figura 5), em áreas de maior altitude (> 700 m).

A espacialização da amplitude térmica do ar (Figura 6) também indicou variabilidade espacial e temporal sob influência marcante da longitude e, claramente, da temperatura máxima e mínima do ar (respectivamente Figura 4 e 5). Espacialmente a amplitude térmica é menor a cerca do mar, com amplitudes inferiores a 8 °C, com tendência de incremento a oeste, com amplitudes próximas a 13 °C (entre 12-14 °C a oeste). A caracterização temporal mostra predomínio de amplitude termal acima de 10 °C entre os meses de janeiro a setembro e abaixo de 10 °C entre os meses outubro a dezembro (Figura 6).

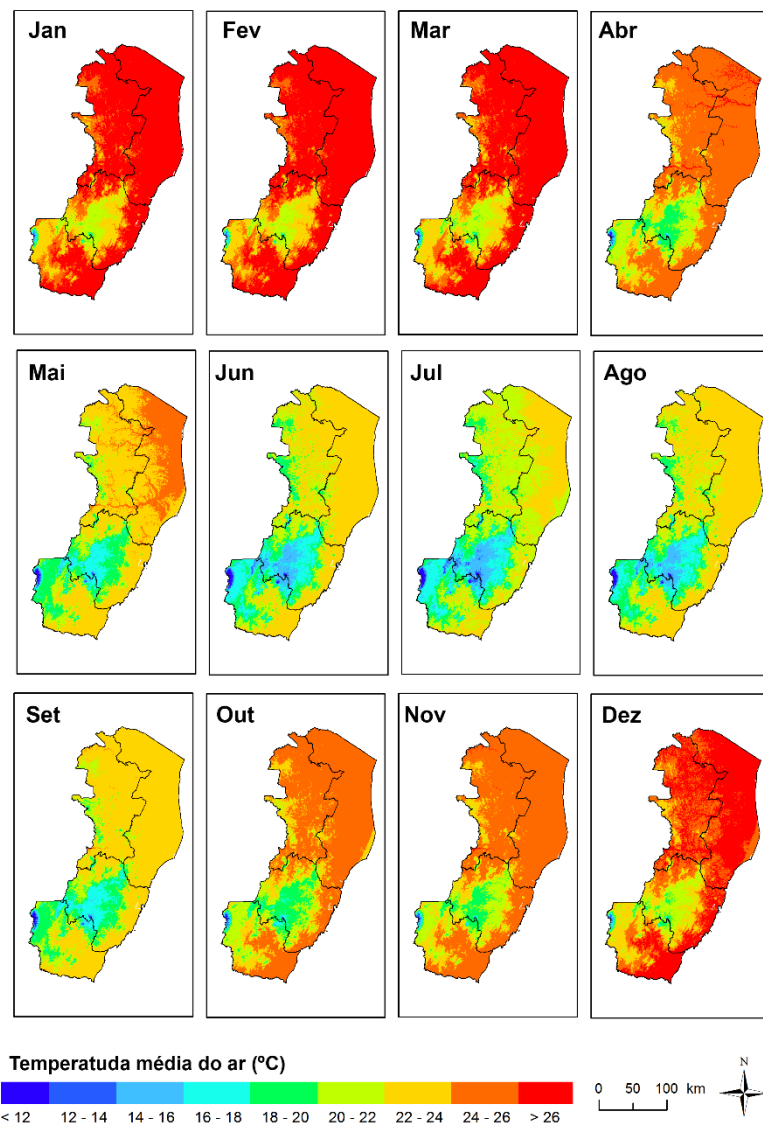


Figura 3. Espacialização dos valores mensais da temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), situada geograficamente entre os meridianos $39^{\circ}38'$ e $41^{\circ}50'$ de longitude Oeste e os paralelos $17^{\circ}52'$ e $21^{\circ}19'$ de latitude Sul (Projeção Universal Transversa de Mercator; Elipsóide SIRGAS 2000, zona 24 S). Variação mensal (janeiro a dezembro) da temperatura média do ar (pixel 90×90 m) obtida com álgebra de mapa utilizando equações de regressões lineares múltiplas, com base em dados climáticos históricos (1983-2013). Variáveis independentes representadas pelas imagens matriciais de altitude (MDE/SRTM) e por coordenadas *UTM X* e *Y* e coeficientes β_0 , β_1 , β_2 e β_3 predeterminados ($R^2 \geq 0,9$) (Castro et al., 2010a). Os valores de predição para cada localidade (sul, central, noroeste e norte) são representados por cor (veja legenda interna) com valores baixos marcadas em azul intenso (< 12 $^{\circ}\text{C}$) e altos marcados em vermelho (> 26 $^{\circ}\text{C}$). Veja o texto principal para obter mais detalhes.

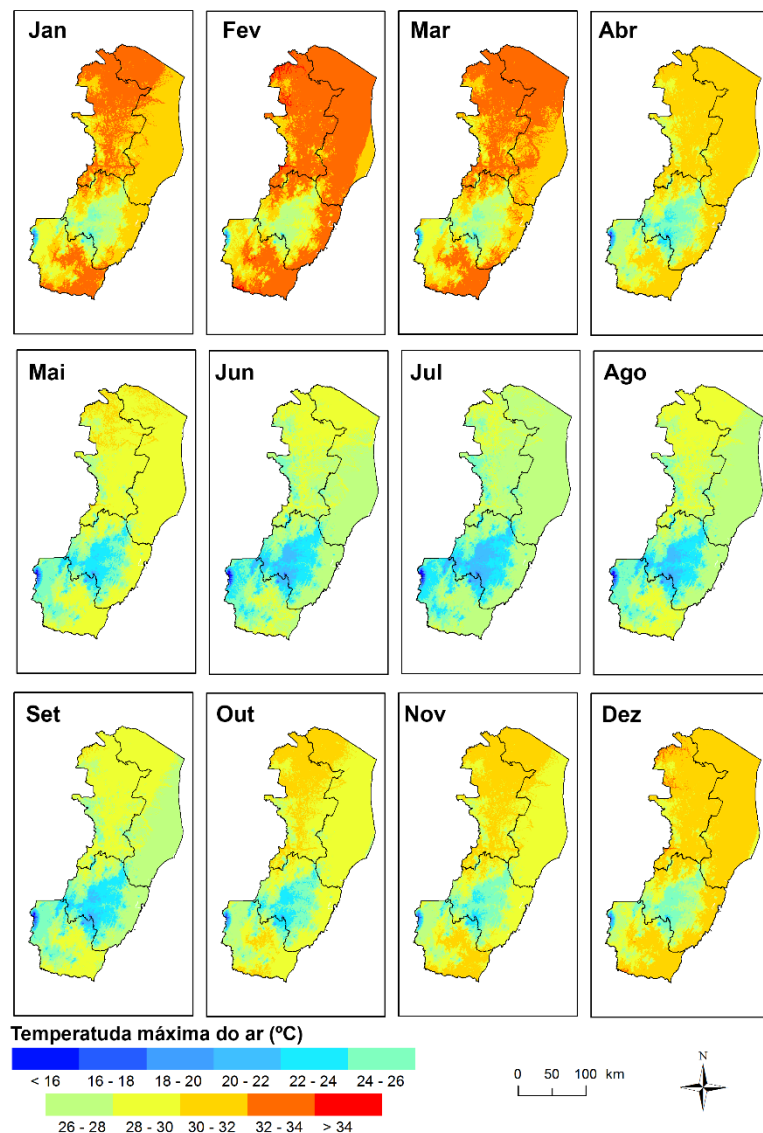


Figura 4. Espacialização dos valores mensais da temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$), situada geograficamente entre os meridianos $39^{\circ}38'$ e $41^{\circ}50'$ de longitude Oeste e os paralelos $17^{\circ}52'$ e $21^{\circ}19'$ de latitude Sul (Projeção Universal Transversa de Mercator; Elipsóide SIRGAS 2000, zona 24 S). Variação mensal (janeiro a dezembro) da temperatura máxima do ar (pixel 90×90 m) obtida com álgebra de mapa utilizando equações de regressões lineares múltiplas, com base em dados climáticos históricos (1983-2013). Variáveis independentes representadas pelas imagens matriciais de altitude (MDE/SRTM) e por coordenadas *UTM X* e *Y* e coeficientes β_0 , β_1 , β_2 e β_3 predeterminados ($R^2 \geq 0,9$) (Castro et al., 2010a) com base em dados climáticos históricos (1983-2013). Os valores de predição para cada localidade (sul, central, noroeste e norte) são representados por cor (veja legenda interna) com valores baixos marcadas em azul intenso (< 16 $^{\circ}\text{C}$) e altos marcados em vermelho (> 34 $^{\circ}\text{C}$). Veja o texto principal para obter mais detalhes.

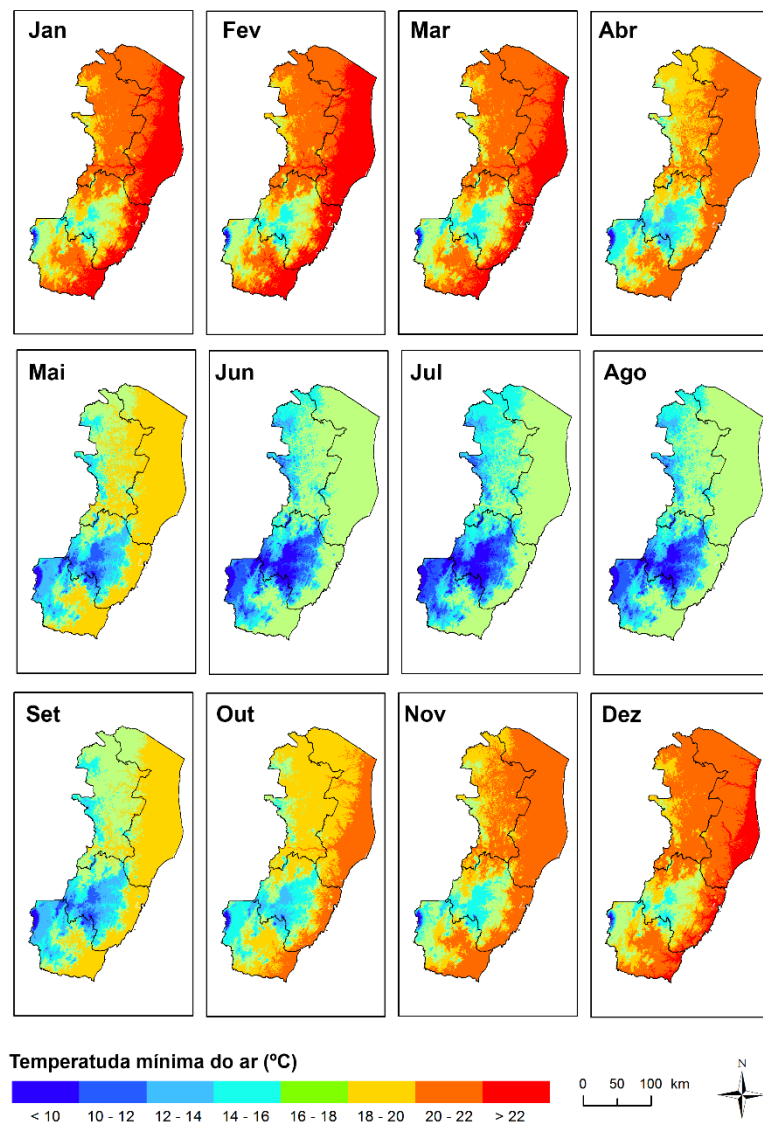


Figura 5. Espacialização dos valores mensais da temperatura mínima do ar (°C), situada geograficamente entre os meridianos 39°38' e 41°50' de longitude Oeste e os paralelos 17°52' e 21°19' de latitude Sul (Projeção Universal Transversa de Mercator; Elipsóide SIRGAS 2000, zona 24 S). Variação mensal (janeiro a dezembro) da temperatura mínima do ar (pixel 90 x 90 m) obtida com álgebra de mapa utilizando equações de regressões lineares múltiplas. Variáveis independentes representadas pelas imagens matriciais de altitude (MDE/SRTM) e por coordenadas *UTM X* e *Y* e coeficientes β_0 , β_1 , β_2 e β_3 predeterminados ($R^2 \geq 0.9$) (Castro et al., 2010a) com base em dados climáticos históricos (1983-2013). Os valores de predição para cada localidade (sul, central, noroeste e norte) são representados por cor (veja legenda interna) com valores baixos marcadas em azul intenso (< 10 °C) e altos marcados em vermelho (> 22 °C). Veja o texto principal para obter mais detalhes.

