

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa e
Adaptação do Café Arábica a Condições Climáticas
Adversas**

PRISCILA PEREIRA COLTRI

CAMPINAS
JULHO/2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa e
Adaptação do Café Arábica a Condições Climáticas
Adversas**

Tese de Doutorado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de
Doutora em Engenharia Agrícola na área de
concentração de Planejamento e
Desenvolvimento Rural Sustentável.

PRISCILA PEREIRA COLTRI

Orientador: Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior

Co-orientador: Prof. Dr. Hilton Silveira Pinto

CAMPINAS
JULHO/2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C722m Coltri, Priscila Pereira
Mitigação de emissão de gases de efeito estufa e
adaptação do café arábica a condições climáticas
adversas / Priscila Pereira Coltri. --Campinas, SP: [s.n.],
2012.

Orientador: Jurandir Zullo Junior
Coorientador: Hilton Silveira Pinto.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Mudanças climáticas. 2. Café - Cultivo. 3.
Arborização. 4. Biomassa. 5. Sensoriamento remoto. I.
Zullo Junior, Jurandir. II. Pinto, Hilton Silveira. III.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: Mitigation of greenhouse gas emissions and adaptation of arabica
coffee to adverse climatic conditions

Palavras-chave em Inglês: Climate change, Coffee - growing, Afforestation, Biomass,
remote sensing

Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Paulo Henrique Caramori, Margarete Marin Lordelo Volpato,
Glauca Miranda Ramirez, Maria Angela Fagnani

Data da defesa: 10-07-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Priscila Pereira Coltri**, aprovada pela Comissão Julgadora em 10 de julho de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp

FEAGRI



Dr. Paulo Henrique Caramori - Membro Titular
IAPAR



Dra. Margarete Marin Lordelo Volpato
EPAMIG



Profa. Dra. Glaucia Miranda Ramirez - Membro Titular
UFLA

Faculdade de Engenharia Agrícola
Unicamp



Profa. Dra. Maria Angela Fagnani - Membro Titular
Feagri/Unicamp

Ao meu marido *Thales Luiz Drezza*
e aos meus pais, *Claudio Coltri e Maria Inês Pereira Coltri*,

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) pela oportunidade de realização do curso.

Ao CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura) pela oportunidade de realização da pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro de quatro anos de bolsa de doutorado.

A EMBRAPA Café, pelo auxílio financeiro do projeto de pesquisa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior e meu co-orientador Prof. Dr. Hilton Silveira Pinto, pela oportunidade, incentivo e tempo a mim dedicado durante a realização deste trabalho.

À Coordenadoria de Pós-graduação pelo apoio administrativo e atenção oferecida.

A EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais) por nos oferecer a área de estudo.

À Université Rennes 2, França, pela oportunidade do doutorado Sanduiche e apoio financeiro - Je remercie à l'Université Rennes 2 pour le soutien financier et de m'avoir accueillie.

Je remercie M. Vincent Dubreuil et Mme Laurence Hubert-Moy ancien directeur et directrice du laboratoire COSTEL et actuel directeur M. Hervé Quenol, de m'avoir accueillie au sein du laboratoire. Je tiens à remercier également sincèrement M. Samuel Corgne e M. Vincent Nédélec.

Je tiens également à remercier tous les membres du laboratoire **COSTEL** (Climat, Occupation du Sol par Télédétection) pour leur accueil et leur sympathie. Plus particulièrement, je remercie a mes amis Florian, Pauline, Clémence, Chloe, Sebastian, Emilie, Cyril, Damien, Jean. Merci aux doctorants, postdocs, stagiaires, du laboratoire qui à un moment ou à un autre ont pu m'apporter leur aide.

Ao meu orientador francês Prof. Dr. Vincent Dubreuil, pelo acolhimento, oportunidade e pelas contribuições ao trabalho durante minha estada na França. – A mon directeur de thèse M. le professeur Vincent Dubreuil, je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour m'avoir donné l'opportunité d'effectuer ce stage.

Aos meus colegas Franco-brasileiros: Mirreille (Mi-Zoca), Bruno da Silva Rodrigues e Leonardo Aitaide Minora.

Ao meu amigo Maxime Vitter, pela amizade, e grande ajuda com o a língua francesa, os relatórios, apresentações. Max, je tiens à t'adresser mes sincères remerciements pour tout l'aide.

A minha amiga e “co-co-orientadora” Profa. Dra. Maria Angela Fagnani, pelo apoio, ajuda e amizade.

A todos os funcionários da Fazenda da EPAMIG de São Sebastião do Paraíso, representados pelo Dr. Darlan Einstein do Livramento.

A todos os funcionários do CEPAGRI/UNICAMPO pelo auxílio e apoio.

Ao meu estagiário André Vanucci e aos estagiários do Cepagri que muito me auxiliaram: Ederson (Jaú), Rodrigo, Mauricio, Raquel, Vitor.

Aos colegas do ICMC da USP – São Carlos, representados pela Prof. Dra. Agma Jaci Machado Traina.

A Embrapa Informática pelo suporte e apoio.

Ao CPTEC/INPE, pelos dados do modelo de mudanças climáticas ETA.

A Rosa Helena Aguiar, do Laboratório de Tecnologia de Pós-colheita, pela ajuda com a secagem das amostras de campo.

A minhas amigas Renata Gonçalves, Michele Cotta, Ana Ávila, Luciana Alvim, Camila Lazarim, Glaucia Ramirez e Marina Miranda, pelo estímulo e ajuda durante o doutorado.

Aos amigas Marilene de Jesus, da Embrapa Informática; Andrea Koga, Susian Martins, Andrea Yang e Clovis Matheus Pereira, do CEPAGRI.

Aos amigos de jornada Cíntia Maluf, Celso Macedo Junior e Wander.

As minhas eternas e grandes amigas Foker, Relpi, Japa, Tafas e Porva.

A minha irmã, Patricia Pereira Coltri e ao meu cunhado, Paulo Roberto Guimarães Jr., por sempre estarem ao meu lado me incentivando, em qualquer fase ou etapa.

A minha família pelo apoio, amor incondicional e paciência.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para o êxito deste trabalho, meu eterno agradecimento.

