

Aplicação de índices espectrais na avaliação do aumento da concentração de dióxido de carbono atmosférico em cafeeiro

Emília Hamada ¹
Flávio Jorge Ponzoni ²
Renata Ribeiro do Valle Gonçalves ³

¹ Embrapa Meio Ambiente
Caixa Postal 69 - 13820-000 - Jaguariúna - SP, Brasil
emilia.hamada@embrapa.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
flavio@dsr.inpe.br

³ Universidade Estadual de Campinas - Unicamp/CEPAGRI
Cidade Universitária "Zeferino Vaz" - 13083-970 - Campinas - SP, Brasil
renaribeiro@yahoo.com.br

Abstract. Human influence on the climate system is clear, and recent anthropogenic emissions of greenhouse gases are the highest in history. In addition, recent climate change have had widespread impacts on human and natural system. The morphology and the physiological processes of plants can be altered by increasing the atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentration. The objective of this study was to evaluate the spectral indexes of individual leaves of coffee cv. Obatã IAC 1669-20 under the effect of increased atmospheric CO₂ concentration. Samples of coffee leaves were collected in August and in December 2013, from plants cultivated in the FACE experiment ("Free Air CO₂ Enrichment"), located at Embrapa Environment, Jaguariúna - SP. Seven spectral index were evaluated. The spectral propriety of leaves collected in August detected the effect of CO₂ enriched environment by adopting the PSSRa and PSSRb (Pigment Specific Simple Ratio, chlorophyll a and b, respectively) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), at 1 % of significance. However, the same was not observed in leaves collected in December and the effect of CO₂ enriched environment was not significant. Additional studies are been conducted in order to better understanding of the interaction process between the spectral properties of individual leaves and the enriched CO₂ concentration environment.

Palavras-chave: *Coffea arabica*, cv. Obatã, climate change, radiometric, mudanças climáticas, radiometria.

1. Introdução

Segundo o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), o aquecimento do sistema climático é inequívoco e é causado pelas crescentes emissões de gases de efeito estufa de origem antrópica. Muitas das alterações observadas são sem precedentes e, nas últimas décadas, essas mudanças no clima têm causado impactos nos sistemas natural e humano em todos os continentes e oceanos.

O dióxido de carbono (CO₂) é um dos principais gases de efeito estufa e sua concentração na atmosfera vem aumentando, significativamente, desde o início da Revolução Industrial. Sabe-se que, em geral, elevada concentração de CO₂ atmosférico promove o crescimento de plantas, com alterações na morfologia, anatomia, composição química e no perfil de expressão de genes, além de aumento da biomassa e produção, por exemplo, para soja e cana-de-açúcar, segundo Braga et al. (2006) e Souza et al. (2008), respectivamente. Em plantas jovens de café, foram observadas diferenças significativas quanto ao tratamento com CO₂ do número total de nós e a altura das plantas, mas sem diferenças no número total de folhas, número total de ramos e diâmetro do colo (Iost, 2013).

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café, com 2,3 milhões de hectares plantados e é representada por 300 mil propriedades de tamanhos diversos, com dois terços delas classificadas como de agricultura familiar (Meireles et al., 2009). Segundo esses

autores, face às mudanças climáticas, o cafeeiro poderá sofrer influências negativas na produtividade e citam como possíveis estratégias para contornar seus impactos e viabilizar a cultura do café o desenvolvimento de novas cultivares para condições de temperaturas mais elevadas e o aperfeiçoamento das práticas agrônômicas, como irrigação, arborização, adensamento e manejo do mato.

Muitas aplicações de sensoriamento remoto para vegetação dependem do conhecimento das propriedades espectrais de folhas individuais e plantas (Campbell, 2007). Essas propriedades estão associadas ao processo de interação entre a radiação eletromagnética e o alvo e, por exemplo, no caso de folhas, depende dos componentes e processos físico-químicos que ocorrem em sua estrutura foliar, que não são idênticos para todas as plantas.