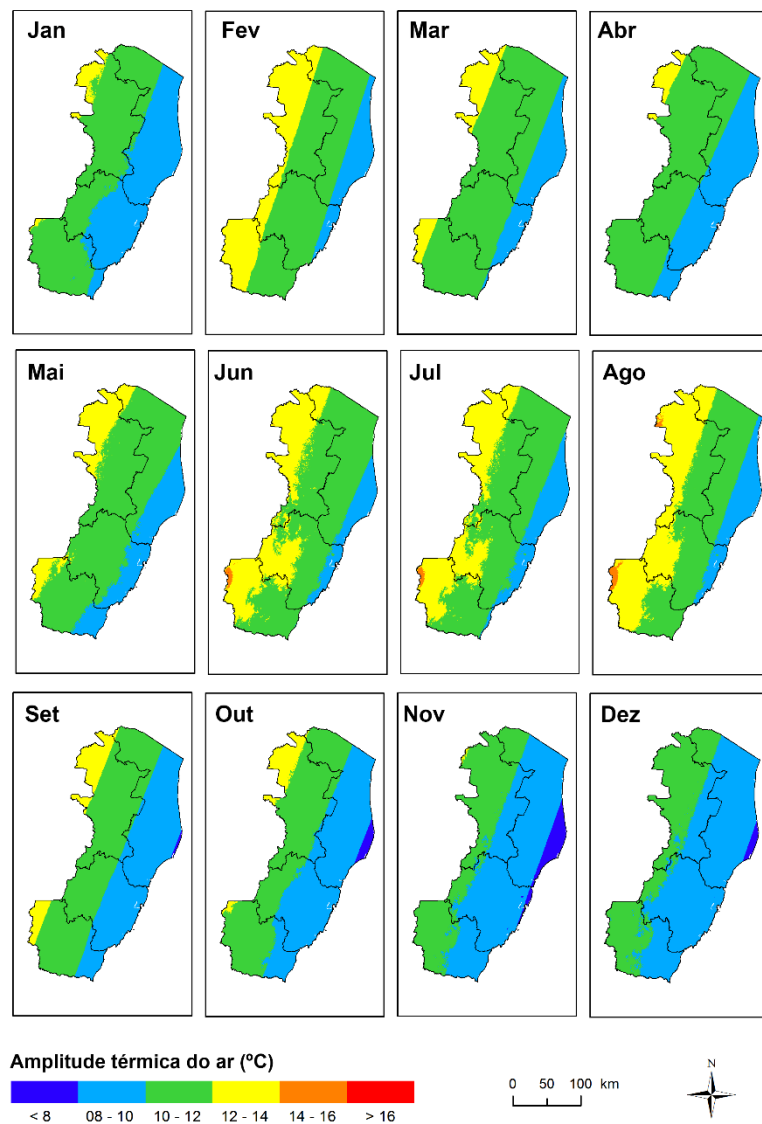


Figura 6. Espacialização dos valores mensais de amplitude térmica do ar ($^{\circ}\text{C}$), situada geograficamente entre os meridianos $39^{\circ}38'$ e $41^{\circ}50'$ de longitude Oeste e os paralelos $17^{\circ}52'$ e $21^{\circ}19'$ de latitude Sul (Projeção Universal Transversa de Mercator; Elipsóide SIRGAS 2000, zona 24 S). Variação mensal (janeiro a dezembro) da amplitude térmica do ar (pixel $90 \times 90 \text{ m}$) obtida por técnica de análise espacial pelo método de álgebra de mapas obtendo a diferença entre os mapas de temperaturas do ar máximas e mínimas, com base em dados climáticos históricos (1983-2013). Os valores de predição para cada localidade (sul, central, noroeste e norte) são representados por cor (veja legenda interna) com valores baixos marcadas em azul intenso ($< 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e altos marcados em vermelho ($> 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Veja o texto principal para obter mais detalhes.

Variações da precipitação pluvial

O comportamento temporal aponta elevado índice de precipitação pluvial (> 125 mm) concentrados entre os meses de novembro a março (exceto fevereiro) e redução dos índices (< 75 mm) entre maio e setembro, sendo que abril e setembro figuram períodos de transição, típicos de zonas tropicais (Figura 7). Para o comportamento espacial, há uma tendência que aponta para relação entre períodos de elevado índice de precipitação pluvial em áreas de baixa altitude e, contrariamente, períodos com baixos índices de precipitação pluvial em áreas de maior altitude (Figura 7). Este fato pode ser explicado, pelo menos parcialmente, pela influência de fenômeno meteorológico denominado Zona de Convergência do Atlântico Sul.

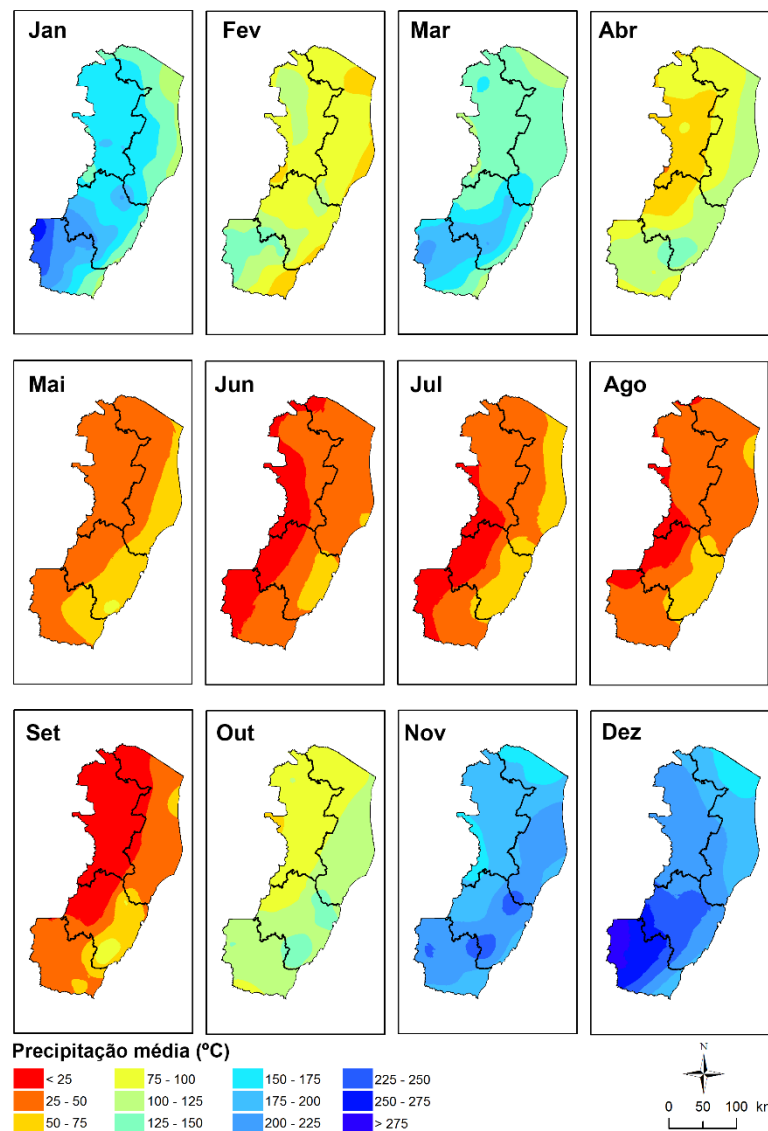


Figura 7. Espacialização dos valores médios mensais da precipitação pluvial (mm), situada geograficamente entre os meridianos 39°38' e 41°50' de longitude Oeste e os paralelos 17°52' e 21°19' de latitude Sul (Projeção Universal Transversa de Mercator; Elipsóide SIRGAS 2000, zona 24 S). Variação mensal da precipitação pluvial obtida com interpolação espacial (pixel 90 x 90 m) por krigagem utilizando modelo esférico (janeiro, fevereiro, março e agosto), linear (abril, maio, junho, julho, setembro, novembro e dezembro) e exponencial (outubro) com ajuste do semi-variograma (nugget effect, range e sill) (Pirovani, 2014) com base em dados climáticos históricos (1983-2013). Os valores de predição para cada localidade (sul, central, noroeste e norte) são representados por cor (veja legenda interna) com valores para índices baixos marcadas em vermelho (< 25 mm) e índices altos marcadas em azul intenso (> 275 mm). Veja o texto principal para obter mais detalhes.

Índices do Balanço hídrico climatológico

A espacialização do déficit hídrico anual (Figura 8) mostra que a região sul, central e norte há um predomínio de áreas com menos que 200 mm de déficit hídrico, justificado em partes, pela interação de maiores altitudes (região sul e central) (Figura 1), elevados índices de precipitação pluvial (Figura 6) e baixas temperaturas média do ar (Figura 3). Na região noroeste e no extremo norte o déficit hídrico apresenta valores anuais entre 200 - 400 mm, devido à influência de altas temperaturas médias do ar (Figura 3) e baixo índice de precipitação pluvial (Figura 6). Além disto, existem áreas na fração inferior da região noroeste e acerca do mar na região sul com déficit hídrico acima de 400 mm anuais, fato justificado pela evidência de processo evolutivo de desertificação, tendo a vulnerabilidade climática, o tipo de relevo e o tipo de solo como atenuantes (Antongiovanni e Coelho, 2005).

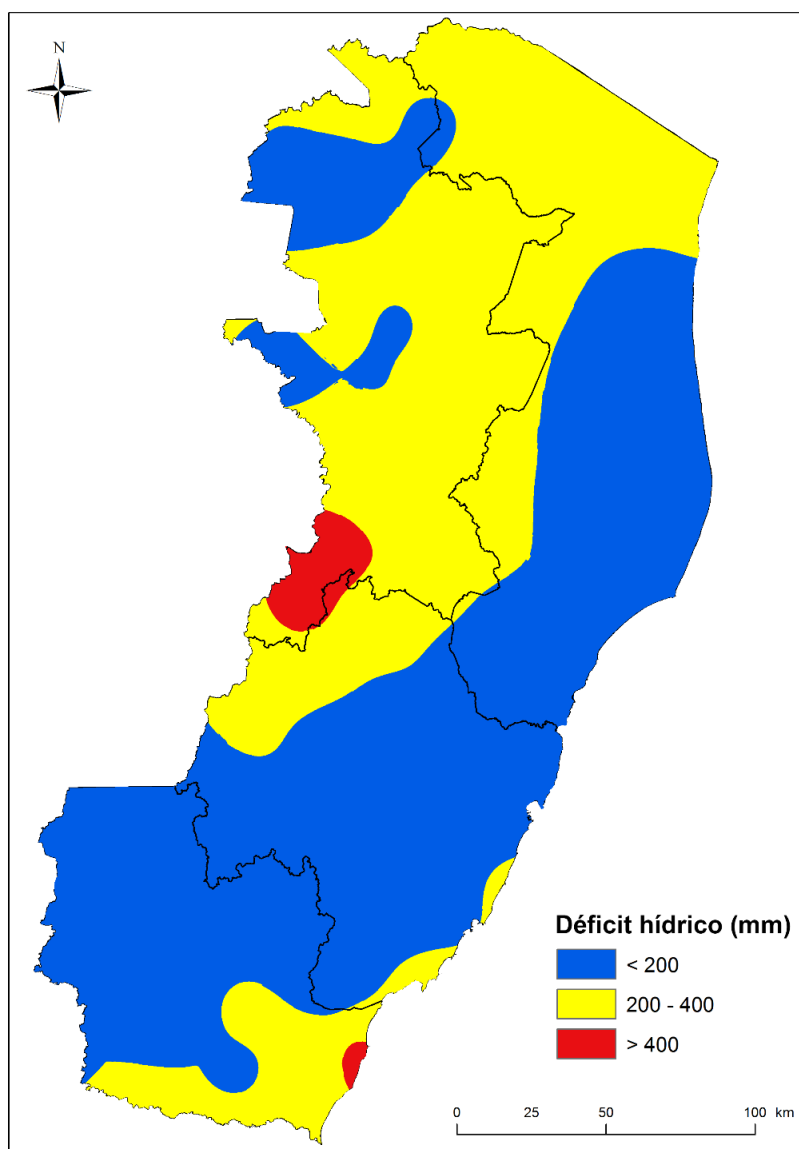


Figura 8. Espacialização dos valores médios de déficit hídrico anual (mm), situada geograficamente entre os meridianos 39°38' e 41°50' de longitude Oeste e os paralelos 17°52' e 21°19' de latitude Sul (Projeção Universal Transversa de Mercator; Elipsóide SIRGAS 2000, zona 24 S). Variação anual do déficit hídrico obtida com interpolação espacial (pixel 90 x 90 m) por krigagem utilizando modelo exponencial com ajuste do semi-variograma (nugget effect, range e sill) (Castro et al., 2010b) com base em dados climáticos históricos (1983-2013). Os valores de predição (Matiello, 1991) para cada localidade (sul, central, noroeste e norte) são representados por cor (veja legenda interna) com valores baixos marcadas em azul (< 200 mm), médios marcados em amarelo (200 – 400) e altos marcados em vermelho (> 400 mm). Veja o texto principal para obter mais detalhes.

A espacialização da evapotranspiração real anual (Figura 9) indica que valores inferiores a 900 mm estão associados a áreas de maior altitude (Figura 1) com baixa temperatura média do ar (Figura 3), seguindo uma tendência geral de redução de valores de leste (e.g. 1.200-1.300 mm), acerca do litoral, para oeste (e.g. 900-1.100 mm) o que indica influência marcante do relevo (Figura 1), da longitude e da oceanidade (Cecílio et al., 2012).