*"A mente que se abre a uma nova idéia
jamais volta ao seu tamanho original"*

Albert Einstein

RESUMO

A elevação da concentração dos gases de efeito estufa (GEEs) na atmosfera, especialmente o dióxido de carbono, tem causado alterações significativas nos elementos atmosféricos, acarretando mudanças e variações no clima com importantes consequências. Projeções do IPCC (2007) para as áreas tropicais brasileiras indicam que a temperatura média global poderá aumentar entre 1°C e 5,8°C, o que traria grandes impactos na atividade agrícola e nos recursos naturais. Se as estimativas do IPCC (2007) estiverem corretas, as maiores áreas produtoras de café arábica do Brasil poderão se tornar de alto risco climático para o cultivo, causando sérios impactos na produção de café e no agronegócio brasileiro. O presente trabalho busca contribuir para o estudo da cafeicultura brasileira no contexto das mudanças climáticas projetadas para as próximas décadas. Três aspectos principais foram analisados: as possíveis mudanças climáticas para o sudeste do Brasil nesse século (2011-2099) com o modelo regional de mudanças climáticas ETA/CPTEC (*dowscaling* do HadCm3); atividades de adaptação da cultura em um cenário climático mais quente; e a relação da cultura com o estoque de carbono atmosférico, como uma atividade de mitigação. Analisando o ETA/CPTEC, foi possível verificar que, sem atividades de adaptação e mitigação, aumentará o risco climático para o cultivo do café arábica em oito dos dez municípios na região de estudo. Como uma atividade de adaptação a cenários climáticos mais quentes, foram avaliadas três formas de arborização para reduzir a temperatura no microclima do cultivo de café em comparação com o cultivo a pleno sol, mais utilizado no país. As variáveis micrometeorológicas nos sistemas de cultivo de café foram medidos em campo e também simulados no software “Envi-Met”. Em comparação com o sistema a pleno sol, o tratamento mais arborizado (café plantado em consórcio com macadâmia) recebeu 29,4% a menos de radiação solar e reduziu a temperatura do ar em apenas 0,6°C no microclima de cultivo, indicando que nos cenários mais quentes projetados pelo ETA/CPTEC, esse sistema de plantio não será uma forma de adaptação da cultura. Analisando a relação do café arábica com atividades de mitigação dos GEEs, foi medida a quantidade de carbono (biomassa seca) que a cultura a pleno sol e cultivada com macadâmia pode estocar. Para tanto, utilizaram-se métodos destrutivos, em campo, e de sensoriamento remoto com imagens de alta resolução. Em campo, verificou-se que o sistema de cultivo de café com macadâmia estoca, em média, 2 toneladas de carbono por hectare a mais que o sistema a pleno sol. Esses resultados permitiram validar a premissa de que sistemas agroflorestais com café são considerados uma importante forma de mitigação dos gases de efeito estufa. Na análise dos dados de sensoriamento remoto, encontrou-se forte correlação entre o índice de vegetação NDVI, parâmetros biofísicos da cultura e a biomassa, permitindo, assim, a criação de um modelo de estimativa de biomassa para evitar futuras análises destrutivas.

Palavras Chave: modelo mudanças climáticas; ETA/CPTEC; arborização em cafezais; estoque de carbono; biomassa; Geoeye.

ABSTRACT

The increase of greenhouse gas (GHG) concentration in the atmosphere, especially carbon dioxide, is causing wide changes in atmospheric elements, leading to climate change and variability with critical consequences. Projections of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007) indicate that the global temperature is supposed to increase 1°C to 5.8° in the tropical areas of Brazil, causing important impacts in Agriculture and natural resources. If the IPCC (2007) estimates are confirmed, the major areas of current coffee arábica production may become areas of high climatic risk, causing severe impact in coffee production and the Brazilian agribusiness. This project aims to contribute to the study of Brazilian coffee crops (*coffea arabica*) in the context of global climate change expected for the coming decades. Three main aspects were analyzed: Brazilian southeast climate change in the century (2011-2099) with a regional climate change model (ETA/CPTEC, downscaling of HadCM3); the coffee crop adaptation to warmer climates; and the crop relationship with the carbon stock as a mitigation activity. Analyzing the ETA/CPTEC model we found that, with no adaptation and mitigation activities, it will not be possible to cultivate coffee arábica in 8 of the 10 cities in the studied region. As an adaptation alternative in hotter weather, we evaluated three different coffee systems planted with forestry tree in order to reduce micro-climate temperature, and compared them to the most common cultivation system in Brazil: coffee planted at “full sun”. The micrometeorological parameters in each system was measured in the field and also simulated using the Envi-Met software. Comparing to full sun system, the most shaded coffee system (coffee planted with macadamia) received 29,7% less solar radiation, and reduced the temperature only 0,6°C in the cultivation microclimate, indicating that in the warmest scenario this cultivation system will not be an adaptation alternative. Analyzing the coffee relationship with GHG mitigation activities, we measured the coffee crop’s carbon stock (dry biomass) in two cultivation systems: full sun and shaded with macadamia using both destructive methods and remote sensing with high resolution images. Destructive models showed that shaded system with macadamia stocks on average 2 ton per hectare more than full sun systems. These results supported the assumption that agroforestry systems with coffee are considered an important form of mitigation of GHG. Analyzing the remote sensing data we found a strong correlation between the NDVI vegetation index, biophysical plant parameters and biomass. We created a predictive model for biomass and carbon stocks in coffee systems in order to avoid the use of destructive methods.

Key-words: climate change model; ETA/CPTEC; shaded coffee; carbon stock; biomass; Geoye.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquematização das seis fases fenológicas do cafeeiro arábica, durante 24 meses, nas condições climáticas tropicais do Brasil (Fonte: Camargo e Camargo, 2001).	14
Figura 2 – Esquema da divisão da metodologia do trabalho	29
Figura 3 – Localização dos municípios selecionados para análise do clima regional atual e futuro	30
Figura 4 – Localização da área de estudo: São Sebastião do Paraíso, sul de Minas Gerais.....	35
Figura 5- Composição RGB da Imagem de Satélite de alta resolução Geoeye-1 para caracterização da area de estudo com os tratamentos SAF1 e SAF2, e a testemunha pleno sol.	36
Figura 6- Croqui da área de estudo com os tratamentos SAF1 e SAF2, e a testemunha a pleno sol.	36
Figura 7- Composição RGB da Imagem de satélite de alta resolução Geoeye-1 da área do terceiro tratamento (SAF 3), de café arborizado com macadâmia.	37
Figura 8 – Croqui da área de plantio com o tratamento SAF3 de café arborizado com macadâmia.	38
Figura 9 – Modelagem das plantas de café no Envi-Met. Em a: planta no campo e identificação das figuras geométricas que a compõe. Em b: Planta geométrica com as medições feitas em campo, sendo h a altura total da planta, ct a circunferência do tronco, Ac a altura da copa; dc o diâmetro da copa e IAF o índice de área foliar. Em c: divisão das dez partes do modelo.....	41
Figura 10 – Tratamentos no software Envi-Met e localização dos sensores de campo	42
Figura 11 - Localização dos sensores nos sistemas SAF1, SAF2 e SAF3, para o experimento 3. FG = Feijão Guandu, LE = Leucena; GL = Gliricídia, MC = Macadâmia e CF = Café.....	43
Figura 12 - Foto do barracão da Fazenda da EPAMIG com planta de café na análise destrutiva, separada em ramos, folhas, tronco e frutos (no balde).	44
Figura 13- Diferenças, em graus celsius (°C), entre os dados do modelo ETA/CPTEC e a normal climatológica dos dados reais para as temperaturas média (em verde), máxima (em vermelho) e mínima (em azul).....	49