O cafeeiro arábica (*Coffea arabica* L.) é uma planta especial, que diferentemente da maioria das plantas que emitem as inflorescências na primavera e frutificam no mesmo ano fenológico, leva dois anos para completar o ciclo fenológico (Camargo e Camargo, 2001). Essa característica particular quanto à sua produção, com uma sucessão de fases vegetativas e reprodutivas que ocorrem em, aproximadamente, dois anos é conhecida como bienalidade. Do ponto vista do sensoriamento remoto orbital, embora a cultura do café apresente uma resposta espectral complexa, Epiphany et al. (1994) observaram correlações significativas entre características biofísicas da planta e a reflectância.

Com as alterações das condições ambientais pelas mudanças climáticas, a morfologia e os processos fisiológicos das plantas podem ser alterados com o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) atmosférico e as suas propriedades espectrais podem se diferenciar.

O presente trabalho teve por objetivo avaliar os índices espectrais de folhas individuais de cafeeiro cv. Obatã IAC 1669-20 sob o efeito do aumento da concentração de CO₂ atmosférico.

2. Metodologia de Trabalho

O estudo foi conduzido na área do experimento FACE ("Free Air CO₂ Enrichment") instalado na Embrapa Meio Ambiente, localizado na cidade de Jaguariúna, SP, nas coordenadas 22°43'S de latitude e 47°01'W de longitude e 570m de altitude, nos meses de agosto e de dezembro de 2013.

O FACE começou a operar em agosto de 2011, fruto do projeto de pesquisa Climapest ("Impactos das mudanças climáticas globais sobre problemas fitossanitários"), no âmbito do Macroprograma 1 (Grandes Desafios Nacionais) da Embrapa. Atualmente, sua condução é contemplada no projeto ClimapestFACE ("Impacto do aumento da concentração de dióxido de carbono atmosférico e disponibilidade de água sobre a cultura do café em experimento FACE") do Macroprograma 2 da Embrapa. Trata-se do primeiro FACE da América Latina, sendo o primeiro a estudar a cultura do café no mundo.

O experimento FACE ocupa uma área de sete hectares de lavoura de café e é composto de doze parcelas octogonais com 10 m entre lados opostos, dos quais seis recebem a aplicação de CO₂ vindo de um tanque de armazenamento de 20 ton que alimenta o sistema de injeção e outros seis anéis permanecem sem tratamento, ou seja, em condições atmosféricas normais, conforme Figura 1. As parcelas são monitoradas continuamente por meio de equipamentos analisadores da concentração de CO₂, sensores de temperatura, umidade do ar e do solo, precipitação, radiação solar global e fotossinteticamente ativa, velocidade e direção do vento, instalados nas parcelas para monitoramento e liberação de CO₂. É utilizado um sistema de injeção direta, onde o CO₂ é injetado puro e é diluído pelo próprio vento, para que seja alcançada a concentração média de 200 ppm acima do valor ambiente, no centro da parcela. Em cada segmento do octógono há uma válvula que é acionada automaticamente para compensar a direção do vento e há ainda um dispositivo de controle de fluxo para compensar as mudanças de velocidade do vento.

Desde sua implantação, trabalhos de pesquisa vêm sendo realizados por uma equipe multidisciplinar e interinstitucional, que inclui instrumentação, aspectos fitossanitários, interações multitróficas, plantas e solo. A medida espectral está contemplada na avaliação das plantas.

As folhas coletadas foram as que não apresentavam nenhuma lesão aparente, do terceiro ou quarto par de folhas do terço intermediário da planta. As folhas coletadas eram transportadas ao laboratório localizado na área experimental, acondicionadas em sacos plásticos e mantidos abertos durante o trajeto. Foram realizadas duas coletas de folhas individuais de café cv. Obatã IAC 1669-20, em agosto (seco) e dezembro (dezembro) de 2013, com coleta, ao acaso, de 30 folhas de diferentes plantas por parcela em agosto e cinco folhas em dezembro, devida à disponibilidade de folhas sem lesão. As medidas espectrais foram realizadas utilizando radiômetro FieldSpec Pro, atuando de 300nm a 2500nm, no qual foi acoplado um dispositivo denominado LeafClip, que permitiu o registro de valores de fatores reflectância da face ventral de cada folha.