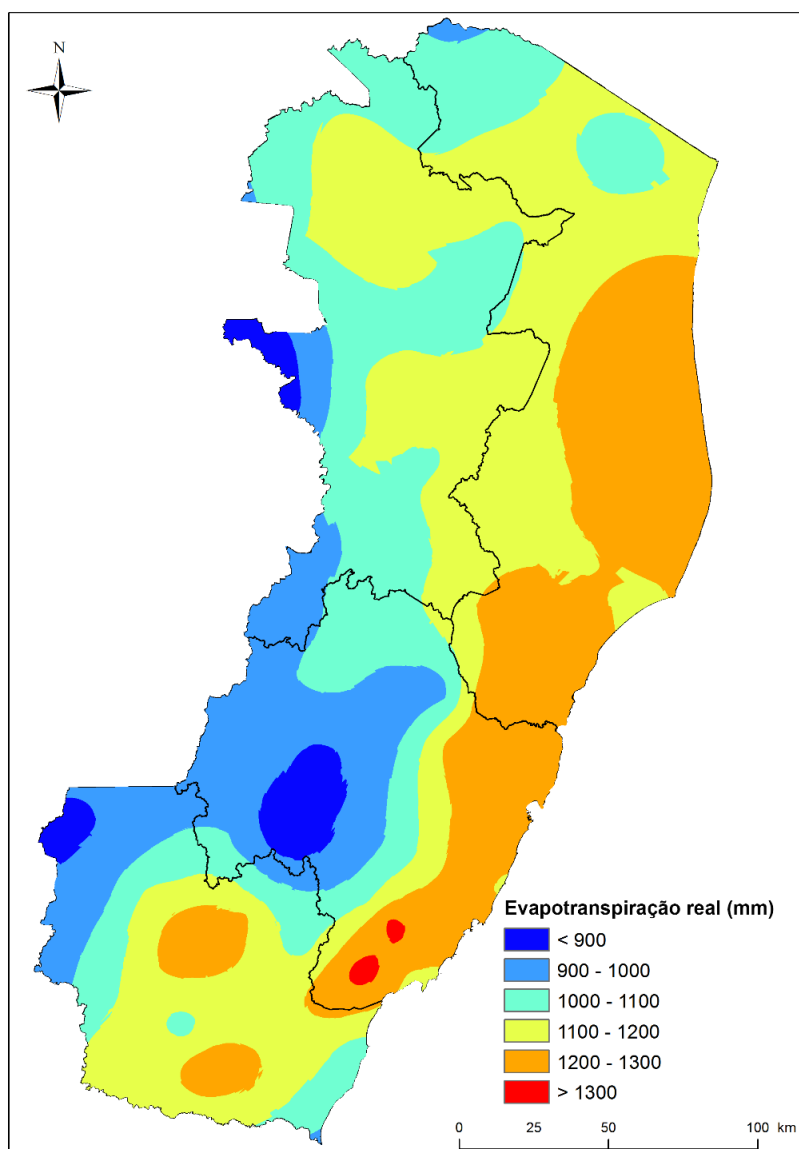


Figura 9. Espacialização dos valores médios de evapotranspiração real anual (mm), situada geograficamente entre os meridianos 39°38' e 41°50' de longitude Oeste e os paralelos 17°52' e 21°19' de latitude Sul (Projeção Universal Transversa de Mercator; Elipsóide SIRGAS 2000, zona 24 S). Variação anual da evapotranspiração real (Thornthwaite e Matter, 1955) obtida com interpolação espacial (pixel 90 x 90 m) por krigagem utilizando modelo exponencial com ajuste do semi-variograma (nugget effect, range e sill) (Castro et al., 2010b) com base em dados climáticos históricos (1983-2013). Os valores de predição para cada localidade (sul, central, noroeste e norte) são representados por cor (veja legenda interna) com valores baixos marcadas em azul intenso (< 900 mm) e altos marcados em vermelho (> 1.300 mm). Veja o texto principal para obter mais detalhes.

O balanço hídrico climatológico mostra que as regiões sul (Figura 10 A) e central (Figura 10 B) apresentam histórico de ocorrência de déficit hídrico anual, respectivamente, de 70,20 mm e 13,26 mm durante os meses de maio a setembro e excedente hídrico, respectivamente, de 251,41 mm e 339,21 mm distribuídos entre outubro a abril (exceto fevereiro) (Figura 10 A e B). Para a região norte (Figura 10 C) e noroeste (Figura 10 D) o histórico aponta ocorrência de déficit hídrico anual, respectivamente, de 297,71 mm e 315,07 mm durante os meses de janeiro a outubro, com excedente hídrico, apenas para região norte, de 25,66 mm, concentrado entre novembro e dezembro (Figura 10 C).

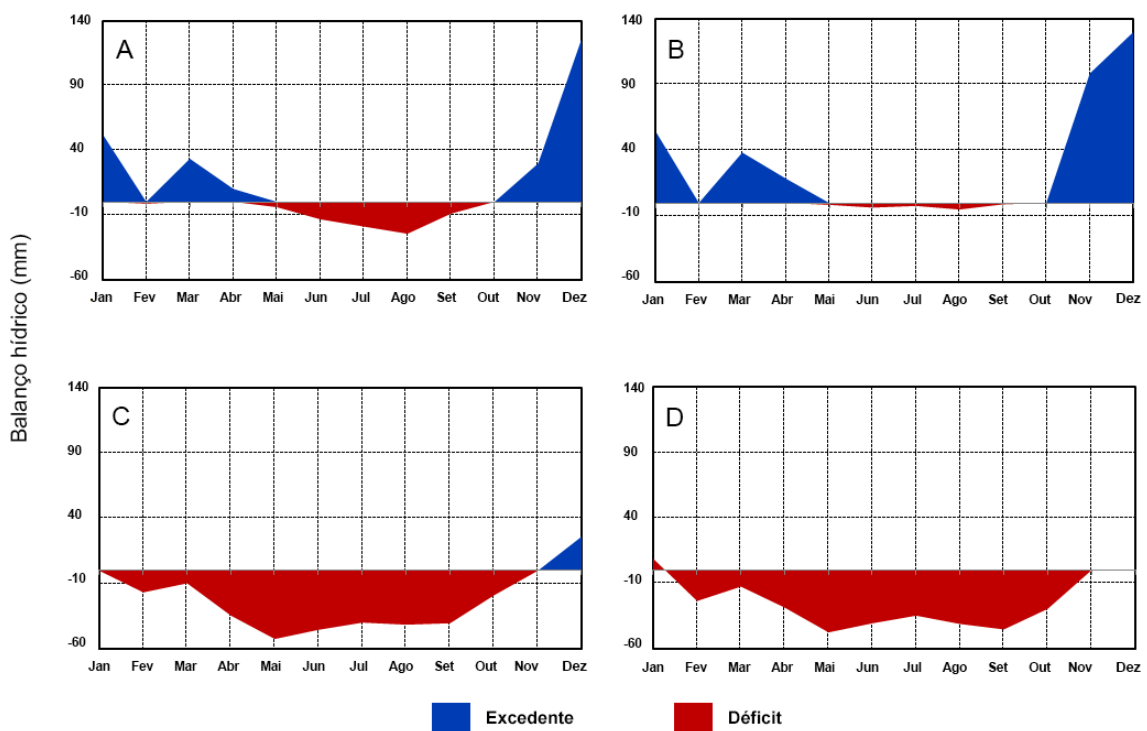


Figura 10. Balanço hídrico climatológico (mm). Representação gráfica anual (janeiro a dezembro) de valores médios históricos (1983-2013) de excedente hídrico (azul) e déficit hídrico (vermelho) para região sul (A), central (B), norte (C) e noroeste (D) obtidos por dados climáticos de temperatura média do ar, precipitação pluvial média e latitude média, adotando a capacidade de água disponível de 100 mm (Thornthwaite e Matter, 1955). Significativo pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($p < 0.05$).

O extrato do balanço hídrico climatológico aponta que o estoque para retirada (área rosa) de água do solo na região sul, norte e noroeste são semelhantes, com valores respectivos em 92,32 mm, 98,08 mm e 98,26 mm (Figura 11 A, C e D). As evidências de elevado déficit hídrico na região norte e acentuadamente na região noroeste (Figura 8, Figura 10 C e D; Figura 11 C e D) estão relacionados com os elevados índices de evapotranspiração real (Figura 9), as altas temperaturas do ar e (Figura 2, 3 e 4) e aos baixos índices de precipitação pluvial entre os meses de maio e setembro (Figura 7, Figura 12 C e D).

O déficit hídrico pode ser agravado pela possibilidade de sazonalidade de precipitação pluvial evidenciada em todas as regiões do estudo (Figura 12). Estes resultados históricos reforçam o padrão do regime de precipitação pluvial concentrado durante o período de maior índice de temperatura do ar, exceto para o mês de fevereiro que tipicamente figura menores índices de precipitação pluvial, e ainda elevada sazonalidade nos períodos de transição (abril e setembro) (Figura 12), o que pode aumentar o déficit hídrico e a vulnerabilidade ao cultivo de plantas de café conilon.

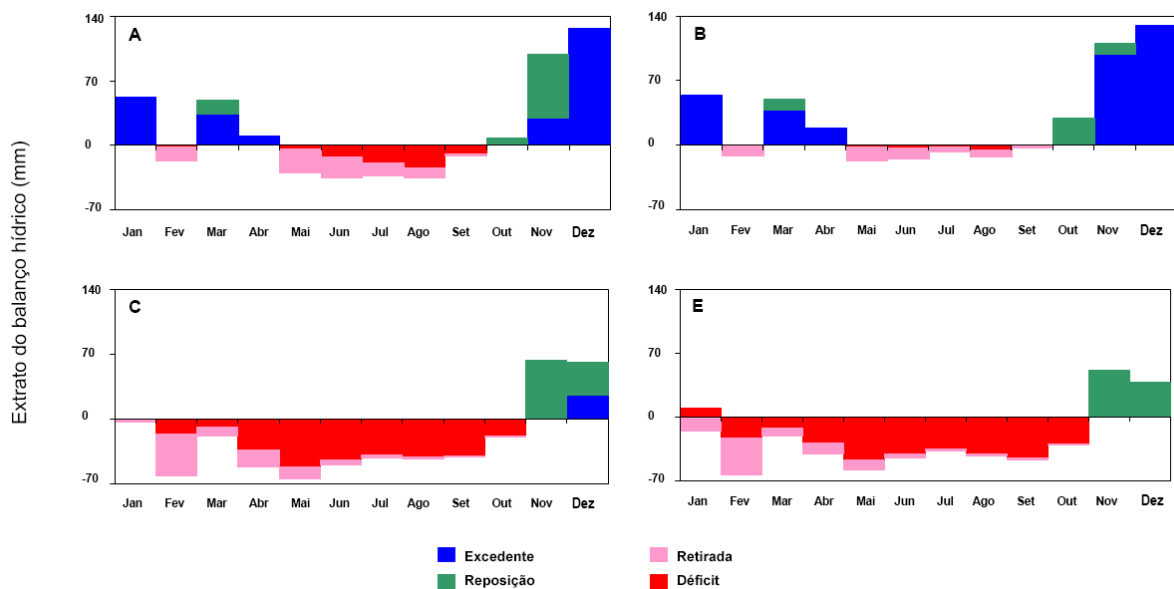


Figura 11. Extrato do balanço hídrico climatológico (mm). Histograma anual (janeiro a dezembro) de valores médios históricos (1983-2013) de excedente hídrico (azul), reposição (verde), retirada (rosa) e déficit hídrico (vermelho) para região sul (A), central (B), norte (C) e noroeste (D) obtidos por dados climáticos de temperatura média do ar, precipitação pluvial média e latitude média, adotando a capacidade de água disponível de 100 mm (Thornthwaite e Matter, 1955). Significativo pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($p < 0.05$).

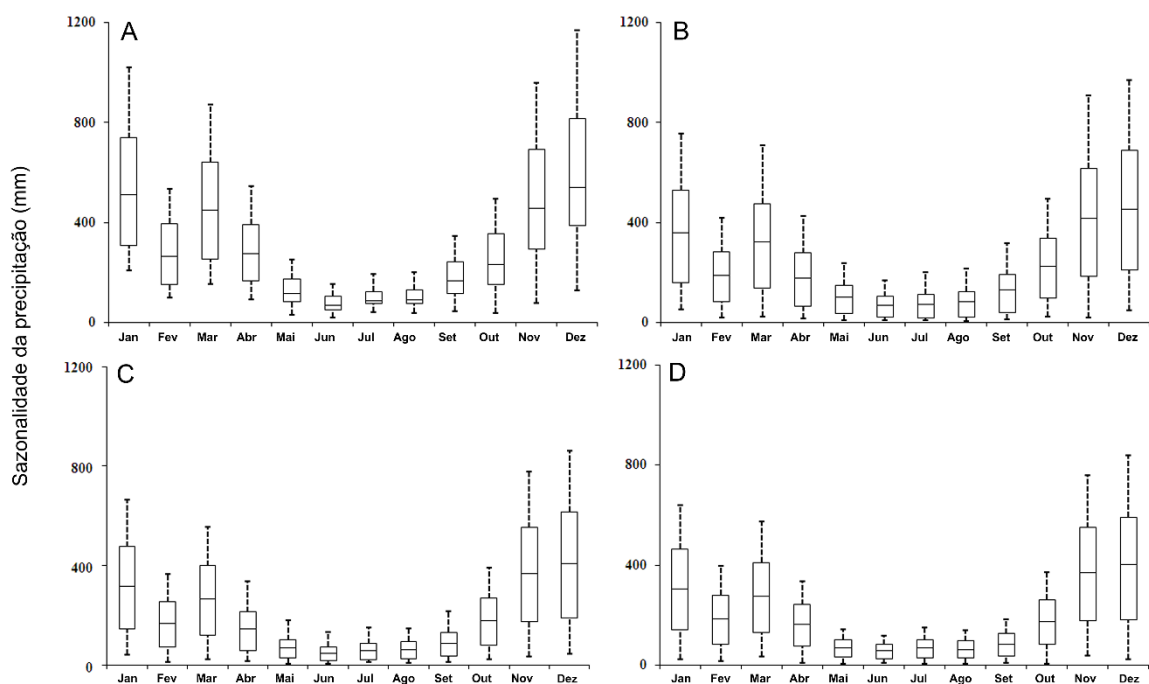


Figura 12. Sazonalidade da precipitação pluvial (mm). Dispersão dos dados climáticos históricos (1983-2013) de precipitação pluvial para região sul (A), central (B), norte (C) e noroeste (D). A mediana é indicada pela faixa horizontal dentro da caixa, cujos limites superior e inferior mostram, respectivamente, os valores de percentis 75 e 25; valores máximos e mínimos são indicados pelos símbolos de suporte horizontais nas extremidades das linhas pontilhadas em cada boxplot. Significativo pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($p < 0.05$).