Figura 14- Dados das normais climatológicas real (em azul e verde) e do modelo ETA/CPTEC (vermelho e roxo) para a temperatura em °C (à direita) e a precipitação em mm (à esquerda).	52
Figura 15 – Índice de concordância “d” entre os dados reais e os dados do modelo para as temperaturas máxima (vermelho), mínima (azul) e média (cinza) e precipitação (roxo).	53
Figura 16 - Diferença sazonal das temperaturas máxima (em a), mínima (em b) e média (em c) e da precipitação (em d), para os municípios de Franca (1), Machado (2), Mococa (3), Piracicaba (4), São Carlos (5), São Simão (6), São Lourenço (7), São Roque de Minas (8), Guaxupé (9) e Vargem Bonita (10). Valores para DJF (em azul), MAM (em vermelho), JJA (em verde) e SON (em roxo).	54
Figura 17– Valores das temperaturas máximas nos quatro cenários futuros para o início do século.	58
Figura 18– Valores da temperatura máxima mensal do modelo ETA/CPTEC (<i>baseline</i> e cenários futuros) e dos dados reais da normal climatológica do início do século. Em a as municípios de Franca, Guaxupé, Machado e Mococa e, em b, Piracicaba, São Carlos, São Lourenço, São Simão, São Roque de Minas e Vargem Bonita.	60
Figura 19 – Valores das temperaturas máximas dos cenários para 2056-2099.	62
Figura 20 - Valores da temperatura máxima mensal do <i>baseline</i> do modelo, dos cenários futuros (2056 – 2099) e dos dados reais da normal climatológica (1961-1990). Em (a) os municípios de Franca, Guaxupé, Machado, Mococa, Piracicaba e São Carlos. Em (b), São Lourenço, São Roque de Minas, São Simão e Vargem Bonita.	64
Figura 21 – Diferença mensal entre os dados do <i>baseline</i> do modelo (ETA 60-90) e dos cenários futuros da primeira e segunda metades do século para a cidade de Mococa, SP.	66
Figura 22 – Diferença mensal entre os dados do <i>baseline</i> do modelo e os dados futuros para todos os cenários do início e final do século para os dez municípios estudadas.	67
Figura 23- Diferença de precipitação entre o <i>baseline</i> do modelo ETA/CPTEC e os cenários futuros, para todos os municípios, no início e final do século. Cenário <i>control</i> , em azul, cenário <i>low</i> , em vermelho, cenário <i>midí</i> , em verde e cenário <i>high</i> , em roxo.	72
Figura 24- Balanço Hídrico dos municípios estudadas nos cenários futuros, no início e final do século. Armazenamento de água no solo em milímetros. Déficit hídrico destacado em vermelho.	75
Figura 25 – Quantidade de radiação recebida (em W/m ²) em cada tratamento e na testemunha (a pleno sol). Em a, média da radiação por hora, e em b média geral da radiação recebida. Em a: preto é a testemunha (sol); vermelho é SAF1; azul é SAF2 e verde SAF3.	79

Figura 26- Simulação da sombra nos plantios de café no solstício de inverno	82
Figura 27- Simulação da sombra nos plantios de café no equinócio de primavera.....	83
Figura 28 – Velocidade do vento (em m/s) horário (em a) e total (em b), dos tratamentos SAF1 (verde), SAF2 (azul), SAF3 (vermelho) e a testemunha (preto).	84
Figura 29 – Valores de temperatura máxima na testemunha e nos tratamentos SAF1, SAF2 e SAF3.....	86
Figura 30 – Comparação dos valores médios mensais de temperatura máxima para a testemunha (azul) e os tratamentos SAF1 (vermelho), SAF2 (verde) e SAF3 (roxo).....	87
Figura 31 – Diferença entre a média mensal da temperatura máxima da testemunha com os tratamentos SAF1 (em azul), SAF2 (em vermelho) e SAF3 (em verde).	87
Figura 32 – Média da temperatura máxima horária na testemunha (em vermelho) e nos tratamentos SAF1 (em azul), SAF2 (em preto) e SAF3 (em verde).	89
Figura 33 – Temperatura máxima em dias nublados, para a testemunha (em preto), SAF1 (em vermelho), SAF2 (em verde) e SAF3 (em azul).....	90
Figura 34 – Valores médios de temperatura mínima em graus centígrados (°C) na testemunha, e nos tratamentos SAF1, SAF2 e SAF3.	91
Figura 35- Média mensal da temperatura mínima da testemunha (em azul), e dos tratamentos SAF1 (em vermelho), SAF2 (em verde) e SAF3 (em roxo).	92
Figura 36 – Média horária da temperatura mínima registrada na testemunha (em vermelho) e nos tratamentos SAF1 (em azul), SAF 2 (em preto) e SAF3 (em verde).....	93
Figura 37 – Média mensal da umidade relativa (%) na testemunha sol (em azul) e dos tratamentos SAF 1 (em vermelho), SAF2 (em verde) e SAF3 (em roxo).....	94
Figura 38- Média horária da umidade relativa (%) na testemunha (em preto), e nos tratamentos SAF1 (em vermelho), SAF2 (em verde) e SAF3 (em azul).	95
Figura 39- Dados do terceiro dia da simulação em comparação aos dados reais da testemunha (em a), SAF1 (em b), SAF 2(em c) e SAF 3 (em d). Em azul, a temperatura simulada, em vermelho, a temperatura experimental de campo; em verde, a umidade relativa (%) simulada e, em roxo, a umidade relativa (%) medida em campo. Horário, no eixo X, temperatura (°C), no eixo y esquerdo, e umidade relativa (%), no eixo y direito.	97
Figura 40- Dados do terceiro dia de simulação em comparação aos dados reais medidos em campo da testemunha (em a), dos tratamentos SAF1 (em b), SAF 2(em c) e SAF3 (em d). Em	

azul, radiação direta simulada e, em vermelho, radiação direta medida. Horário, no eixo X, e radiação (em W/m^2) no eixo Y.....	98
Figura 41 – Temperatura em graus centígrados ($^{\circ}C$) nos sensores A, B, C, D e E do sistema de plantio SAF1.....	100
Figura 42 – Temperatura em graus centígrados ($^{\circ}C$) nos sensores A, B, C, D e E do sistema de plantio SAF2.....	100
Figura 43 – Temperatura em graus celsius ($^{\circ}C$) nos sensores A, B, C e D do sistema de plantio SAF3, com destaque para os dados de temperatura de 9 até 16 horas.	101
Figura 44 – Diferença da temperatura horária entre os sistemas SAF1, SAF2 e SAF3 (média dos sensores).....	102
Figura 45- Radiação (W/m^2) nos sensores dos sistemas SAF1 (em a), SAF2 (em b) e SAF3 (em c).....	103
Figura 46 - Diferença de radiação solar horária entre os sistemas SAF1, SAF2 e SAF3 (média dos sensores).....	107
Figura 47 – Umidade Relativa nos sensores do sistema SAF1.	108
Figura 48 – Umidade Relativa nos sensores dos sistemas SAF2.	108
Figura 49 – Umidade Relativa nos sensores dos sistemas SAF3.	109
Figura 50 - Diferença da umidade relativa horária entre os sistemas SAF1, SAF2 e SAF3 (média dos sensores).....	109
Figura 51 – Variáveis meteorológicas (radiação, temperatura e umidade relativa) na testemunha, às 15 horas do dia 16/09/2009.....	111
Figura 52 – Variáveis meteorológicas (radiação, temperatura e umidade relativa) no sistema SAF1, às 15 horas do dia 16/09/2009.....	112
Figura 53 – Variáveis meteorológicas (radiação, temperatura e umidade relativa) no sistema SAF2, às 15 horas do dia 16/09/2009.....	113
Figura 54 – Variáveis meteorológicas (radiação, temperatura e umidade relativa) no sistema SAF3, às 15 horas do dia 16/09/2009.....	114
Figura 56- Composição da biomassa úmida, em porcentagem, das plantas de café cultivadas a pleno sol (cinza escuro) e no sistema SAF3 (cinza claro).....	116