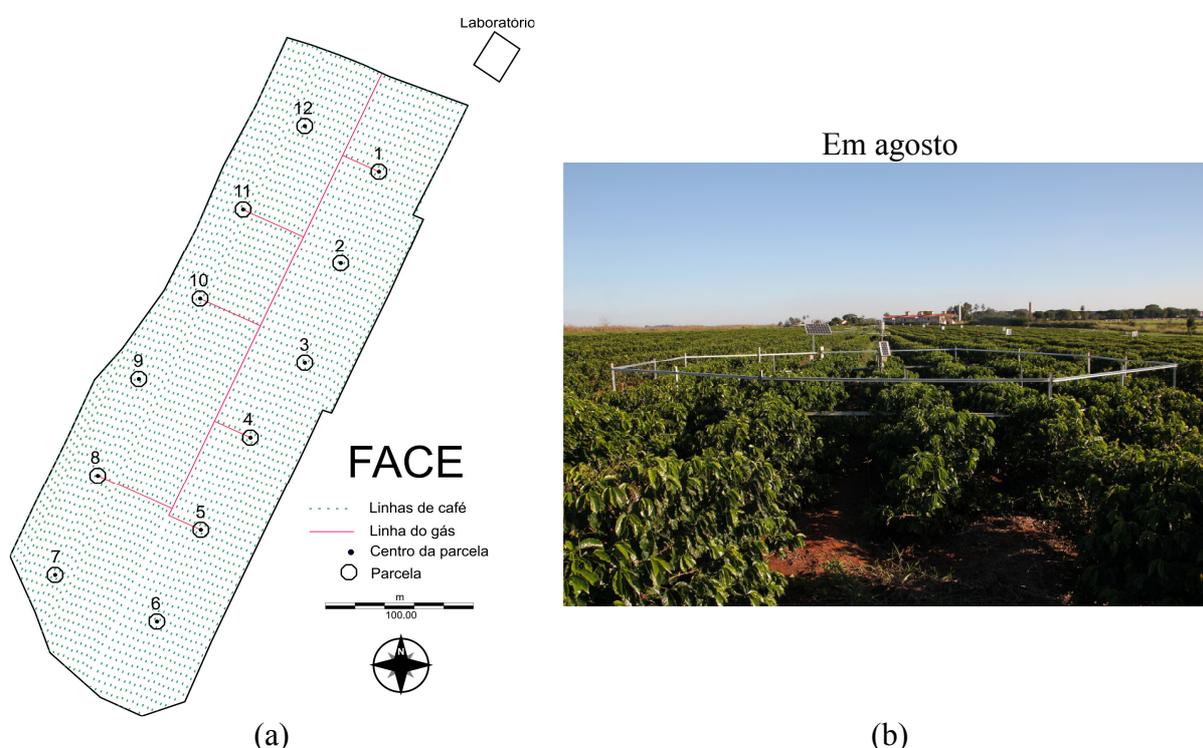


Figura 1. (a) Distribuição das parcelas no experimento FACE, localizado na Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna – SP. (b) Detalhe de uma parcela do experimento. Foto: Wagner Bettiol.

Foram calculados sete índices espectrais, apresentados a seguir:

Índice Pigmento Estrutural Independente (Penuelas et al., 1995)

$$SIPI = (R_{800} - R_{445}) / (R_{800} - R_{680}) \quad (1)$$

onde: R_{800} , R_{445} e R_{680} representam o fator de reflectância espectral em 800nm, 445nm e 680nm, respectivamente.

Este índice compara quantidades de carotenos com clorofila a de forma que quanto maior seu valor, maiores serão os teores de clorofila em relação aos teores de carotenóides. Essa relação pode ser associada a alterações na atividade fotossintética.

Índice Diferença Normalizada da Clorofila (Richardson et al., 2002)

$$\text{Chl NDI} = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705}) \quad (2)$$

onde: R_{750} e R_{705} representam o fator de reflectância espectral em 750nm e 705nm, respectivamente.