Tipos de solos

A estratificação dos tipos de solo indica variações espaciais de nove tipos de solo (Figura 13), com predomínio de 65,79% das áreas compostas por Latossolos (Vermelho 0,57% e Vermelho-Amarelo 65,22%), sendo as demais: 11,17% com Argissolo Vermelho-Amarelo, 6,67% com Neossolos (Flúvico 2,16%, Litólico 1,98%, Quartzarênico 2,53%), 4,77% com Cambissolo Háplico, 3,69% com Nitossolo Vermelho, 2,42% com Gleissolos (Melânico 2,13% e Sáfico 0,29%), 0,74% com Chernossolo Argilúvico, 0,47% com Espodossolo Cárstico e 0,22% com Organossolo Háplico (Figura 13).

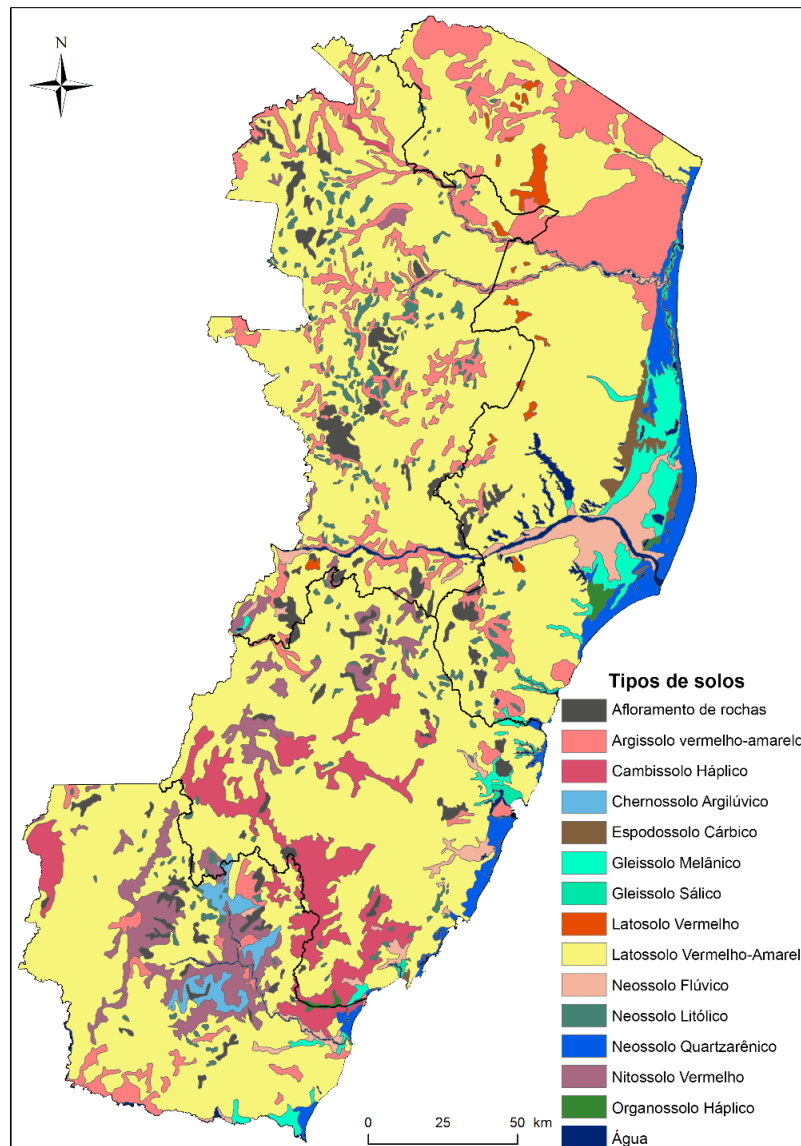


Figura 13. Tipos de solo pela classificação brasileira. Estratificação dos tipos de solo predominantes com base em mapa digital de solos (escala 1:5.000.000) (EMBRAPA, 2013) situado geograficamente entre os meridianos 39°38' e 41°50' de longitude Oeste e os paralelos 17°52' e 21°19' de latitude Sul (Projeção Universal Transversa de Mercator; Elipsóide SIRGAS 2000, zona 24 S). Os valores de predição para cada localidade (sul, central, noroeste e norte) são representados por cor (veja legenda interna).

Deve ser dada atenção a variabilidade espacial do Cambissolo, Neossolos e Gleissolos, que somados equivalem a 13,86% da área de estudo, pois estes apresentam fatores limitantes ao cultivo, por exemplo, baixa capacidade de retenção de água, textura extremamente arenosa, baixa profundidade para expansão das raízes, restrição a drenagem natural e elevado teor de minerais tóxicos às plantas (e.g. sódio, enxofre, alumínio e ferro) (EMBRAPA, 2013).

DISCUSSÃO

Caracterização de vulnerabilidade das regiões

REGIÃO NORTE

A caracterização climática indica que a vulnerabilidade ao cultivo de plantas de café conilon na região norte está ligada aos (i) altos índices de temperatura do ar e amplitude térmica, a (ii) sazonalidade e a precipitação pluvial, a (iii) evapotranspiração real, ao (iv) déficit hídrico e aos (v) tipos de solos.

A região norte possui valores de temperatura média do ar acima de 24 °C (outubro a maio) (Figura 3) associados a temperaturas máximas do ar acima de 32 °C (janeiro a abril) (Figura 4) e a temperaturas mínimas do ar acima de 20 °C (outubro a abril) (Figura 5), implicando em amplitudes térmicas variando entre 8 a 10 °C (setembro a dezembro) (Figura 6). Estes resultados apontam que as altas temperaturas provavelmente impactariam negativamente o cafeeiro conilon na fase de crescimento vegetativo (outubro a maio) e de expansão do fruto (janeiro e fevereiro) possivelmente por limitações fotossintéticas.

Este resultado, associado à incidência da radiação solar direta ao dossel (Pezzopane, 2008), pode causar uma sobrecarga de energia e um sobreaquecimento de folhas, principalmente em cultivos a pleno sol (Maestri et al., 2001; DaMatta e Ramalho, 2006; Pezzopane et al., 2011). Este fato está ligado à sensibilidade aparente da maquinaria fotossintética (e.g. membranas tilacoides) a altas temperaturas do ar, o que provoca uma redução no consumo de energia, sem uma redução significativa de captação, assim os primeiros indicadores de distúrbios são alterações da permeabilidade da membrana dos cloroplastos, a diminuição gradativa da atividade do PSII e também o estresse oxidativo (Müller et al., 2001).

O balanço hídrico climatológico (Figura 10 D e 11 D) indica que plantas de café conilon cultivadas na região norte permanece em déficit hídrico em aproximadamente 83% do ciclo vegetativo/reprodutivo anual, com reposição e suprimento hídrico concentrados em aproximadamente 60 dias (novembro a dezembro) (Figura 11 D) no início da fase de crescimento vegetativo ou final da floração (Novembro a dezembro), tendo como agravante a possibilidade de atraso da precipitação, devido a sazonalidade da precipitação pluvial evidente durante este período (novembro a janeiro) (Figura 12 D). A vulnerabilidade hídrica também é evidente pela observação de índices de precipitação pluvial mensal inferiores a 50 mm durante a fase de expansão foliar e início da diferenciação do botão floral (maio a setembro) (Figura 7).

Em conjunto os resultados apontam que a região norte possui valores de temperatura do ar (média, máxima e mínima) acima do requerido para o cultivo durante os períodos de enchimento dos frutos (janeiro a fevereiro) e crescimento vegetativo (outubro a maio) (Figura 2, 3 e 4), associados à acentuada deficiência hídrica mensal (janeiro a outubro) (Figura 10 e 11) com índices anuais de déficit hídrico aproximadamente de 200 mm, com evidente vulnerabilidade no extremo norte, com déficit entre 200-400 mm (Figura 9), com reposição concentrada em curto espaço de tempo (Figura 11 D) ainda sob a possibilidade de atraso (Figura 12 D).

Apesar da vulnerabilidade térmica ser o limitante na região norte, os resultados sugerem que o risco climático desta região é a interação entre altas temperaturas do ar e déficit hídrico moderado. Alguns trabalhos reportam que plantas de *Coffea canephora* podem manter elevados valores de fotossíntese sob temperatura do ar de até 35 °C, desde que a condutância estomática não seja limitada (Carelli et al., 1999; DaMatta et al, 2003), entretanto, o estresse térmico na região norte é seguido de estresse hídrico moderado, alterando o equilíbrio entre respiração e fotossíntese, pelo fato do fechamento dos estômatos limitar o influxo de CO₂ para o mesófilo foliar, presumindo que o efeito térmico sobre a fotossíntese seja uma resposta secundária ao controle estomático (Ronchi e DaMatta, 2007; Cavatte et al., 2008).

Com isso, acredita-se que o crescimento vegetativo e o enchimento de grãos de café na região norte estariam comprometidos pelo fato do café conilon apresentar baixas taxas de fotossíntese e relativo aumento da respiração, sob estresse hídrico moderado, o que modificaria relação fonte/dreno, reduzindo a taxa de transporte de fotoassimilados para os órgãos vegetativos (ramos e folhas) e produtivos (grãos) (DaMatta et al, 2003; Cavatte et al., 2008).

Na região norte, acerca do mar, é possível encontrar áreas de amplo predomínio de Neossolo Quartzarênico, Neossolo Flúvico, Gleissolo Melânico e Gleissolo Sáfico, a cerca do mar (Figura 13). As características físicas, químicas e estruturais destes solos são agravantes a vulnerabilidade para o cultivo de café conilon; por exemplo, Neossolo Quartzarênico têm como principais limitações a baixa fertilidade natural, a textura extremamente arenosa, reduzida capacidade de retenção de água e nutrientes, e no caso dos hidromórficos, a presença do lençol freático próximo à superfície (Embrapa, 2013). Além disto, áreas com predomínio deste solo na região norte possuem um impedimento físico a cerca de 1,0 – 1,2 m de profundidade, devido à presença de camada compactada de areia.

No geral, a interação de fatores limitantes, como a baixa capacidade de retenção de água, a textura extremamente arenosa e a baixa profundidade para expansão das raízes, incrementam

a vulnerabilidade hídrica, por aumentar o déficit hídrico, elevar perdas por evaporação de água do solo, diminuir a capacidade de armazenamento de água no solo e também restringir a capacidade hidráulica de plantas de café conilon.

REGIÃO NOROESTE

A vulnerabilidade ao cultivo do café conilon na região noroeste é imposta pelo (i) elevado déficit hídrico e (ii) baixo índice de precipitação pluvial, agravado (iii) pela sazonalidade da precipitação pluvial e por (iv) altas temperaturas do ar.

O déficit hídrico é a principal vulnerabilidade climática para a região noroeste. Esta região possui índices de precipitação pluvial mensal inferiores a 50 mm durante a fase de indução e maturação das gemas florais (maio a agosto) e inferiores a 25 mm durante a fase de abertura e expansão das flores (setembro) (Figura 7). O extrato do balanço hídrico climatológico aponta retirada de água do solo durante 91,66% do ano (janeiro a novembro) (Figura 10 D; Figura 11 D), com reposição hídrica concentrada durante 60 dias que antecedem a floração (Figura 11 D) sem suprimento de água ao solo, o que implicada em déficit hídrico durante todos os meses (Figura 10 D), atingindo índices anuais considerados restritivos ao cultivo (200 – 400 mm) (Figura 8), tendo como agravante o histórico de sazonalidade durante o período de maior índice de precipitação pluvial que corresponde a fase final do crescimento vegetativo ou enchimento dos frutos (Figura 12).

O histórico de temperatura do ar mostra que a plantas de café conilon cultivadas na região noroeste podem ter crescimento vegetativo e/ou o enchimento dos frutos afetados pela ação de índices térmicos médios do ar acima de 24 °C (outubro a abril) (Figura 3) associados a temperaturas máximas do ar acima de 32 °C (janeiro a março) e a temperaturas mínimas do ar acima de 20 °C (novembro a abril) (Figura 5) e a amplitudes térmicas entre 10 a 12 °C (setembro a abril) (Figura 6).

A vulnerabilidade imposta pelo déficit hídrico do solo associado as altas temperaturas, as elevadas demandas evaporativas (Figura 9) e a baixa reposição de água no solo durante as fases de crescimento vegetativo, diferenciação floral e enchimento de grãos, possivelmente, impactaria negativamente a fisiologia das plantas de café conilon, podendo comprometer a produtividade, sendo que os principais impactos seriam sobre a manutenção da área foliar, do teor relativo de água nas folhas, da eficiência do uso da água e do aprofundamento das raízes.

Os resultados reportam que os impactos do déficit hídrico, associados a demais limitações climáticas, em clones de café conilon sensíveis podem ser ligados a (i) manutenção do

equilíbrio entre a respiração e a fotossíntese, fortemente relaciona a sensibilidade dos estômatos em regular a condutância estomática ao vapor de água e o influxo de CO₂; (ii) aos efeitos cumulativos do déficit hídrico a tensão do solo e por seguinte na condutância hidráulica (solo via folha), sobre influência do déficit de pressão de vapor e da taxa de transpiração e do teor relativo de água nas folhas (potencial de água) (DaMatta et al., 2003; Pinheiro et al., 2004; Pinheiro et al., 2005; DaMatta e Ramalho, 2006; Ronchi e DaMatta, 2007; DaMatta et al., 2007a; Cavatte et al., 2008).