Figura 57 – Biomassa seca por método destrutivo (eixo X) e biomassa estimada pela equação 4 (eixo Y)..... 122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estações meteorológicas e séries de dados utilizadas.....	31
Tabela 2 – Valores da normal climatológica da precipitação dos dados reais e do <i>baseline</i> modelo ETA/CPTEC e valores da diferença absoluta e relativa entre os dados do modelo e reais.....	49
Tabela 3 – Valores de altitude (em metros) das estações meteorológicas de superfície e do modelo ETA/CPTEC e viés de temperaturas máxima, mínima e média.....	50
Tabela 4 – Acréscimo da temperatura máxima (em °C) – anomalias positivas - dos quatro cenários futuros do início do século e os dados ETA 61-90 (<i>baseline</i>).	56
Tabela 5 – Diferença (em °C) entre os dados do <i>baseline</i> do modelo ETA/CPTEC e os dos cenários futuros para a segunda metade do século (2056-2099).	61
Tabela 6 – Diferença entre os dados do <i>baseline</i> do modelo (ETA 60-90) e os dados dos cenários futuros do início e final do século.	65
Tabela 7 – Diferença entre os dados do <i>baseline</i> do modelo e os dados futuros do início e final do século para os dez municípios estudadas.....	67
Tabela 8 – Aptidão climática para o cultivo do café arábica nos municípios estudados, nos cenários futuros, no início e final do século. Temperatura média anual em graus celsius e deficiência hídrica em milímetros.	76
Tabela 9- Comparação de médias com o teste t de Student. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.	79
Tabela 10 – Comparação de médias com o teste t de <i>Student</i> . Letras diferentes significam diferenças estatísticas.	84
Tabela 11- Comparação de médias com o teste t de <i>Student</i> . Letras diferentes significam diferenças estatísticas.	86
Tabela 12- Comparação de média com o teste t de <i>Student</i> . Letras diferentes significam diferenças estatísticas.	91
Tabela 13- Comparação de médias da umidade relativa (%) com o teste t de <i>Student</i> . Letras diferentes significam diferenças estatísticas.	94

Tabela 14 – Índice de concordância “d” de Willmott para temperatura e umidade relativa para os dias de simulação nos tratamentos SAF1, SAF2 e SAF3 e na testemunha.	96
Tabela 15 - Comparação das médias da radiação com o teste t de <i>Student</i> da radiação nos diferentes sensores do sistema SAF1. Letras diferentes significam diferenças estatísticas. ...	104
Tabela 16 - Comparação das médias da radiação com o teste t de <i>Student</i> nos diferentes sensores do sistema SAF2. Letras diferentes significam diferenças estatísticas	105
Tabela 17 - Comparação das médias da radiação com o teste t de <i>Student</i> nos diferentes sensores do sistema SAF3. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.....	105
Tabela 18 – Quantidade em kg de carbono estocado, em cada parte da planta de café, nos tratamentos a pleno sol e arborizado com macadâmia (SAF3).	118
Tabela 19 – Equações de estimativa da biomassa em cafezais cultivados a pleno sol e arborizados com macadâmia obtidas a partir de dados biofísicos da cultura.	119
Tabela 20 - Correlação de Pearson entre os parâmetros biofísicos dos exemplares de café e dados de NDVI. Valores em negrito são diferentes de 0 com um nível de significância $\alpha = 0,05$	119
Tabela 21 – Biomassa seca medida por método destrutivo (kg/planta) e biomassa estimada pela equação 9 (em kg/planta).	122
Tabela 22 - Comparação da média da temperatura, com o teste t de Student, nos diferentes sensores do sistema SAF1. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.....	126
Tabela 23 - Comparação de média da temperatura, com o teste t de Student, nos diferentes sensores do sistema SAF2. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.....	127
Tabela 24 - Comparação de média da temperatura, com o teste t de Student, nos diferentes sensores do sistema SAF3. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.....	128

SUMÁRIO

RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XV
1. INTRODUÇÃO	1
JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	8
2.1 AGRICULTURA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS	8
2.2 CLIMA E ECOFISIOLOGIA DO CAFÉ ARÁBICA	11
2.3 ARBORIZAÇÃO EM CAFEZAIS	14
2.4 MODELAGEM DE CAFÉ E O SOFTWARE ENVI-MET.....	17
2.5 ESTOQUE DE CARBONO COMO MITIGAÇÃO PARA EMISSÃO DOS GASES DE EFEITO ESTUFA (GEEs)	19
2.6 – MEDIÇÃO DE CARBONO E SENSORIAMENTO REMOTO	22
2.7 – A CULTURA DO CAFÉ E O SENSORIAMENTO REMOTO DE ALTA RESOLUÇÃO.....	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1- ANÁLISE CLIMÁTICA REGIONAL DE MUNICÍPIOS PRODUTORES DE CAFÉ ARÁBICA NO NORTE DE SÃO PAULO E SUL DE MINAS GERAIS, COM O MODELO BRASILEIRO ETA/CPTEC	29
3.1.1) ANÁLISE DOS DADOS DO BASELINE DO MODELO (1961-1990) EM COMPARAÇÃO COM OS DADOS REAIS DAS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS EM SOLO	29
3.1.2) ANÁLISE DOS DADOS DOS QUATRO CENÁRIOS FUTUROS	32
3.1.3) APTIDÃO CLIMÁTICA DE CAFÉ ARÁBICA PARA OS CENÁRIOS FUTUROS.....	33
DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	34
3.2 ARBORIZAÇÃO COMO UMA PRÁTICA DE ADAPTAÇÃO DA CULTURA AOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS	39
3.2.1.) AVALIAÇÕES MICROMETEOROLÓGICAS EM CAMPO	39
3.2.2) MEDIÇÕES BIOFÍSICAS DA CULTURA DO CAFÉ E DAS ESSÊNCIAS DE ARBORIZAÇÃO	39
3.2.3) SIMULAÇÃO COM O SOFTWARE ENVI-MET	39
3.2.4) ÁREA DE ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DA ÁREA PARA SIMULAÇÃO	40
3.2.5) MODELAGEM DA ARQUITETURA DE PLANTAS NO ENVI-MET.....	40
3.3 - MITIGAÇÃO DOS GEEs PELA CULTURA DO CAFÉ ARÁBICA E PELAS ESSÊNCIAS DE ARBORIZAÇÃO:	44
3.3.1) ESTIMATIVA DO ESTOQUE DE CARBONO NA VEGETAÇÃO	44
3.3.1.A) BIOMASSA DO CAFÉ ARÁBICA CULTIVADO A PLENO SOL E ARBORIZADO COM MACADÂMIA (SAF3)	44