Este índice é um indicador do total de clorofila presente na folha, de forma que quanto maior seu valor, maiores seriam os teores de clorofila total.

Índice da Razão Simples do Pigmento Específico para Clorofila a (Blackburn, 1998)

$$\text{PSSRa} = R_{800} / R_{675} \quad (3)$$

onde: R_{800} e R_{675} representam o fator de reflectância espectral em 800nm e 675nm, respectivamente.

Índice da Razão Simples do Pigmento Específico para Clorofila b (Blackburn, 1998)

$$\text{PSSRb} = R_{800} / R_{650} \quad (4)$$

onde: R_{800} e R_{650} representam o fator de reflectância espectral em 800nm e 650nm, respectivamente.

Estes dois últimos índices são indicativos das quantidades de clorofila a e b, respectivamente.

Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Tucker, 1979)

$$\text{NDVI} = (R_{760-850} - R_{630-685}) / (R_{760-850} + R_{630-685}) \quad (5)$$

onde: $R_{760-850}$ e $R_{630-685}$ representam o fator de reflectância espectral na faixa de 760nm a 850nm e 630nm a 685nm, respectivamente.

Índice de Reflectância Fotoquímica (Gamon et al., 1992)

$$\text{PRI} = (R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570}) \quad (6)$$

onde: R_{531} e R_{570} representam o fator de reflectância espectral em 531nm e 570nm, respectivamente.

Índice da Diferença Normalizada de Nitrogênio (Serrano et al., 2002)

$$\text{NDNI} = (\text{Log}(1/R_{1510}) - \text{Log}(1/R_{1680})) / (\text{Log}(1/R_{1510}) + \text{Log}(1/R_{1680})) \quad (7)$$

onde: R_{1510} e R_{1680} representam o fator de reflectância espectral em 1510nm e 1680nm, respectivamente.

Os dados de fator de reflectância resultantes nas duas campanhas foram organizados em planilhas eletrônicas, permitindo sua visualização na forma gráfica e o cálculo de índices de vegetação, como calculados por Lakkaraju et al. (2010) na avaliação do efeito da concentração de CO₂ em solo sob o desenvolvimento de plantas herbáceas.

3. Resultados e Discussão

Os espectros médios de fator de reflectância obtidos nas seis parcelas com CO₂ ambiente e seis com CO₂ enriquecido em folhas isoladas de café cv. Obatã IAC 1669-20 referentes às

campanhas de agosto e dezembro de 2013 encontram-se apresentados nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