Tomados em conjunto, primeiramente, em regiões com déficit hídrico, que pode se estender por longo período há uma tendência das raízes de plantas de café conilon estarem sobre elevada tensão do solo, dificultando a absorção de água e nutrientes, este fato reduz a condutância hidráulica total do solo à folha, implicando na redução do potencial de água das células e conseqüentemente sobre o teor relativo de água nas folhas (Lima et al., 2002; DaMatta et al., 2003; Pinheiro et al., 2004; Pinheiro et al., 2005; DaMatta e Ramalho, 2006). Em segundo, há elevada correlação entre o turgor das células foliares (e.g. teor relativo de água nas folhas) com a manutenção da sensibilidade estomática no processo de regulação da condutância estomática, por uma tendência de diminuição da condutância estomática quando clones sensíveis ao déficit hídrico apresentam baixo teor relativo de água em suas folhas (Pinheiro et al., 2004; Pinheiro et al., 2005; DaMatta e Ramalho, 2006). Em terceiro, esta perda de sensibilidade dos estômatos é ampliada em condições de elevado déficit de pressão de vapor no ambiente (e.g. alto índice de evapotranspiração real) e altas temperaturas, modificando as taxas de transpiração (aumentando a necessidade de retirada de água do solo pelas raízes) implicando em restrição estomática e diminuição ou restrição ao influxo de CO₂, que por fim impactaria negativamente as taxas de fotossíntese líquida de clones (DaMatta e Ramalho, 2006; Ronchi e DaMatta, 2007; DaMatta et al., 2007a; Cavatte et al., 2008).

Empiricamente, é observado senescência foliar precoce em plantas de café conilon em condições de déficit hídrico o que poderia ser explicado em parte pela evidência de elevado grau de estresse oxidativo (e.g. grau de peroxidação lipídica) (Pinheiro et al., 2004; Pinheiro et al., 2005), e também como mecanismo de limitação da taxa de transpiração, ou até pela redistribuição de assimilados para folhas novas como medida de favorecer a sobrevivência sobre a manutenção de rendimento (DaMatta et al., 2003; DaMatta e Ramalho, 2006).

REGIÃO CENTRAL

A vulnerabilidade ao cultivo do café conilon na região central está associada a (i) baixas temperaturas do ar, a (ii) sazonalidade da precipitação pluvial e aos (iv) tipos de solos.

A principal vulnerabilidade climática da região central está ligada a valores de temperaturas do ar abaixo do requerido para a cultura. Plantas de café conilon plantadas na região central, principalmente em altitude, teriam as fases de final do crescimento vegetativo e início da floração sob temperatura média do ar entre 16 - 18 °C (junho a agosto) (Figura 3) associados a temperaturas máximas do ar entre 18 - 20 °C (junho a agosto) (Figura 4) e a temperaturas mínimas do ar abaixo de 10 °C (maio a setembro) (Figura 5), com amplitudes térmicas variando entre 8 a 12 °C (janeiro a setembro) (Figura 6).

Os impactos das baixas temperaturas positivas sob plantas de café conilon foram amplamente investigados (ver Ramalho et al., 2014). As evidências apontam para a existência de danos graves implicando em efeitos deletérios (em alguns casos irreversíveis) sobre a maioria dos parâmetros fisiológicos e bioquímicos (Partelli et al 2009; Batista-Santos et al 2011; Ramalho et al., 2014). Os principais impactos das baixas temperaturas positivas em *Coffea canephora* estão ligados a (i) danos à estrutura celular dos cloroplastos; (ii) modificação dos teores de clorofila e carotenóides; (iii) forte depressão no desempenho do mecanismo de trocas gasosas, causando reduções notáveis na condutância estomática e na taxa de fotossíntese líquida (devido limitação do influxo de CO₂); (iv) alterações qualitativas e quantitativas na matriz lipídica das membranas de cloroplastos, associado a (v) aumento do nível de insaturação de ácido graxos em classes de lipídios específicos e por fim (vi) baixa eficiência na dissipação de energia térmica e aumento do nível de estresse oxidativo (Campos et al. 2003; Ramalho et al. 2003; Partelli et al. 2009; Batista-Santos et al. 2011; Ramalho et al., 2014).

Tomadas em conjunto, as evidências apontam que plantas de café conilon em períodos de baixas temperaturas positivas (< 20 °C) podem apresentar moderada redução do crescimento e da taxa de fotossíntese líquida, com impactos consideráveis ao metabolismo, o que pode levar a diminuição da produtividade (DaMatta e Ramalho, 2006). O crescimento dos ramos de plantas de café conilon são fortemente afetados após períodos consideráveis de temperaturas do ar abaixo de 17 - 18 °C (Partelli et al., 2010; Partelli et al. 2013), com decréscimo severo das funções fisiológicas e metabólicas em temperaturas do ar abaixo dos 15 °C, sendo observado valores insignificantes de fotossíntese após períodos de temperaturas do ar abaixo de 4 °C (Ramalho et al., 2014).

Outro fato importante aponta para a manutenção das funções fisiológicas e bioquímicas das plantas após o reaquecimento da temperatura do ar. Os resultados indicam danos notáveis em plantas de café conilon após o reaquecimento da temperatura do ar, baseados na forte queda de folhas (Batista-Santos et al. 2011) além da assimilação de CO₂ permanecer significativamente inibida (Ramalho et al., 2003).

A região central apresenta dois ambientes definidos pela altitude (Figura 1). O ambiente acerca do mar apresenta índice de evapotranspiração real anual entre 1.100 – 1.300 mm (Figura 9), entretanto o déficit hídrico anual é inferior a 200 mm (Figura 8), pelo fato dos índices de precipitação pluvial durante o período de seco estarem entre 50 - 75 mm (maio a setembro) (Figura 7). A área oeste da região central, de maior altitude, apresenta índices de evapotranspiração real anual inferiores a 1.000 mm (Figura 9), com déficit hídrico anual entre 200 - 400 mm (considerado restrito para a cultura) (Figura 8), agravado por índices de precipitação pluvial inferiores a 50 mm (maio a setembro) durante o inverno (Figura 7).

Apesar desta distinção climática, plantas de café conilon cultivadas na região central permanecem em déficit hídrico em apenas 50% do ciclo vegetativo/reprodutivo anual (Figura 10 e 11 B), que isoladamente não aponta impacto negativo ao cultivo, pelo fato da reposição e suprimento hídrico serem distribuídos em aproximadamente 180 dias (outubro a janeiro; março a abril) (Figura 10 e 11 B) e pelo somatório de suprimento anual ser superior ao déficit hídrico (Figura 10 B). Em conjunto, a vulnerabilidade desta região está na interação entre déficit hídrico acumulado durante a fase final do crescimento vegetativo e início do florescimento (maio a setembro) (Figura 10 B) e o atraso da reposição, ocasionado pela elevada possibilidade de sazonalidade no início do período de precipitação pluvial (setembro a novembro) (Figura 12 B), que possivelmente impactaria no desenvolvimento reprodutivo das plantas de café conilon. As implicações deste cenário climático seriam, pelo menos em arte, semelhantes as relatadas para a região noroeste.

Outro fator agravante para aumento da vulnerabilidade de cultivo de plantas de café na região central é o predomínio de tipos de solos com características limitantes ao pleno desenvolvimento de plantas (Figura 13). Por exemplo, o cambissolo háplico apresenta baixa profundidade para expansão das raízes, restrição a drenagem natural e elevado teor de minerais tóxicos às plantas (e.g. sódio e alumínio) (EMBRAPA, 2013).

REGIÃO SUL

A caracterização climática indica que a vulnerabilidade ao cultivo do café conilon na região sul está ligada ao (i) índice de temperatura do ar e amplitude térmica, a (ii) sazonalidade e a precipitação pluvial média, a (iii) evapotranspiração real e ao (iv) déficit hídrico.

A região sul possui menor expressão de produção com apenas 8% de área destinada ao plantio de plantas de café conilon, principalmente em regiões de baixa altitude (Figura 1 e 2). A altitude é, marcadamente, a variável de maior influência para a vulnerabilidade climática ao cultivo na região sul, pelo fato do ambiente apontar variabilidade espacial entre áreas de menor (< 300 m) e maior altitude (> 300 m), para maior parte das características estudadas (Figura 3, 4, 5, 7 e 9).

Em áreas de elevadas altitudes (> 300 m) a principal vulnerabilidade está relacionada as baixas temperaturas positivas (Figura 3, 4 e 5). Os resultados indicaram que plantas de café conilon teriam as fases de final do crescimento vegetativo e início da floração (entre maio e setembro) sob temperatura média do ar variando entre valores abaixo de 20 °C (temperatura máxima do ar) até valores abaixo 10 °C (temperaturas mínimas do ar) (Figura 3, 4 e 5). Em áreas abaixo de 300 m de altitude, acerca do mar (Figura 1), a principal vulnerabilidade ao cultivo estaria ligada às limitações decorrentes dos baixos índices de precipitação pluvial (< 75 mm) entre a fase final do crescimento vegetativo e a fase final da floração (maio a setembro), associado aos valores de 200 – 400 mm de déficit hídrico anual (Figura 8) e aos elevados índices de evapotranspiração real anual (Figura 9).

No geral, os efeitos negativos ao cultivo de plantas de café conilon na região sul podem serem comparados aos evidenciados para a região central e noroeste, respectivamente, para baixa e alta altitude. Empiricamente se pode observar, acima de 600 m de altitude, que plantas de café conilon favorecem o crescimento vegetativo sobre o produtivo, por isso, as plantas vegetam a maior parte do ciclo anual, este fato pode estar relacionado à latitude.

Identificando estratégias de adaptação e mitigação

Em linha com a caracterização da vulnerabilidade climática das regiões e de acordo com critérios amplamente validados (Eakin, 2005; Gay et al., 2006; Schroth et al., 2009; Morales et al., 2010; Läderach et al., 2010; Lin, 2010; Haggard e Schepp, 2012; Jesus Junior et al., 2012; Rahn et al., 2013; Eakin et al., 2014) recomenda-se como práticas potenciais de adaptação (item i) e mitigação (itens ii, iii, iv e v) o (i) plantio de genótipos melhorados, (ii) a utilização de sistemas de policultivos (e.g. consórcio, agroflorestal e arborização), o (iii) adensamento de

plantas, a (iv) implantação de sistemas de irrigação (e.g. modo suplementar ou total) e o (v) manejo de plantas espontâneas.

MELHORAMENTO GENÉTICO

A estratégia mais adequada de adaptação a vulnerabilidade climática é a adoção de genótipos geneticamente melhorados com características de tolerância ao déficit hídrico e a elevados índices de temperatura do ar, sendo esta medida de adaptabilidade recomendada para todas as regiões (norte, noroeste, central e sul). Por intermédio das pesquisas em melhoramento genético existem cultivares clonais que possui grau de tolerância ao déficit hídrico, sendo a Emcapa 8141 (agrupamento de 10 clones e produtividade média de 54,0 sacas/ha), Incaper 8142 (agrupamento de 13 clones e produtividade média de 70,4 sacas/ha), Incaper 8112 (agrupamento de 9 clones e produtividade média de 80,73 sacas/ha), Incaper 8122 (agrupamento de nove clones e produtividade média de 88,75 sacas/ha) e Incaper 8132 (agrupamento de nove clones e produtividade média é de 82,36 sacas/ha) (Ferrão et al., 2007; Ferrão et al., 2013; Ferrão et al., 2013; Ferrão et al., 2013).

Apesar de haver opções de genótipos com grau de adaptação as condições de déficit hídrico a seleção e o melhoramento genético do café conilon ainda necessita de evoluções, em razão dos clones apresentarem elevada variabilidade genética em relação à tolerância a seca e diferenças morfofisiológicas que implica em tolerâncias diferenciais (DaMatta e Ramalho, 2006). Além disto, a sazonalidade da precipitação pluvial (Figura 12) nos meses de maior índice de precipitação (novembro a janeiro) é um agravante devido a influência à natureza poligênica de tolerância entre os clones (DaMatta, 2004; Ferrão et al., 2008).

Há evidências que em condições de déficit hídrico alguns clones possuem capacidade de manter a hidratação celular em níveis estáveis (DaMatta et al., 2003; Cavatte et al., 2008) regulado pela eficiência dos mecanismos de fechamento estomático, o que evita a transpiração e também o influxo de CO₂ para a fotossíntese (fator limitante a produção). No geral, resultados reportam que os principais componentes da adaptação diferencial ao déficit hídrico entre clones de café conilon são governados pelas taxas do uso da água e/ou pela eficiência de extração da água do solo (Cavatte et al., 2008), de acordo com estas evidências foram sugeridas três estratégias que podem auxiliar o melhoramento de clones de café conilon à tolerância ao déficit hídrico e à elevada temperatura (Ronchi e DaMatta, 2007).

A primeira estratégia indica que existem clones de café conilon com controle deficiente dos estômatos face à redução da disponibilidade de água do solo ou à demanda evaporativa da

atmosfera, aliado a sistemas radiculares com reduzida capacidade de absorção de água e nutrientes. A segunda estratégia aponta para a existência de clones com sistema radicular eficiente, média sensibilidade estomática e reduzida condutância hidráulica implicando em limitação da transpiração e conseqüentemente ao influxo de CO₂ para a fotossíntese. A terceira estratégia evidencia clones com sistema radicular eficiente, sensibilidade estomática satisfatória e alta condutância hidráulica. Estes clones possuem um balanço entre a capacidade de minimizar as perdas de água devido a transpiração pela eficiência em absorção de água, o que permite abertura estomática que seja satisfatória para o influxo de CO₂, sendo denominados de clones de dupla aptidão pela característica de tolerância e responsividade a água do solo (Ronchi e DaMatta, 2007).