3.3.1.B) BIOMASSA DA MACADÂMIA:	45
PARA A DETERMINAÇÃO DA BIOMASSA DA MACADÂMIA, FOI UTILIZADA A EQUAÇÃO ALOMÉTRICA (EQUAÇÃO 7) DESCRITA POR ANDRADE E IBRAHIM (2003).	45
3.3.1.C) BIOMASSA DO CAFÉ ARÁBICA PARA EQUAÇÃO COM DADOS BIOFÍSICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO	46
3.3.1.D) EQUAÇÃO PARA ESTIMATIVA DE BIOMASSA COM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO COM IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1-) ANÁLISE CLIMÁTICA REGIONAL DE MUNICÍPIOS PRODUTORAS DE CAFÉ ARÁBICA NO NORTE DE SÃO PAULO E SUL DE MINAS GERAIS, COM O MODELO BRASILEIRO ETA/CPTEC .	48
4.1.A) ANÁLISE DOS DADOS DO MODELO ETA/CPTEC EM RELAÇÃO ÀS NORMAIS CLIMATOLÓGICAS REAIS	48
4.1.B.) ANÁLISE DOS DADOS DOS CENÁRIOS FUTUROS	55
4.1.C) APTIDÃO CLIMÁTICA DO CAFÉ ARÁBICA NOS CENÁRIOS FUTUROS	75
4.2. ARBORIZAÇÃO COMO UMA PRÁTICA DE ADAPTAÇÃO DA CULTURA AOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS	78
4.2.1 AVALIAÇÕES MICROMETEOROLÓGICAS EM CAMPO DE CAFÉ ARBORIZADO E A PLENO SOL.....	78
4.2) MODELAGEM DOS SISTEMAS DE PLANTIO NO SOFTWARE ENVI-MET.....	95
4.2.1. A.) AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO	95
4.2.2.B.) 3º EXPERIMENTO: LOCALIZAÇÃO DO SENSORES NAS LINHAS DE PLANTIO.....	99
4.2.2.B.1) TEMPERATURA NOS DIFERENTES SENSORES	99
4.2.2.B.2.) RADIAÇÃO NOS DIFERENTES SENSORES	102
4.2.2.B.3) UMIDADE RELATIVA	108
4.2.2.C.) AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS SIMULADAS PELO ENVI-MET NOS TRATAMENTOS SAF1, SAF2 E SAF3, E NA TESTEMUNHA (PLENO SOL).....	109
4.3. QUANTIFICAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO ATMOSFÉRICO NA BIOMASSA DAS PLANTAS DE CAFÉ COMO UMA ATIVIDADE DE MITIGAÇÃO DOS GEEs	114
4.3.1 BIOMASSA DO CAFÉ ARÁBICA CULTIVADO EM PLENO SOL E ARBORIZADO COM MACADÂMIA E A RELAÇÃO DA BIOMASSA COM OS PARÂMETROS BIOFÍSICOS DO CAFÉ	114
4.3.2. EQUAÇÃO PARA ESTIMATIVA DA BIOMASSA DO CAFÉ POR SENSORIAMENTO REMOTO (IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO).....	119
5. CONCLUSÕES.....	123
ANEXOS	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

1. INTRODUÇÃO

Justificativa e Objetivos

O tema “mudanças climáticas globais” tem despertado a atenção de diversos segmentos da sociedade. A avaliação das consequências do aquecimento global está entre os maiores desafios para a comunidade científica na atualidade, uma vez que as alterações no clima poderão causar impactos na saúde, biosfera, produção de alimentos e recursos hídricos, dentre outros setores dos quais a humanidade é dependente. O quarto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007) aponta que o aquecimento global é inequívoco e há mais de 90% de certeza científica de que o planeta esteja aquecendo. No entanto, é necessário quantificar o aquecimento, identificar as causas principais do aumento da temperatura média, assim como as consequências possíveis nas atividades sócio-econômicas da humanidade.

A elevação na concentração dos gases de efeito estufa (GEE), em grande parte resultante da intensificação das atividades antropogênicas, tem causado alterações significativas no clima (IPCC, 2007). Um dos principais resultados desse fato é o aumento da temperatura do planeta que, nos últimos 30 anos aumentou, aproximadamente, 0,2°C por década e, no século passado aumentou 0,8°C (IPCC, 2007). No último relatório do IPCC, seis cenários futuros foram descritos analisando as possíveis consequências climáticas do aumento dos GEE na atmosfera. Todos os cenários futuros apresentaram, além da elevação da temperatura, uma aceleração significativa no ritmo dessa elevação. Ao final desse século, a expectativa traçada nos cenários do IPCC é um aumento de temperatura da ordem de 1,4°C no cenário mais otimista, a 5,8°C no caso mais pessimista. O relatório aponta, ainda, a possibilidade de valores extremos de aumento de temperatura, de até 6,4°C nos próximos 100 anos (IPCC, 2007).

Diante dessa nova perspectiva climática, pesquisas simulando o impacto das mudanças climáticas nas principais culturas agrícolas brasileiras indicaram que o aquecimento global poderá diminuir a produção agrícola caso não seja tomada nenhuma medida de adaptação e mitigação (SIQUEIRA et al., 2001; MARENGO, 2001; NOBRE et al., 2005; STRECK e ALBERTO, 2006; PINTO et al., 2008; FAGUNDES et.al., 2010; SILVA et.al., 2012). Uma

das culturas que apresenta maior vulnerabilidade é o café arábica que embora esteja adaptado às condições climáticas dos trópicos, é extremamente sensível às oscilações dos padrões climáticos (CARR, 2001).

Estudos recentes no Brasil (PINTO et al., 2002; ASSAD et al., 2004; NOBRE et al., 2005; e ZULLO JUNIOR et al., 2006; e PINTO et al., 2008), México (GAY et al., 2006; TUCKER et al., 2010), Guatemala e Honduras (EAKIN et al., 2006) concluíram que a cafeicultura poderá ser impactada pelo aumento das temperaturas e/ou deficiência hídrica, reduzindo a produção do grão e culminando em prejuízos financeiros e sociais. As pesquisas brasileiras sugerem que além das perdas econômicas e sociais, a cultura poderá apresentar uma reconfiguração geográfica, se deslocando para regiões de maiores altitudes e latitudes, em busca de condições climáticas mais favoráveis.

O deslocamento de uma cultura agrícola perene, como é o caso do café, poderá causar impactos sociais e econômicos, tanto na região de origem (onde a cultura é tradicionalmente cultivada) quanto na região destino (que receberá a nova atividade agrícola) (MARKOVITCH et al., 2010). As mudanças no uso do solo resultarão em mudanças locais profundas, como no uso da infraestrutura, mão-de-obra, prestação de serviços e transporte, além de conseqüências para o deslocamento e escoamento da produção. Além disso, os produtores rurais deverão se ajustar a uma nova realidade, possivelmente utilizando estratégias de adaptação que poderão gerar impactos sociais, econômicos e ambientais de alta proporção.

O café é cultivado no Brasil desde 1727 e é uma das culturas agrícolas mais importantes para o país (ZULLO JUNIOR et al., 2011; DAMATTA et al., 2007; MORAIS et al., 2006). De acordo com a *International Coffee Organization* (ICO), o Brasil é responsável por 30% da produção mundial de café, estimada em 7 bilhões de toneladas, seguido do Vietnã e Colômbia. O setor cafeeiro brasileiro exporta dois terços de sua produção, sendo que 75% dessas exportações correspondem à sub-espécie arábica. Segundo o IBGE, o valor da produção nacional atingiu R\$ 9 bilhões em 2007, fazendo do Brasil o principal produtor e exportador oficial do grão (IBGE, 2007).