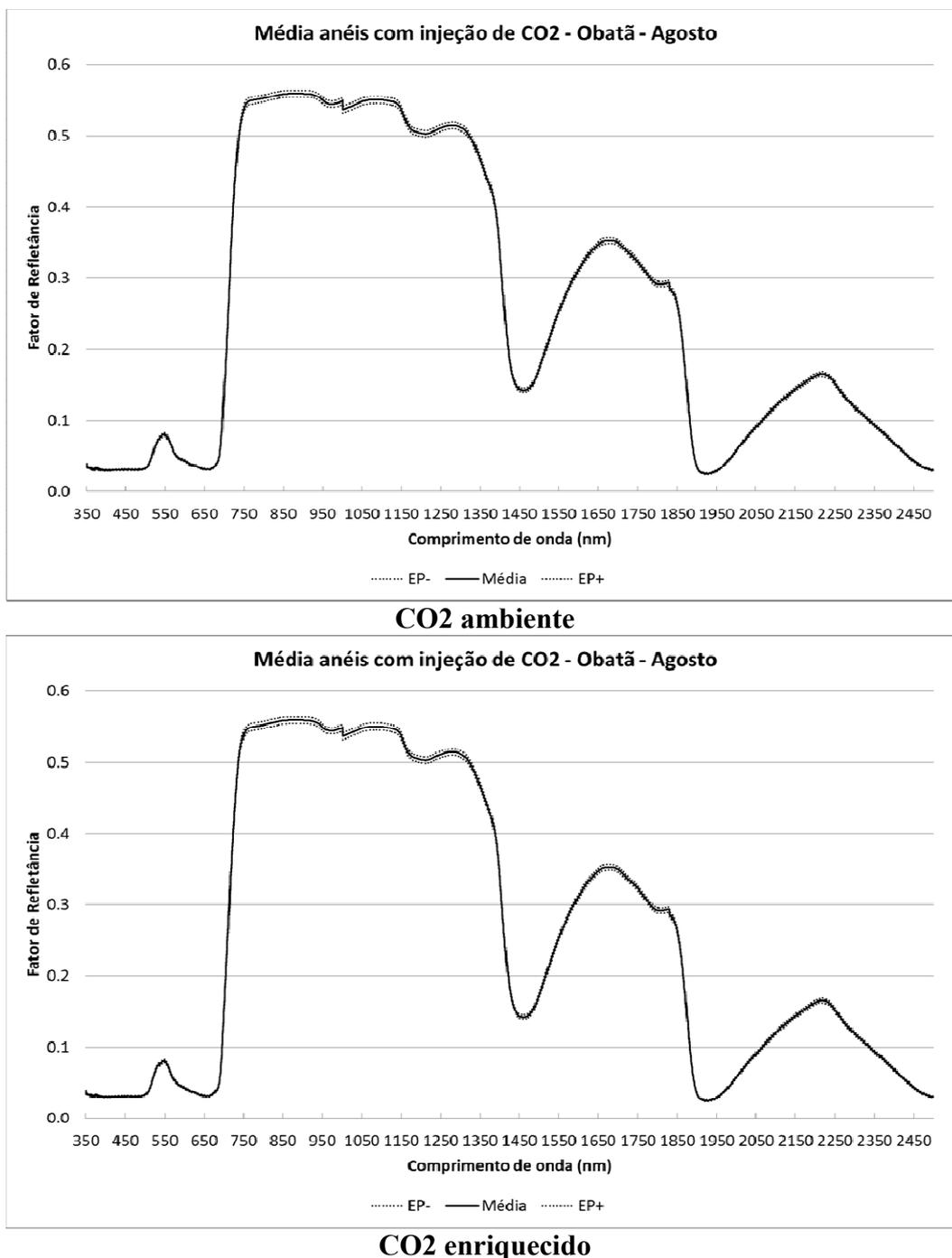


Figura 2. Curvas espectrais de folhas isoladas de café cv. Obatã, média e erro padrão de parcelas com CO₂ ambiente e enriquecido, em agosto de 2013.