IRRIGAÇÃO

Evidências irrefutáveis que apontam elevado déficit hídrico do solo e grande sazonalidade da precipitação pluvial, permitem afirmar que a utilização de irrigação (e.g. suplementar ou total) em cultivo de plantas de café conilon é a principal estratégia de mitigação à vulnerabilidade climática para regiões norte e noroeste e para áreas acerca do mar, na região central e sul. Episódios de seca ocasionam reduções de até 80% da produção em regiões marginais, apesar disto, existem poucos trabalhos que abordam efetivamente o impacto e as respostas desta estratégia de mitigação; com o agravante de terem sido realizados em plantas cultivadas em pequenos recipientes em casa de vegetação (DaMatta e Ramalho, 2006).

Os resultados indicam que a irrigação pode contribuir positivamente durante a fase de crescimento vegetativo do cafeeiro conilon. Tomados em conjunto, é possível afirmar que plantas jovens de cafeeiro conilon sob adequada irrigação apresentam incremento de 66% no crescimento inicial (pote com 12 dm³ de Latossolo Vermelho-Amarelo durante 250 dias) quando comparadas a clones sob déficit hídrico (Dardengo et al., 2009), com ganhos significativos no número médio de ramos plagiotrópicos e área foliar (pote com 12 dm³ de Latossolo Vermelho-Amarelo, durante 180 dias) (Busato et al., 2007), além de incremento de aproximadamente 375% do sistema radicular (pote com 12 dm³ de Latossolo Vermelho-Amarelo, durante 180 dias) (Araujo et al., 2011). Em condições de campo, plantas de café conilon cultivadas em área marginal (21°22' S e 41°46' W, 63 metros de altitude) sob irrigação, durante 24 meses após o plantio (1° safra), apresentaram incremento de 338% na produtividade (35 sacas/ha) em comparação com árvores em sistema de sequeiro (Andrade et al., 2002).

Apesar disto, maiores benefícios podem ser obtidos com a sinergia entre a utilização da irrigação, como estratégia de mitigação, e o cultivo de clones de cafeeiro conilon superiores, como medida de adaptação. Em áreas com déficit hídrico moderado (região norte, Neossolo Quartzarênico, 19°05' S e 40°23' W e 30 m de altitude) a utilização de irrigação associada ao plantio de clones de conilon caracterizados como superiores, incrementou em 110% a produtividade de plantas de café conilon com 48 meses após o plantio (3° safra), sendo possível observar produtividades variando entre 150 a 190 sacas de café (60 kg) por hectare (Ferrão et al., 2000).

Ademais, indícios apontam que, plantas de café conilon irrigadas durante o período entre a diferenciação das gemas florais e fase final da floração (junho a setembro) apresentam incremento de 37% da produção de grãos, em relação ao não irrigado (Sales, 1998), indicando que esta fase seja a de maior demanda hídrica durante o ciclo vegetativo/reprodutivo. Entretanto, parece haver uma relação entre a suspensão da irrigação com a uniformidade de abertura floral, porém esta hipótese ainda carece de estudos, pelo fato de resultados iniciais apontarem que clones com supressão hídrica durante nove semanas (fase pré floração) cultivados em áreas de elevado déficit hídrico (região norte, Argissolo, 18°54' S e 40°05' W, 60 m de altitude) apresentam floração e crescimento dos ramos plagiotrópicos semelhante a clones de café conilon irrigados ininterruptamente (Marsetti et al., 2013).

No geral, revisitando estes trabalhos (Ferrão et al., 2000; Andrade et al., 2002; Busato et al., 2007; Dardengo et al., 2009; Araujo et al., 2011) podemos concluir que a irrigação aumenta o tamanho do sistema radicular, promove a manutenção da área foliar, atenua a senescência das folhas e eleva a produtividade o que poderia ser explicado, pelo menos em clones que apresentam características de tolerância a seca, pelo fato da adequada disponibilidade de água ter relação direta com uma maior condutância hidráulica solo-folha e com uma maior estabilidade estomática, como consequência eleva a eficiência do uso da água e o aprofundamento das raízes, conferindo maior rendimento da cultura (DaMatta et al., 2003; DaMatta e Ramalho, 2006; DaMatta et al., 2007b)

SISTEMAS DE CULTIVOS CONSORCIADOS E ARBORIZAÇÃO

Evidências circunstanciais apontam que o cultivo de plantas de café conilon em sistemas agroflorestais e/ou arborizados pode ser recomendado como estratégia de mitigação à vulnerabilidade climática para regiões norte e noroeste e para as regiões central e sul, em áreas acerca do mar. Numerosos trabalhos têm reportado que este sistema de cultivo pode promover

modificações micrometeorológicas de caráter temporal e espacial, principalmente, reduzindo a (i) radiação direta, (ii) a velocidade do vento, (iii) a temperatura do ar, (iv) o déficit de pressão de vapor da água, que em conjunto indiretamente incrementa a (v) disponibilidade hídrica (DaMatta et al., 2003; DaMatta 2004; DaMatta e Ramalho, 2006; DaMatta et al., 2007b; Pezzopane et al., 2008; DaMatta et al., 2010; Pezzopane et al., 2011).

Os efeitos atenuantes do sombreamento têm sido associados com decréscimo da radiação incidente no dossel das plantas de café reduzindo a extensão dos danos foto-oxidativos; diminuição da velocidade do vento e da temperatura do ar (em até 5 °C) que em conjunto implicaria em menor dano físico as folhas e declínio das taxas de evapotranspiração real; reduzindo o déficit de pressão de vapor da água, que por sua vez permitiria otimizar a eficiência estomática, estabilizando a absorção de CO₂ e a perda de água, sem aumento proporcional na taxa de transpiração (DaMatta, 2004; DaMatta e Ramalho, 2006; DaMatta et al., 2007^a).

Resultados reportam que o sistema de cultivo com associação entre árvores de coqueiro (*Cocus nucifera L.*) e plantas de café conilon, em condições marginais de cultivo (região norte, 18°45' S e 40°11' W; 70 m de altitude) reduziu em 35% a velocidade do vento e 42% da radiação direta (e.g. no início do dossel do cafeeiro), implicando em reduções da temperatura média do ar e do déficit de pressão de vapor, principalmente no período diurno de maior temperatura do ar (Pezzopane et al., 2011). Em geral, estes resultados dão suporte para explicar, pelo menos parcialmente, a aclimatação positiva de plantas de café conilon consorciadas com árvores abrigo (*Hevea brasiliensis cv.*) em ambiente tropical hostil (19°24'S e 40°31'W, 30 m de altitude), suportadas pelas evidências de melhor desempenho fisiológico (e.g. incremento da eficiência no uso de nitrogênio, da eficiência no uso de água e da taxa fotossintética líquida potencial por área foliar) sem custo adicional aparente (Machado Filho et al., 2012; Martins et al., 2012; Rodríguez-López et al., 2013).

Finalmente, existe um consenso que ao adotar sistemas consorciados, é importante selecionar genótipos de café conilon com plasticidade fenotípica adequada, além da busca ideal do tipo de árvore utilizada e da densidade do sombreamento (DaMatta et al., 2003; DaMatta 2004; DaMatta e Ramalho, 2006; DaMatta et al., 2007b; Pezzopane et al., 2008; DaMatta et al., 2010; Pezzopane et al., 2011; Rodríguez-López et al., 2013).

ADENSAMENTO

O cultivo de plantas de café conilon em sistema de plantio adensado como estratégia de mitigação à vulnerabilidade climática aumenta a cobertura vegetal, proporcionando estabilidade térmica e hídrica às plantas (DaMatta e Rena, 2002; Jesus Junior et al., 2011). A condensação de plantas modifica o microclima possibilitando a diminuição da evaporação de água do solo (região norte e noroeste) e o impacto das temperaturas altas (região noroeste), principalmente por atenuar a incidência da radiação solar na superfície do solo. Esta estratégia de mitigação também é recomendada para regiões que apresentam índices moderados de déficit hídrico e sazonalidade de precipitação pluvial (região sul e central) por possibilitar maior aprofundamento das raízes de plantas de café, implicando em elevação da eficiência de uso da água e dos nutrientes (Rena e Carvalho, 2003).

Esta estratégia também pode ser empregada com sucesso em regiões com características de vulnerabilidade que acentuam o fenômeno de bienalidade produtiva (região sul e central). O sistema de plantio adensado resulta em alterações fisiológicas e morfológicas associadas à diminuição da produção por planta e ao aumento da produção por área, para o crescimento vegetativo e para produção de frutos, por isso há redução do esgotamento individual de plantas de café (Rena e Maestri, 1986; Androcioli, 1996).

Resultados reportam que plantas de café conilon em sistema de cultivos adensados podem produzir aproximadamente entre 90 (5.000 plantas/ha) até 190 sacas (60 kg) por hectare (13.000 plantas/ha) (Filho, Bravim e Tragino, 2013), incrementar os teores de P e K no solo (5.000 plantas/ha), constituir estratégia de recuperação de solos degradados (Guaçonni, 2011), sem haver necessariamente elevada correlação entre aumento da condensação de plantas e elevação do suprimento de nutrientes minerais (até 5.000 plantas/ha) (Bragança et al., 2009).

Atualmente, há uma convergência de esforços na busca da adequação da densidade de plantas de café conilon e de caules por árvores. Resultados prévios obtidos em quatro anos produtivos (região noroeste entre 2008 e 2011) indicam que o adensamento de plantas de café com três caules produtivos (5.000 plantas/ha e 15.000 caules/ha) tem efeito positivo na produtividade com incrementos entre 55 a 70 sacas (60 kg) por hectare (Verdin Filho et al., 2014). Os resultados, também relevaram que pontualmente no ano de 2009 houve severo déficit hídrico no local do ensaio (região noroeste 19°24' S; 40°32' W) o que implicou em produtividades entre 15 a 20 sacas (60 kg) por hectare (decréscimo de 70%), respectivamente, para um estande de 2.222 plantas/ha (6.667 caules/ha) a 5.000 plantas/ha (15.000 caules/ha) (Verdin Filho et al., 2014).

Neste contexto, é possível afirmar que o cultivo de plantas de café conilon em sistema de plantio adensado apresentam sinergia com a implantação de sistemas de irrigação, principalmente em regiões onde há elevados índices de retirada hídrica e baixa reposição implicando em severo déficit hídrico (e.g. parte da região noroeste e norte) (Figura 11 e 12).

MANEJO DE PLANTAS ESPONTÂNEAS

A manutenção controlada da vegetação espontânea entre as linhas de plantio de café conilon como estratégia de mitigação à vulnerabilidade climática implica na atenuação das temperaturas máximas (região norte e noroeste) e da amplitude térmica (região noroeste), e principalmente da incidência da radiação solar direta e difusa na superfície do solo (variável que exerce maior influência na temperatura do solo) (Amado et al., 1990), reduzindo a transpiração do solo, a evapotranspiração (região norte) e o déficit hídrico (região noroeste).

Além dessas implicações, este manejo tem potencial para elevar os teores de matéria orgânica e estoque de carbono no solo (Rikxoort et al., 2014), aumentar a capacidade de retenção e infiltração de água e diminuir o escoamento superficial (Fazuoli et al., 2007) principalmente para plantios em declividade (região sul e central). Este modo de cultivo também proporciona o desenvolvimento do sistema radicular em profundidade e superfície (potencializa, respectivamente, absorção de água e nutrientes) (Silva et al., 2008), estabelecendo ação sinérgica com estratégia de adaptação apresentada (ver tópico de melhoramento genético) visto a limitação hidráulica de alguns clones.

Para a obtenção de sucesso se torna necessário o estabelecimento do nível populacional ótimo de competição entre o cafeeiro e a vegetação. Há carência de informações técnicas e científicas visando à manutenção controlada da vegetação espontânea em cultivos de café conilon; resultados iniciais afirmam que há sinergia desta estratégia de mitigação e a de cultivo sombreado e consorciado (ver tópico de cultivo sombreado/consorciado) podendo estabelecer automaticamente o nível populacional ótimo em cultivos de tradicionais e orgânicos de *Coffea canephora* (Coelho et al., 2004; Partelli et al., 2010).

Como comparação, numerosos trabalhos reportam que o cafeeiro arábica cultivado em condição de estresse competitivo pode apresentar decréscimo da taxa fotossintética, taxa de transpiração, condutância estomática e consumo de CO₂ (Matos et al., 2013), além de redução dos teores minerais foliares (Ronchi et al., 2003; Fialho et al., 2012) e em última instância redução do crescimento e produção (Moraima-Garcia et al., 2000; Ronchi et al., 2007; Fialho et al., 2011).