Em todo o mundo, a produção e comercialização do café geram uma receita de mais de 90 bilhões de dólares por ano (CHAVES et al., 2007). Segundo DAMATTA (2004), o café é a commodity mais importante no comércio internacional agrícola, representando uma fonte de renda considerável para países latino-americanos, africanos e asiáticos. O mesmo autor

ressalta que, na safra 2000/2001, o café foi cultivado mundialmente em mais de 11 milhões de hectares e produziu cerca de 115 milhões de sacas, sendo que 63% de toda a produção foram da sub-espécie arábica (*Coffea arabica* L.), e o restante, da sub-espécie *robusta* (*Coffea robusta*).

A vulnerabilidade do cultivo café arábica no sudeste do Brasil devido a grandes alterações climáticas, ressalta a importância de estudos que avaliem a suscetibilidade agrícola no cenário de aquecimento global. A principal ferramenta para os estudos de vulnerabilidade climática na agricultura são os modelos climáticos globais (MCGs) e o *downscaling* dinâmico, chamados de modelos climáticos regionais (MCRs) (MARENGO et al., 2011). Embora os MCGs sejam a ferramenta mais utilizada, são considerados insuficientes para muitas áreas de estudo devido à sua complexidade, por operarem globalmente e, principalmente, devido à sua baixa resolução espacial (centenas de quilômetros) (GIORGI et al., 2004; SOLMAN et al., 2008). Os MCGs não incorporam as forçantes de escala regional, e, como consequência, não representam de forma adequada os processos de pequena escala (SILVESTRI et al., 2009). Além disso, as variáveis de superfície são influenciadas fortemente pela resolução espacial, sendo que esses modelos não a representam satisfatoriamente (MARENGO et al., 2011; MARENGO et al., 2009; SOLMAN et al., 2008).

Após os trabalhos pioneiros de DICKINSON et al. (1989) e GIORGI (1990), o desenvolvimento dos MCRs, como um *dowscaling* dos MCGs, tem sido amplamente aplicado em diversas áreas de estudo. Nesse processo de melhoria da resolução, o setor agrícola foi muito beneficiado, uma vez que a agricultura é altamente dependente dos processos climáticos de mesoescala. Alguns estudos posteriores demonstraram que as simulações do clima regional representam melhor algumas variáveis climáticas como a precipitação e a temperatura de superfície, quando comparados aos MCGs (CAYA e BENER, 2004; GIORGI et al., 2004; RAISANEN et al., 2004). No entanto, os MCRs ainda apresentam vieses sistemáticos devido a algumas deficiências inerentes à metodologia de “*dowscaling*” (FREI et al., 2003; SETH e ROJAS, 2003; GIORGI et al., 2004; LIANG et al., 2004; MOBERG e JONES, 2004).

No Brasil, o uso de um MCR, o modelo regional PRECIS, com uma resolução de 50km x 50km, permitiu realizar estudos pioneiros com nove culturas agrícolas na nova perspectiva climática global, concluindo que exceção feita à mandioca e à cana-de-açúcar, todas as outras culturas deverão ter redução de produção e de áreas aptas ao plantio com o

aumento das temperaturas (PINTO et al., 2008). No entanto, os autores constataram que esse modelo apresentava restrições quanto à projeção futura da precipitação. Atualmente, o modelo climático brasileiro ETA/CPTEC (CHOU et al., 2011 e MARENGO et al., 2011), desenvolvido pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) vem apresentando desempenho satisfatório na simulação do clima presente, mostrando-se eficiente para estudos em escalas regionais (MARENGO et al., 2011). Além disso, o modelo apresenta projeções futuras de 2011 a 2099, sendo considerado um dos modelos regionais com séries futuras mais completas.

O modelo ETA/CPTEC foi configurado sobre a América do Sul e submetido a um “*downscaling*” utilizando as condições fornecidas pelo modelo inglês HadCM3, que é a terceira versão do modelo acoplado do Hadley Centre (GORDON et al., 2000). O modelo ETA/CPTEC apresenta grade de 40km por 40km e as projeções são geradas para o “clima presente” (*baseline*) de 1961 a 1990 (CHOU et al., 2011) e para o “clima futuro” de 2011 a 2099 (MARENGO et al., 2011). O modelo oferece quatro cenários climáticos futuros de sensibilidade aos gases de efeito estufa (GEEs): alta (*high*), média (*medi*), baixa (*low*) e sem perturbação (*control*), que foram projetados dentro da família A1B do IPCC SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*) (MARENGO et al., 2011).

Na cafeicultura, estratégias de adaptação às possíveis mudanças no clima e mitigação dos GEEs vêm sendo estudadas na tentativa de minimizar os possíveis impactos do clima adverso projetado para século 21 (LIN, 2007; LIN, 2008; CAMARGO, 2010). A mitigação dos GEEs, por meio de preservação dos sumidouros de carbono, tem sido destacada nos estudos, pois, além de estocar o carbono atmosférico, conserva os recursos naturais (CAMARGO, 2010). Estratégias de adaptação incluem iniciativas para reduzir a vulnerabilidade da cultura nos cenários futuros de mudanças climáticas, como mudança e desenvolvimento de novas variedades, alternar os locais de produção, e o plantio de café com árvores, em forma de sistemas agroflorestais (PINTO et al., 2008; LIN, 2007, CAMARGO, 2010). Os sistemas agroflorestais têm ganhado destaque por ser uma alternativa de baixo custo ao produtor, e ainda possibilitar um ganho de renda adicional à produção (PINTO et al., 2008; LIN, 2007).

Diante da importância da cultura cafeeira para o país e o fato de que ela poderá, na perspectiva do aquecimento global, sofrer sérias reconfigurações geográficas em seu cultivo, o

que poderá levar a prejuízos econômicos e sociais, são necessários estudos que contribuam para o desenvolvimento da cultura dentro do contexto das mudanças climáticas.

Nesse sentido este trabalho se baseia nas seguintes hipóteses:

- O modelo regional brasileiro ETA/CPTEC é uma alternativa importante para estudos de vulnerabilidade climática de culturas agrícolas que exijam uma análise em escala regional como o café arábica, e reproduz com fidelidade o clima regional da zona de estudo;

- A arborização em cafeeiros reduz a temperatura no microclima de cultivo, tornando-se uma alternativa de produção em condições climáticas distintas da atual, sendo que os sistemas de plantio de cafeeiros arborizados e a pleno sol podem ser modelados no software de simulação microclimática “Envi-Met”;

- Cafezais “arborizados” e “a pleno sol” são fontes importantes de estoque de carbono atmosférico, representando atividades de mitigação dos gases de efeito estufa, sendo que a quantidade de carbono estocada nas plantas de café pode ser calculada por meio de técnicas de sensoriamento remoto.

Sendo assim, o trabalho abrange dois aspectos fundamentais relacionados às mudanças climáticas: a adaptação do cultivo do café arábica em uma situação climática diferente da atual, e a mitigação dos GEE pela cultura. Para tanto, o trabalho utilizou o MCR ETA/CPTEC, medições em campo, simulações e técnicas de sensoriamento remoto.