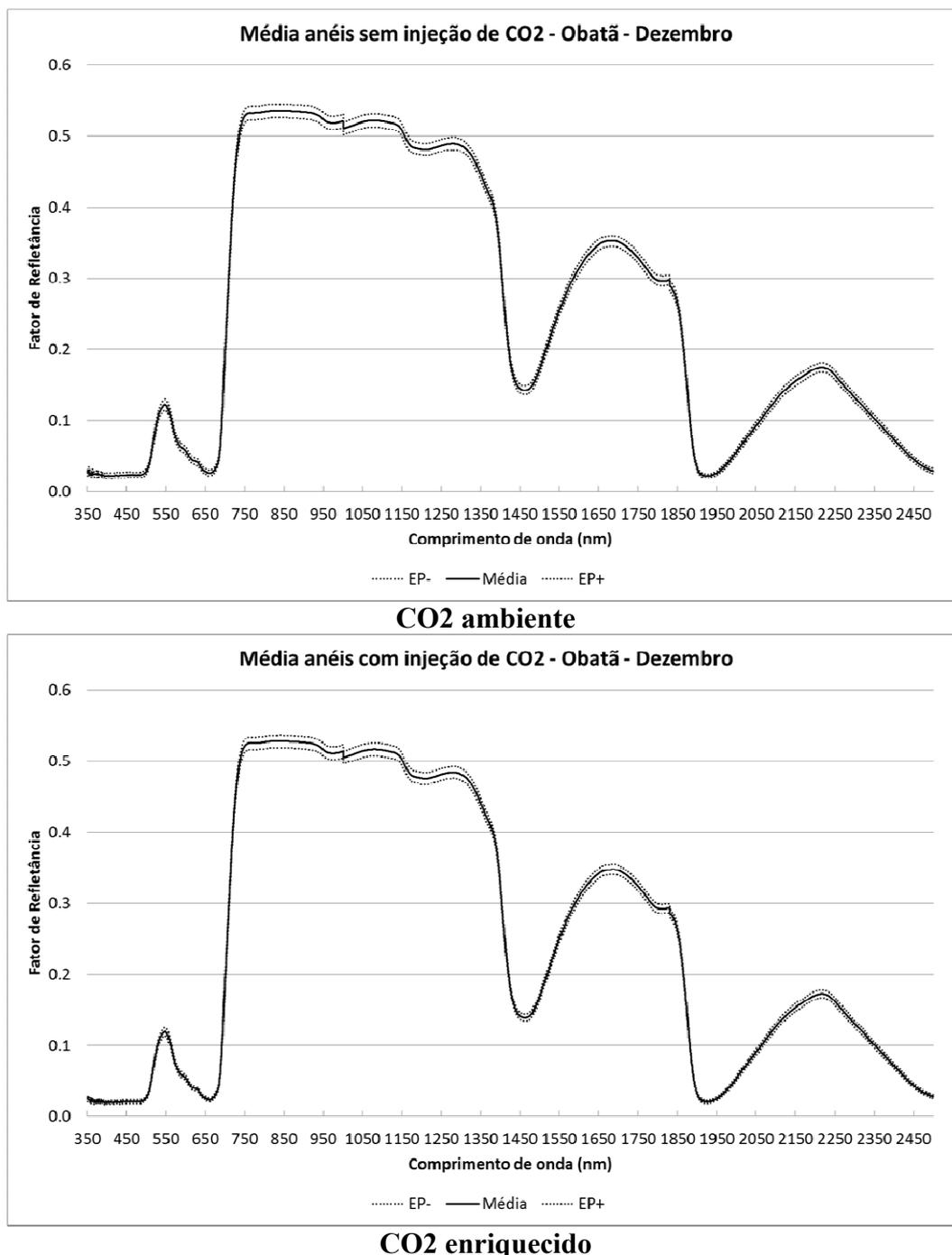


Figura 3. Curvas espectrais de folhas isoladas de café cv. Obatã, média e erro padrão de parcelas com CO₂ ambiente e enriquecido, em dezembro de 2013.

Os espectros das Figuras 2 e 3 apresentam similaridade no padrão, entre parcelas com CO₂ ambiente e enriquecido para as duas datas. Erros padrão maiores nas curvas de dezembro são em função do menor número de folhas (amostras) comparado a agosto. Análise estatística foi realizada considerando os índices espectrais calculados a partir das curvas das amostras coletadas nos dois períodos, cujos resultados estão apresentados na Tabela 1. Foram observados efeitos do ambiente enriquecido CO₂ nas folhas de agosto, utilizando-se os índices PSSRa, PSSRb e NDVI, ao nível de 1% de significância. O NDVI é um dos índices mais utilizados e os índices PSSRa e PSSRb são indicativos das quantidades de clorofila a e b, respectivamente. Porém, o efeito do enriquecimento do CO₂ ambiente não foi observado nas

folhas coletas em dezembro. Avaliações devem ser continuadas por um maior período de tempo de forma a se chegar a resultados mais conclusivos.

Tabela 1. Média dos índices espectrais para o cultivar Obatã em ambiente com e sem enriquecimento de CO₂ e valor P ajustado pelo teste de Tukey ao nível de 1% em coletas de dados de Agosto e Dezembro de 2013.