CONCLUSÕES

Nós demonstramos que a área plantada de *Coffea canephora* se concentra nas regiões noroeste e norte. Também foi demonstrado que os altos índices de temperatura do ar estão concentrados entre outubro e abril, sobre influência das baixas altitudes, e que elevados índices de precipitação pluviométrica acompanham esta tendência temporal. Valores elevados de déficit hídrico e evapotranspiração da cultura esta relacionados a altas temperaturas média do ar e baixo índice de precipitação pluvial e, pelo menos em parte, pela altitude, longitude e ação dos oceanos. O estoque para retirada de água do solo para as regiões sul, norte e noroeste são semelhantes, desta forma, diferentes índices de déficit hídrico estão associados à disparidade temporal e espacial dos índices de evapotranspiração real, das altas temperaturas do ar e dos baixos índices de precipitação pluvial entre os meses secos do ano, e pela possibilidade de sazonalidade da precipitação pluvial nos períodos de transição presentes em regiões tropicais. Além disto, foi possível observar tipos de solos (Cambissolo, Neossolos e Gleissolos) que podem ser limitantes ao cultivo de plantas de café conilon, por suas características ou pela interação com variáveis climáticas. A caracterização climática indicou que a vulnerabilidade ao cultivo de plantas de café conilon está ligada ao baixo (central e sul) e alto (região norte, noroeste e sul) índice de temperatura do ar e amplitude térmica, a sazonalidade e a baixos índices de precipitação pluvial (região norte, noroeste, central e sul), a evapotranspiração real (região norte, noroeste, central e sul), ao déficit hídrico (região norte, noroeste e sul) e aos tipos de solos (região norte, central). Nós identificamos estratégias efetivas de adaptação e mitigação, sendo: o plantio de clones de café conilon melhorados (todas as regiões), a utilização de sistemas de policultivos, arborizados e sombreados (região norte e noroeste, e acerca do mar na região central e sul), o adensamento de plantas de café conilon (região central e sul), a implantação de sistemas de irrigação (todas as regiões) e o manejo de plantas espontâneas (todas as regiões).

REFERÊNCIAS

AMADO, T.J.C.; MATOS, A.T.; TORRES. L. Flutuação de temperatura e umidade do solo sob preparo convencional e em faixas na cultura da cebola. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 24, p. 625-631, 1990.

ANDRADE, W.E.B.; NASCIMENTO, D.; ALVES, S.M.C.; PINTO, R.S. Efeito da irrigação por gotejamento na produtividade e nos parâmetros de produção do café conilon no Norte

Fluminense - primeira produção. In: **II Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil**. Vitória-ES, Brasil. Anais, Brasília-DF: Embrapa Café e CBPD-Café, N°. 2, 2002, p. 24-27.

ANDROCIOLI, A.F. Procedimentos para o adensamento de plantio e contribuição para o aumento de produtividade. In: **Simpósio internacional sobre café adensado**. Londrina-PR, Brasil. Anais, Londrina-PR: IAPAR, N°. 1, 1996, p. 249-275.

ANTONGIOVANNI, L.L.; COELHO, A.L.N. **Panorama sobre desertificação no Estado do Espírito Santo**, 2005, p. 90.

ARAUJO, G.L.; REIS, E.F.; MORAIS, W.B.; GARCIA, G.O.; NAZÁRIO, A.A. Influência do déficit hídrico no desenvolvimento inicial de duas cultivares de café conilon. **Irriga**, v. 16, p. 115-124, 2011.

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO, J.R.J., ÁVILA, A.M.H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, 2004.

BACA, M.; LÄDERACH, P.; HAGGAR, J.; SCHROTH, G.; ORIANA OVALLE, O. An integrated framework for assessing vulnerability to climate change and developing adaptation strategies for coffee growing families in Mesoamerica. **PLoS ONE**, v. 9, n. 2, e88463, 2014.

BATISTA-SANTOS, P.; LIDON, F.C.; FORTUNATO, A.; LEITÃO, A.E.; LOPES, E.; PARTELLI, F.; RIBEIRO, A.I.; RAMALHO, J.C. The impact of cold on photosynthesis in genotypes of *Coffea spp.* - photosystem sensitivity, photoprotective mechanisms and gene expression. **Journal of Plant Physiology**, v. 168, p. 792–806, 2011.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação. In: **Hidrologia: ciência e aplicação**, N°. 3, UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 2002, p.177-231.

BICC (Bureau de Inteligência Competitiva do Café). **Relatório Internacional de Tendências do Café**. N°. 3, 2014, p. 01-10.

BRAGANÇA, R. Avaliação de incrementos de temperatura no zoneamento agroclimatológico para a cultura do café no Estado do Espírito Santo. **Tese (doutorado em Produção Vegetal)**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Campos dos Goytacazes, 2012, 289 p.

BRAGANÇA, S.M.; SILVA, E.B.; GUARÇONI, A.M.; SANTOS, L.P.; LANI, J.A.; VOLPI, P.S. Resposta do cafeeiro conilon à adubação de NPK em sistema de plantio adensado. **Coffee Science**, v. 4, p. 67-75, 2009.

BUSATO, C.; REIS, E.F.; MARTINS, C.C.; PEZZOPANE, J.E.M. Lâminas de irrigação aplicadas ao café conilon na fase inicial de desenvolvimento. **Revista Ceres**, v. 54, p. 351-357, 2007.

CAMARGO, M.B.P. The impact of climatic variability and climate change on Arabic coffee crop in Brazil. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 239-247, 2010.

CAMPOS, P.S.; QUARTIN, V.; RAMALHO, J.C.; NUNES, M.A. Electrolyte leakage and lipid degradation account for cold sensitivity in leaves of *Coffea spp.* plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 160, p. 283–292, 2009.

CASTRO, F.S.; PEZZOPANE, J.R.M.; CECÍLIO, R.A.; PEZZOPANE, J.E.M. Uso de imagens de radar na espacialização da temperatura do ar. **Idesia**, v. 28, p. 69-79, 2010a.

CASTRO, F.S.; PEZZOPANE, J.E.M.; CECÍLIO, R.A.; PEZZOPANE, J.R.M.; XAVIER, A.C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista brasileira engenhaia agrícola ambiental**, v. 14, v. 8, p. 871 880, 2010b.

CARELLI, M.L.C.; FAHL, J.I.; TRIVELIN, P.C.O.; QUEIROZ-VOLTAN, R.B. Carbon isotope discrimination and gas exchange in *Coffea* species grown under different irradiance regimes. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 11, p. 63-68, 1999.

CAVATTE, P.C.; OLIVEIRA, A.A.G.; MARTINS, S.V.; WOLFGRAMM, R.; DaMATTA, F.M. Desenvolvimento de variedades visando à tolerância à seca em *Coffea canephora*: um enfoque fisiológico. In: **Seminário para a Sustentabilidade da Cafeicultura**, N°. 1, UFES, Centro de Ciências Agrárias, Alegre-ES, 2008, p. 01-20.

CECÍLIO, R.A.; SILVA, K.R.; XAVIER, A.C.; PEZZOPANE, J.R.M. Método para a espacialização dos elementos do balanço hídrico climatológico. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 47, n. 4, p. 478-488, 2012.

COELHO, R.A.; RICCI, M.S.F.; ESPÍNDOLA, J.A.A.; COSTA, J.R. Influência do sombreamento sobre a população de plantas espontâneas em área cultivada com cafeeiro (*Coffea canephora*) sob manejo orgânico. **Agronomia**, v. 38, n. 2, p. 23-28, 2004.

COSTE, R. **Coffee: The Plant and the Product**. Macmillan Press Ltd., United Kingdom, 1992.

CRUZ, C.D. Genes - software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 35, p. 271-276, 2013.

DaMATTA, F.M.; RENA, A.B. Ecofisiologia de cafezais sombreados e a pleno Sol. In: **O estado da arte de tecnologias na produção de café**, N°. 1, UFV, Viçosa-MG, 2002, p. 93-135.

DaMATTA, F.M.; CHAVES, A.R.M.; PINHEIRO, H.A.; DUCATTI, C.; LOUREIRO, M.E. Drought tolerance of two field-grown clones of *Coffea canephora*. **Plant Science**, v. 164, p. 111–117, 2003.

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

DaMATTA, F.M.; RAMALHO, J.D.C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, p. 55-81, 2006.

DaMATTA, F.M.; RONCHI, C.P.; SALES, E.F.; ARAÚJO, J.B.S. O café conilon em sistemas agroflorestais. In: **Café Conilon**, N^o. 1, Seag/Incaper, Vitória-ES, 2007b, p. 377-389.

DaMATTA, F.M.; RONCHI, C.P.; MAESTRI, M.; BARROS, R.S. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 4, p. 485-510, 2007a.

DaMATTA, F.M.; RONCHI, C.P.; MAESTRI, M.; BARROS, R.S. Coffee: environment and crop physiology. In: **Ecophysiology of Tropical Tree Crops**. Nova Science Publishers, New York, 2010, p. 181–216.

DARDENGO, M.C.J.D.; REIS, E.F.; PASSOS, R.R. Influência da disponibilidade hídrica no crescimento inicial do cafeeiro conilon. **Bioscience Journal**, v. 25, p. 01-14, 2009.

DAVIS, A.P.; GOLE, T.W.; BAENA, S.; MOAT, J. The impact of climate change on indigenous arabica coffee (*Coffea arabica*): predicting future trends and identifying priorities. **PLoS ONE**, v. 7, e47981, 2012.

DAVIS, A.P.; TOSH, J.; RUCH, N.; FAY, M.F. Growing coffee: *Psilanthus* (Rubiaceae) subsumed on the basis of molecular and morphological data; implications for the size, morphology, distribution and evolutionary history of *Coffea*. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 167, p. 357-377, 2011.

EAKIN, H. Institutional change, climate risk, and rural vulnerability: Cases from central Mexico. **World Development**, v. 33, n. 11, p. 1923–1938, 2005.

EAKIN, H.; TUCKER, C.; CASTELLANOS, E. Responding to the coffee crisis: a pilot study of farmers adaptations in Mexico, Guatemala and Honduras. **Geography Journal**, v. 172, p. 156–171, 2006.

EAKIN, H.; TUCKER, C.M.; CASTELLANOS, E.; DIAZ-PORRAS, R.; BARRERA, J.F.; MORALES, H. Adaptation in a multi-stressor environment: perceptions and responses to climatic and economic risks by coffee growers in Mesoamerica. **Environment, Development and Sustainability**, v. 16, n. 1, 123-139, 2014.

EMBRAPA. **Mapa digital de solos do Brasil**. 2013. <<http://www.cnps.embrapa.br/>>. Acesso em: junho de 2014.

FERRANT, S.; CABALLERO, Y.; PERRIN, J.; GASCOIN, S.; DEWANDEL, B.; AULONG, S.; DAZIN, F.; SHAKEEL, A.S.; MARÉCHAL, J.C. Projected impacts of climate change on farmers extraction of groundwater from crystalline aquifers in South India. **Scientific reports**, v. 4, p. 01-12, 2014.

FAZUOLI, L.C.; THOMAZIELLO, R.A.; CAMARGO, M.B.P. Aquecimento global, mudanças climáticas e a cafeicultura paulista. **O Agrônomo**, v. 59, p. 01-02, 2007.

FILHO, J.A.M.; BRAVIM, A.J.B.; TRAGINO, P.H. Avaliação de produtividade do cafeeiro conilon em cinco safras e em quatro diferentes espaçamentos adensados na região norte do Espírito Santo. In: Simpósio de pesquisa dos cafés do Brasil, 8., Pesquisa cafeeira: sustentabilidade e inclusão social. **Anais...** Embrapa Café, Brasília-DF, 2013, p. 01-05.

FIALHO, C.M.T.; FRANÇA, A.C.; TIRONI, S.P.; RONCHI, C.P.; SILVA, A.A. Interferência de plantas daninhas sobre o crescimento inicial de *Coffea arabica*. **Planta Daninha**, v. 29, n. 1, p. 137-148, 2011.

FIALHO, C.M.T.; SILVA, A.A.; FARIA, A.T.; TORRES, L.G.; ROCHA, P.R.R.; SANTOS, J.B. Leaf nutrient content in coffee plants and weeds cultivated in competition. **Planta Daninha**, v. 30, n. 1, p. 65-73, 2012.

FERRÃO, R.G.; CRUZ, C.D.; FERREIRA, A.; CECON, P.R.; FERRÃO, M.A.G.; FONSECA, A.F.A.; CARNEIRO, P.C.S.; SILVA, M.F. Parâmetros genéticos em café Conilon. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 43, p. 61-69, 2008.

FERRÃO, R.G.; FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, M.A.G.; SANTOS, L.P. Comportamento de clones elites de café conilon em condições de alta tecnologia no Estado do Espírito Santo. In: **Simpósio de Pesquisa dos cafés do Brasil**, n.º. 1, Embrapa Café e Minasplan, Poços de Caldas-MG, 2000, p. 769-771.

FERRÃO, M.A.G.; FERRÃO, R.G.; FONSECA, A.F.A.; VERDIM FILHO, A.C.; VOLPI, P.S.; SOUZA, E.M.R.; MORELI, A.P. Cultivares de café arabica e conilon recomendadas para o Estado do espírito santo. In: **Tecnologia para Sustentabilidade da Cafeicultura**, N°. 3 UFES, Centro de Ciências Agrárias, Alegre-ES, 2011, p. 51-68.

FERRÃO, R.G.; FERRÃO, M.A.G.; FONSECA, A.F.A.; VOLPI, P.S.; VERDIM FILHO, A.C.; LANI, J.A.; MAURI, A.L. **Diamante Incaper 8112: nova variedade de café conilon de maturação precoce para o Espírito Santo**, Documento N°. 219, DCM/Incaper, Vitoria-ES, 2013, p. 01-05.

FERRÃO, R.G.; FERRÃO, M.A.G.; FONSECA, A.F.A.; VOLPI, P.S.; VERDIM FILHO, A.C.; LANI, J.A.; MAURI, A.L. **Jequitibá Incaper 8122: Nova variedade de café conilon de maturação intermediária para o Espírito Santo**, Documento N°. 220, DCM/Incaper, Vitoria-ES, 2013, p. 01-05.

FERRÃO, R.G.; FERRÃO, M.A.G.; FONSECA, A.F.A.; VOLPI, P.S.; VERDIM FILHO, A.C.; LANI, J.A.; MAURI, A.L. POLONINI, A.M. **Centenária Incaper 8132: nova variedade de café conilon de maturação tardia para o Espírito Santo**, Documento N°. 221, DCM/Incaper, Vitoria-ES, 2013, p. 01-05.