Os objetivos gerais do presente trabalho são: (i) avaliar a vulnerabilidade do café arábica nos quatro cenários futuros do MCR ETA/CPTEC para o sul de Minas Gerais e norte de São Paulo; (ii) avaliar três sistemas de plantios de café arborizados como potenciais técnicas de adaptação da cultura aos cenários de mudanças climáticas e, (iii) quantificar por métodos destrutivos e por sensoriamento remoto o estoque de carbono do café arábica, como potencial atividade de mitigação dos GEEs.

O trabalho é dividido em três partes que correspondem aos seus objetivos gerais. A primeira delas é a análise climática regional de dez municípios de uma das maiores regiões produtoras de café do Brasil: sul de Minas Gerais e norte de São Paulo. Nessa análise, considerou-se um estudo inicial do modelo regional ETA/CPTEC comparando-o com dados da normal climatológica de 1961-1990, com o intuito de verificar como o modelo reproduz os dados reais da área de estudo. Em seguida, foram utilizados quatro cenários futuros do modelo para analisar as consequências das mudanças climáticas na aptidão climática do café arábica.

Ressalta-se que oito dos dez municípios estudados na primeira etapa do trabalho foram consideradas de alto risco climático para o café arábica já na início desse século. Na segunda etapa do trabalho foi analisada uma alternativa de adaptação da cultura aos cenários climáticos futuros, com temperaturas mais elevadas que o atual. Para tanto, foram avaliadas três diferentes formas de arborização em cafezais com potencial de redução de temperatura no microclima de cultivo: café plantado com as leguminosas feijão guandu e leucena, café plantado com leucena e gliricidia e, café plantado com a noqueira macadâmia. As medições foram realizadas em trabalhos de campo na fazenda experimental da EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais), no município de São Sebastião do Paraíso, sul de Minas Gerais.

Vale ressaltar que trabalhos de medições microclimáticas em sistemas arborizados com café vêm sendo realizados há muitos anos, mas há uma série de limitações nesse tipo de análise (OIJEN et al., 2010), como baixa representatividade das medições, poucas repetições e muitas extrapolações (RAMIREZ et al., 1993). Esse tipo de experimento, segundo OIJEN et al. (2010), na maioria das vezes é voltado à escolha das espécies de arborização e ao manejo, e, portanto, tem deixado uma lacuna no estudo comparativo dos efeitos da arborização no microclima de plantio. Nesse sentido, os autores ressaltam que é difícil avaliar o quão bem as descobertas experimentais podem ser extrapoladas para outros locais. Nessa “lacuna experimental”, a modelagem e a simulação de sistemas arborizados e agroflorestais em café ganham importância e destaque.

O software de simulação microclimática “Envi-Met” (*Environmental Meteorology*), desenvolvido pela universidade alemã de Manz, vem se destacando como um bom simulador de microclimas (NAKATA, 2010; SILVA e ROMERO, 2009; SPANGENBERG et al., 2008; LAHME e BRUSE, 2003) e permite ao usuário projetar a área de estudo, modelar diferentes formas vivas ou não vivas (como árvores, edificações e etc) e fornecer dados meteorológicos reais como parâmetros de entrada para as simulações e interações solo-superfície-atmosfera. Assim, o presente trabalho, em adição às medições feitas em campo, também modelou os sistemas agroflorestais avaliados em campo no software microclimático “Envi-Met”, com o objetivo de utilizar uma ferramenta adequada de avaliação e extrapolação dos resultados.

A terceira etapa do trabalho consistiu em avaliar o potencial estoque de carbono acima do solo de cafezais “a pleno sol” e “arborizados”, como atividade de mitigação aos gases de

efeito estufa na atmosfera (GEEs). Mensurar o carbono estocado exige que a biomassa seca seja previamente calculada, utilizando métodos destrutivos e/ou não destrutivos (como equações alométricas e técnicas de sensoriamento remoto). Na cultura do café arábica, não há modelos alométricos publicados para a região do sul de Minas Gerais e a maioria dos estudos geralmente aplicam métodos destrutivos, que além de altamente onerosos, exigem alta quantidade de exemplares de café para serem representativos. Atualmente, o uso de sensoriamento remoto é uma importante e efetiva ferramenta de cálculo de biomassa, sem a necessidade de uso de um protocolo destrutivo. Assim, neste trabalho, foram utilizadas imagens de alta resolução espacial para estimar o estoque de carbono em plantas de café arábica.

Dentro desse contexto, os objetivos específicos são:

- Avaliar os dados da normal climatológica do modelo ETA/CPTEC (*baseline*) em comparação com a normal climatológica dos dados reais de estações meteorológicas situadas na área de estudo;
- Analisar a temperatura e a precipitação dos quatro cenários futuros (*control, low, mid* e *high*) do modelo ETA/CPTEC para a região de estudo;
- Analisar a aptidão climática do café arábica da área de estudo nos quatro cenários climáticos futuros do modelo ETA/CPTEC;
- Medir e quantificar o microclima em três sistemas de arborização de café em comparação com o plantio “a pleno sol”;
- Modelar os sistemas de arborização e o sistema a “pleno sol” no software “Envi-Met” e verificar as arborizações de campo como atividade de adaptação potencial nos cenários futuros;
- Avaliar o desempenho do software “Envi-Met” para simulações do microclima de cultivo da cultura do café;
- Quantificar a biomassa e o estoque de carbono no sistema de plantio “a pleno sol” e “arborizado com macadâmia”;
- Quantificar a biomassa nas plantas de café arábica por métodos destrutivos e por sensoriamento remoto;
- Gerar equações de estimativa de biomassa para a cultura do café com dados biofísicos e de sensoriamento remoto.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Agricultura e Mudanças Climáticas

A agricultura é a atividade econômica mais dependente das condições climáticas (HOLZKÄMPER et al., 2011; SENTELHAS e MONTEIRO, 2009; ADAM et al., 2008; ZULLO JUNIOR et al., 2006). Os elementos meteorológicos afetam os processos metabólicos das plantas (SENTELHAS e MONTEIRO, 2009), definem a produtividade potencial (HOLZKÄMPER et al., 2011), a qualidade dos produtos finais (KASSAM et al., 1991) e possíveis perdas por eventos extremos (OLESEN et al., 2002). Extremos de precipitação, seca e/ou temperatura podem ser fundamentais no crescimento das culturas, principalmente quando coincidem com as suas principais fases reprodutivas ou vegetativas (GORNALL et al., 2010; HOLZKÄMPER et al., 2011). ROSSETI (2001) e ZULLO JUNIOR et al. (2006) ressaltam que, em 1990, antes da política do zoneamento agrícola no Brasil, 30% de todos os casos de perdas agrícolas ocorriam pelo excesso de chuva durante o período de colheita, e 60% por período de seca durante a fase reprodutiva (florescimento e enchimento de grãos).

As culturas agrícolas crescem e produzem economicamente dentro de limites climáticos bem definidos (CUNHA e ASSAD, 2001), sendo que variabilidades não previstas, assim como mudanças no clima atual, podem representar fontes importantes de riscos à atividade agrícola (ADAMS et al., 1998). Nesse aspecto, as mudanças climáticas globais ganham destaque nas atividades agrícolas brasileiras, uma vez que o aumento da concentração de gás carbônico (CO₂), aumento das temperaturas, mudanças no regime de precipitação e na frequência e intensidade de eventos extremos afetam diretamente a agricultura (MAGRIN, 2007).