Índice Espectral	Data	CO ₂ Enriquecido	CO ₂ Ambiente	Valor P
SIPI	Agosto	1,016	1,017	0,437
	Dezembro	1,030	1,029	0,518
Chl NDI	Agosto	0,455	0,463	0,137
	Dezembro	0,357	0,352	0,693
PSSRa	Agosto	15,726**	14,836**	0,001
	Dezembro	17,872	17,609	0,853
PSSRb	Agosto	17,932**	17,007**	0,006
	Dezembro	21,234	20,081	0,375
NDVI	Agosto	0,884**	0,877**	0,001
	Dezembro	0,894	0,888	0,369
PRI	Agosto	0,117	0,117	0,997
	Dezembro	0,134	0,125	0,218
NDNI	Agosto	0,229	0,231	0,092
	Dezembro	0,229	0,229	0,842

Teste de Tukey: ** significativo (P < 0,01)

SIPI = Índice Pigmento Estrutural Independente

Chl NDI = Índice Diferença Normalizada da Clorofila

PSSRa = Índice da Razão Simples do Pigmento Específico para Clorofila a

PSSRb = Índice da Razão Simples do Pigmento Específico para Clorofila b

NDVI = Índice de Vegetação da Diferença Normalizada

PRI = Índice de Reflectância Fotoquímica

NDNI = Índice da Diferença Normalizada de Nitrogênio

4. Conclusões

Na avaliação do aumento da concentração de CO₂ atmosférico em cafeeiro, os índices PSSRa e PSSRb (Índices da Razão Simples do Pigmento Específico para Clorofila a e b, respectivamente) e NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) conseguiram identificar esse efeito parcialmente, assim estudos adicionais deverão ser realizados para entendimento melhor do processo de interação entre as propriedades espectrais de folhas e o aumento da concentração de CO₂ atmosférico.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Embrapa – projeto Macroprograma 2, pelo suporte financeiro.

Referências Bibliográficas

Blackburn, G. A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, p. 657-675, 1998.

Braga, M. R.; Aidar, M. P. M.; Marabesi, M.A.; Godoy, J. R. L. Effects of elevated CO₂ on the phytoalexin production of two soybean cultivars differing in the resistance to stem canker disease. **Environmental and Experimental Botany**, v. 58, p. 85-92, 2006.

Camargo, A. P.; Camargo, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.

Campbell, J. B. **Introduction to remote sensing**. New York: The Guilford Press, 2007. 626 p.

Epiphanyo, J. C. N.; Leonardi, L.; Formaggio, A. R. Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n.3, p. 439-447, 1994.

Gamon, J.; Penuelas, J.; Field, C. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v. 41, p. 35-44, 1992.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Summary for policymakers. In: IPCC. Climate change 2014: synthesis report. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 40 p. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_SPM.pdf>. Acesso em 06 nov. 2014.

Iost, R. **Problemas fitossanitários e crescimento de duas cultivares de café durante o primeiro ano em experimento FACE (“Free Air Carbon Dioxide Enrichment”)**. 2013. 90 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Proteção de Plantas) - UNESP, Botucatu. 2013.

Lakkaraju, V. R.; Zhou, X.; Apple, M. E.; Cunningham, A.; Dobeck, L. M.; Gullickson, K.; Splangler, L. H. Studying the vegetation response to simulated leakage of sequestered CO₂ using spectral vegetation indices. **Ecological informatics**, v. 5, p. 379-389, 2010.

Meireles, E. J. L.; Volpato, M. M. L.; Camargo, M. B. P.; Caramori, P. H.; Fahl, J. I.; Bartholo, G. F. Café. In: Monteiro, J. E. B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília, DF: INMET, 2009. p. 354-372.

Penuelas, J.; Baret, F.; Filella, I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ration from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica**, v. 31, p. 221-230, 1995.

Richardson, A. D.; Duigan, S. P.; Berlyn, G. P. An evaluation of non-invasive methods to estimate foliar chlorophyll content. **New Phytologist**, v. 153, p. 185-194, 2002.

Serrano, L.; Penuelas, J.; Ustin S. L. Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS data: decomposing biochemical from structural signals. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 355-364, 2002.

Souza, A. P.; Gaspar, M.; Silva, E. A.; Ulian, E. C.; Waclawovsky, A. J.; Nishiyama Jr., M. Y.; Santos, R. V.; Teixeira, M. M.; Souza, G. M.; Buckeridge, M. S. Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. **Plant, Cell and Environment**, v. 31, p.1116-1127, 2008.

Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, p. 127-150, 1979.