GAY, C.; ESTRADA, F.; CONDE, C.; EAKIN, H.; VILLERS, L. Potential impacts of climate change on agriculture: A case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. **Climatic Change**, v. 79, p. 259–288, 2006.

GHINI, R.; HAMADA, E.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; MARENGO, J.A.; GONÇALVES, R.R.V. Risk analysis of climate change on coffee nematodes and leaf miner in Brazil. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 43, p. 187-194, 2008.

GUARÇONI, A.M. Características da fertilidade do solo influenciadas pelo plantio adensado de café conilon. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 3, p. 949-958, 2011.

HAGGAR, J.; SCHEPP, K. **Coffee and climate change: Impacts and options for adaptation in Brazil, Guatemala, Tanzania and Vietnam**. Climate Change, Agriculture and Natural Resources Working Paper Series, N°. 4, 2012. London: Natural Resources Institute, University of Greenwich.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012) Perfil dos Municípios Brasileiros – 2013. Em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/perfilmunic/2012/>. Acesso em: maio de 2015.

ICO (International Coffee Organization), 2014a. **Trade statistics**. Available: http://www.ico.org/trade_statistics.asp. Acesso em: maio de 2015.

ICO (International Coffee Organization), 2014b. **World coffee trade (1963–2013): A review of the markets, challenges and opportunities facing the sector**. International Coffee Council, 29 p.

IPCC. **Climate change 2013: Regional Aspects - Central and South American**. Geneva: IPCC, 2013, p. 102.

JARAMILLO, J.; CHABI-OLAYE, A.; KAMONJO, C.; JARAMILLO, A.; VEGA, F.E. Thermal Tolerance of the Coffee Berry Borer *Hypothenemus hampei*: Predictions of Climate Change Impact on a Tropical Insect Pest. **PLoS ONE**, v. 4, e6487, 2009.

JESUS JUNIOR, W.C.; MARTINS, L.D.; RODRIGUES, W.N.; MORAES, W.B.; AMARAL, J.F.T.; TOMAZ, M.A.; ALVES, F.R. **Mudanças climáticas: potencial impacto na sustentabilidade da cafeicultura**. In: Inovação, difusão e integração: bases para a sustentabilidade da cafeicultura. N°. 3, UFES, Centro de Ciências Agrárias, Alegre-ES, 2012, p. 179-201.

LÄDERACH, P.; HAGGAR, J.; LAU, C.; EITZINGER, A.; OVALLE, O.; BACA, M.; JARVIS, A.; LUNDY, M. **Mesoamerican Coffee: Building a Climate Change Adaptation Strategy**. CIAT policy brief n. 2, 2010, CIAT, Cali, Colombia, 4p.

LIN, B.B. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 4, p. 510–518, 2010.

MACHADO FILHO, J.A.M.; SILVA, L.V.M.; COSTA, P.R. Macronutrientes no solo e no tecido foliar do café conilon em lavoura sob diferentes níveis de sombreamento com seringueira. In: **Fertbio**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, UFAL, Maceió, 2012, p. 01-04.

MAESTRI, M.; BARROS, R.S. Coffee. In: **Ecophysiology of Tropical Crops**. Academic Press, London, 1977, p. 249-278.

MAESTRI, M.; BARROS, R.S.; RENA, A.B. Coffee. In: **Tree Crop Ecosystems**. Elsevier Publishers, Amsterdam, 2001, p. 339-360.

MARTINS, L.D.; TOMAZ, M.A.; LIDON, F.C., DAMATTA, F.M.; RAMALHO, J.C. Combined effects of elevated [CO₂] and high temperature on leaf mineral balance in *Coffea spp.* plants. **Climatic Change**, v. 126, p. 365-379, 2014.

MARTINS, A.G.; MACHADO FILHO, J.A.; SILVA, L.V.M.; SANTANA, D.B. Serrapilha acumulada e características químicas do solo em lavoura de café conilon sob diferentes níveis de sombreamento com seringueira. In: **Fertbio**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, UFAL, Maceió, 2012, p. 01-04.

MARSETTI, M.M.S.; BONOMO, R. PARTELLI, F.L.; SARAIVA, G.S. Déficit hídrico e fatores climáticos na uniformidade da florada do cafeeiro Conilon irrigado. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 7, p. 371-380, 2013.

MATIELLO, J.B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo: Globo, 1991, 319 p.

MATOS, C.C.; FIALHO, C.C.T.; FERREIRA, E.V.; SILVA, D.V.; SILVA, A.A.; SANTOS, J.B.; FRANÇA, A.C.; GALON, L. Características fisiológicas do cafeeiro em competição com plantas daninhas. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 5, p. 1111-1119, 2013.

MENDES, L.; GHINI, R.; BETTIOL, W. Effects of elevated atmospheric carbon dioxide on the biological control of coffee leaf rust under controlled conditions. **IOBC/WPRS Bulletin**, v. 78, p. 189-192, 2012.

MORAES, W.B.; JESUS JUNIOR, W.C.; PEIXOTO, L.A.; MORAES, W.B.; COSER, S.M.; CECÍLIO, R.A. Impact of climate change on the phoma leaf spot of coffee in Brazil. **Interciencia**, v. 37, n. 4, p. 272-278, 2012.

MIRANDA, E.E. **Brasil em Relevo**, 2015. (Embrapa Monitoramento por Satélite) <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>. Acesso em: maio de 2015.

MORAIMA-GARCIA. S.; CANIZARES, A.; SALCEDO, F.; GUILLEN, L. The contribution to determine critical levels of weed interference in coffee crops of Monagas State, Venezuela. **Bioagro**, v. 12, n. 3, p. 63-70, 2000.

MORALES, H.; CASTELLANOS, E.; TUCKER, C.; DIAZ, R. Global Change and Coffee: Strategies for effective adaptation and risk reduction. 2010. www.uvg.edu.gt/instituto/centros/cea/cafe. Acesso em: junho de 2014.

MÜLLER, P.; LI, X.P.; NIYOGI, K.K. Non-photochemical quenching. A response to excess light energy. **Plant Physiology**, v. 155, p. 1558-1566, 2001.

NZEADIBE, T.; EGBULE, C.L.; CHUKWUONE, N.A.; AGWU, A.E.; AGU, V.C. Indigenous innovations for climate change adaptation in the Niger Delta region of Nigeria. **Environment, Development and Sustainability**, v. 14, n. 6, p. 901–914, 2012.

PARTELLI, F.L.; VIEIRA, H.D.; VIANA, A.P.; BATISTA-SANTOS, P., LEITÃO, A.E.; RAMALHO, J.C. Low temperature impact on photosynthetic parameters in coffee genotypes. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 44, p. 1404-1415, 2009.

PARTELLI, F.L.; VIEIRA, H.D.; SILVA, M.G.; RAMALHO, J.C. Seasonal vegetative growth of different age branches of Conilon coffee tree. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 3, p. 619–626, 2010.

PARTELLI, F.L.; VIEIRA, H.D.; FREITAS, S.P.; ESPINDOLA, J.A. Aspectos fitossociológicos e manejo de plantas espontâneas utilizando espécies de cobertura em cafeeiro conilon orgânico. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 3, p. 605-618, 2010.

PARTELLI, F.L.; MARRÉ, W.B.; FALQUETO, A.R.; VIEIRA, H.D.; CAVATTI, P.C. Seasonal vegetative growth in genotypes of *coffea canephora* - as related to climatic factors. **Journal of Agricultural Science**, v. 5, p. 108-116, 2013.

PEZZOPANE, J.R.M.; MARSETTI, M.M.S.; FERRARI, W.R.; PEZZOPANE, J.E.M. Alterações microclimáticas em cultivo de café conilon arborizado com coqueiro-anão-verde. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 865-871, 2011.

PEZZOPANE, J.R.M. Consorciação-associação de culturas com o cafeeiro. In: **Seminário para a Sustentabilidade da Cafeicultura**, N°. 1, Ufes, Centro de Ciências Agrárias, Alegre-ES, 2008, p. 81-96.

PINHEIRO, H.A.; DaMATTA, F.M.; CHAVES, A.R.M.; LOUREIRO, M.E.; DUCATTI, C. Drought tolerance is associated with rooting depth and stomatal control of water use in clones of *Coffea canephora*. **Annals of Botany**, v. 96, p. 101-108, 2005.

PINHEIRO, H.A.; DaMATTA, F.M.; CHAVES, A.R.M.; FONTES, E.B.; LOUREIRO, M.E. Drought tolerance in relation to protection against oxidative stress in clones of *Coffea canephora* subjected to long-term drought. **Plant Science**, v. 167, p. 1307-1314, 2004.

PIROVANI, D.B. Cenários de mudanças climáticas e impacto no zoneamento agroclimático de espécies florestais no Estado do Espírito Santo. **Tese (doutorado em Produção Vegetal)** - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias, Alegre-ES, 2014, 133 p.

RAMALHO, J.C.; QUARTIN, V.; LEITÃO, A.E.; CAMPOS, P.S.; CARELLI, M.L.; FAHL, J.I.; NUNES, M.A. Cold acclimation ability of photosynthesis among species of the tropical *Coffea* genus. **Plant Biology**, v. 5, p. 631-641, 2003.

RAMALHO, J.C.; DaMATTA, F.M.; RODRIGUES, A.P.; CAMPOS, P.S.; PAIS, I.; BATISTA-SANTOS, P.; PARTELLI, F.L.; RIBEIRO, A.; LIDON, F.C.; LEITÃO, A.E. Cold impact and acclimation response of *Coffea* spp. plants. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, p. 05–18, 2014.

RAMALHO, J.C.; RODRIGUES, A.P.; SEMEDO, J.N.; PAIS, I.; MARTINS, L.D.; SIMÕES-COSTA, M.C.; LEITÃO, A.E.; FORTUNATO, A.S.; BATISTA-SANTOS, P.; PALOS, I.; TOMAZ, M.A.; SCOTTI-CAMPOS, P.; LIDON, F.C.; DAMATTA, F.M. Sustained photosynthetic performance of *Coffea* spp. under long-term enhanced [CO₂]. **PLoS ONE**, v. 8, e82712, 2013.

RAHN, E.; LÄDERACH, P.; BACA, M.; CRESSY, C.; SCHROTH, G.; MALIN, D.; SHRIVER, J. Climate change adaptation, mitigation and livelihood benefits in coffee production: where are the synergies? **Mitig Adapt Strategies Global Change**, v. 19, p. 1119-1137, 2014.

RENA, A.B.; CARVALHO, C.H.S. Causas abióticas da seca de ramos e morte de raízes em café. In: **Produção Integrada de Café**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2003, p.197-222.

RENA, A.B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. In: **Ecophysiology of coffee growth and production**. In: Cultura do Cafeeiro: fatores que afetam a produtividade. Potafos, Piracicaba-SP, 1986, p.13-85.

RIKXOORT, H.V.; SCHROTH, P.; LÄDERACH, P.; RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, B. Carbon footprints and carbon stocks reveal climate-friendly coffee production. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 34, p. 887– 897, 2014.

RODRÍGUEZ-LÓPEZ, N.F.; CAVATTE, P.C.; SILVA, P.E.M.; MARTINS, S.C.V.; MORAIS, L.E.; MEDINA, E.F.; DaMATTA, F.M. Physiological and biochemical abilities of robusta coffee leaves for acclimation to cope with temporal changes in light availability. **Physiol Plantarum**, v. 149, p. 45-55, 2013.

RONCHI, C.P.; DaMATTA, F.M. Aspectos fisiológicos do café conilon. In: **O Café Conilon**. Incaper, Vitória-ES, 2007, p. 95-115.

RONCHI, C.P.; TERRA, A.A.; SILVA, A.A.; FERREIRA, L.R. Acúmulo de nutrientes pelo cafeeiro sob interferência de plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 21, n. 2, p. 219-227, 2003.

RONCHI, C.P.; TERRA, A.A.; SILVA, A.A. Growth and nutrient concentration in coffee root system under weed species competition. **Planta Daninha**, v. 259, n. 4, p. 679-687, 2007.

SALES, E.F. **Convivendo com a seca no Espírito Santo**. Documentos N°. 97, Emcapa, Vitória-ES, 1998, 28 p.

SCHROTH, G.; LADERACH, P.; DEMPEWOLF, J.; PHILPOTT, S.; HAGGAR, J.; EAKIN, H.; RAMIREZ-VILLEGAS, J. Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 14, p. 605-625, 2009.

SILVA, A.A.; FRANÇA, A.C.; RONCHI, C.P.; CARVALHO, F.P. Manejo integrado de plantas daninhas em lavouras de café. In: **Seminário para a Sustentabilidade da Cafeicultura**, N°. 1, Ufes, Centro de Ciências Agrárias, Alegre-ES, p. 113-121, 2008.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology, New Jersey, Drexel Inst. of Technology, 1955, 104p.

TUCKER, C.M.; EAKIN, H.; CASTELLANOS, E.J. Perceptions of risk and adaptation: coffee producers, market shocks, and extreme weather in Central America and Mexico. **Global Environmental Change**, v. 20, p. 23-32, 2010.

WILLSON, K.C. **Coffee, Cocoa and Tea**. CAB International, 1999, Wallingford.

VERDIN FILHO, A.C.; TOMAZ, M.A.; FERRÃO, R.G.; FERRÃO, M.A.G.; FONSECA, A.F.A.; RODRIGUES, W.N. Conilon coffee yield using the programmed pruning cycle and different cultivation densities. **Coffee Science**, v. 9, p. 489-494, 2014.