MAGRIN (2007) ainda resalta que as maiores variabilidades climáticas ligadas ao aumento dos GEEs ocorreriam nos locais de latitudes médias, o que resultaria na diminuição da estação de crescimento das culturas de maior importância econômica mundial, menor quantidade na produção de biomassa e menor produção mundial de grãos. Por outro lado, o aumento da taxa de CO₂ poderia ser benéfico para as plantas, visto que esse gás é o substrato primário da fotossíntese (TAIZ e ZEIGER, 2004). Dentro da concentração atual de CO₂, a

expectativa é que plantas com metabolismo C3 sejam mais beneficiadas que plantas C4 (FAGUNDES et al, 2010; TUBIELLO et al., 2000; SIQUEIRA et al., 2001). STRECK (2005) relata que, se a concentração de CO₂ dobrar em relação à atual, deverá ocorrer um aumento médio de 30% na produtividade de culturas C3 e de 10% na produtividade de culturas C4. PINTO et al. (2004) ainda ressaltam que a concentração do CO₂ na atmosfera, sendo próxima de 300 ppm, está abaixo da saturação para a maioria das plantas mas, níveis excessivos, próximos de 1.000 ppm, passam a causar fitotoxicidade. Além disso, se o aumento da concentração de CO₂ for acompanhado pelo aumento da temperatura do ar, o maior crescimento e produtividade das culturas poderá ser anulado, em razão do encurtamento do ciclo (SIQUEIRA et al., 2001) e do aumento da respiração (TAIZ e ZEIGER, 2004).

Para avaliar os impactos das mudanças climáticas globais na agricultura, em diferentes escalas, é importante o entendimento da magnitude dessas mudanças (MORAES et al., 2011). A ferramenta mais avançada para simular as possíveis mudanças no clima são os “modelos de circulação geral acoplado oceano-atmosfera” globais ou regionais, que sintetizam os processos físicos e dinâmicos do sistema climático global (atmosfera-oceano-terra) e as complexas interações entre os seus vários componentes (GIORGI, 2005; KANE et al., 1992).

GIORGI (2005) explica que uma simulação climática consiste em diversas etapas e a primeira delas é utilizar variáveis climáticas (como temperatura global, precipitação ou nível do mar) como uma medida do clima. Segundo o autor, primeiro, o CGCM é integrado por um longo período de tempo (chamado de multicenário) até atingir um equilíbrio entre as diversas variáveis climáticas. Nessas integrações, as forçantes do clima (como, por exemplo, a concentração de gases de efeito estufa) são fixadas em valores pré-industriais ou em valores característicos do início da era industrial moderna (1860). Essa integração é geralmente conhecida como controle (*control*) e fornece a base para avaliar o desempenho do modelo em simular o sistema climático global. O autor ainda expõe que o cenário *control* também é chamado de período histórico (1860 até o presente). No final desse período, as forçantes antropogênicas do clima podem ser modificadas, resultando nos “cenários de emissões” ou “cenários climáticos”.

GHINI et al. (2011) explicam que os cenários climáticos compreendem quatro famílias ou conjuntos narrativos (*storylines*) (IPCC, 2000). Essas famílias de cenários (A1, B1, A2 e B2) consideram diferentes projeções de emissões de gases de efeito estufa, relacionando

aspectos de desenvolvimento social, econômico e tecnológico, crescimento populacional, preocupação com o meio ambiente e diferenças regionais, denominados de principais forças condutoras. Os mesmos autores explicam que adotar um cenário de baixas emissões (B1) supõe um futuro tendendo à estabilização das emissões de efeito estufa e que a concentração atmosférica de CO₂ será, no final deste século, em torno de 550 ppm. No cenário de altas emissões (A2), com manutenção dos padrões de emissões observados nas últimas décadas, chegaria a 1000 ppm de CO₂ atmosférico, cerca de três vezes maior que as concentrações atuais (IPCC, 2000).

GIORGI (2005) ressalta que modelos de simulação climática apresentam incertezas dado que não é possível prever com precisão o estado da atmosfera ou de qualquer outro sistema do componente climático. RIAL et al. (2004) ainda acrescentam a essas incertezas a impossibilidade de prever e/ou duplicar sistemas não-lineares, como o sistema climático. Adicionalmente, GIORGI e MEARNNS (2002) explicam que não é possível prever forçantes naturais (como mudanças na radiação solar ou erupções de vulcões), ou mesmo algumas forçantes antrópicas (como descobertas tecnológicas, mudanças significativas da sociedade ou diminuição da população devido a um surto de doenças, por exemplo), que poderiam atuar diretamente nas mudanças climáticas. O que é possível, segundo os autores, é responder a perguntas que abordam como as estatísticas médias climáticas (de precipitação média, temperatura, variabilidade de precipitação ou frequência de eventos extremos) poderiam mudar nas próximas décadas em resposta a alterações da concentração dos GEEs.

Estudos simulando o impacto das mudanças climáticas em culturas agrícolas no Brasil vêm sendo apresentados na literatura há alguns anos. SIQUEIRA et al. (2001) demonstrou os impactos nas culturas do milho e trigo, MARENGO (2001) para a cultura soja, PINTO et al. (2002) e ASSAD et al. (2004) para a cultura do café, NOBRE et al. (2005) para milho, feijão, arroz, soja e café, ZULLO JUNIOR et al. (2006) para café e milho, STRECK e ALBERTO (2006) para trigo, soja e milho, FAGUNDES et al. (2010) para batata e SILVA et al. (2012) para algodão. Em todos esses estudos, as culturas agrícolas terão perdas consideráveis de área e produção nos diferentes cenários de mudanças climáticas. Muitos deles ainda afirmam que as perdas deverão começar já na primeira metade deste século.

Em 2008, a Embrapa Informática Agropecuária e o Cepagri/Unicamp publicaram um documento (PINTO et al., 2008) no qual nove culturas (cana-de-açúcar, mandioca, café,

milho, arroz, feijão, girassol, soja e algodão) foram analisadas na perspectiva do aquecimento global. Os pesquisadores constataram que, caso nenhuma medida adaptadora seja realizada, sete delas (com exceção feita apenas à cana-de-açúcar e mandioca) teriam redução na área de baixo risco climático e, conseqüentemente, no valor da produção. Esse estudo ressalta que as perdas econômicas para o país poderão chegar a R\$7,4 bilhões em 2020, número que poderá subir para R\$ 14 bilhões em 2070 e alterar profundamente a geografia da produção agrícola no território nacional.

Neste trabalho, um dos casos que mais se destacou foi o do café arábica, confirmando as conclusões feitas anteriormente por PINTO et al. (2002), ASSAD et al. (2004) e ZULLO JUNIOR et al. (2006). PINTO et al. (2008) ressaltam que a cultura poderá ter alto risco climático em áreas tradicionais e altamente produtoras de café (Minas Gerais, São Paulo e Espírito Santo), favorecendo o deslocamento da produção para a região sul do país (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) em busca de um equilíbrio climático. Um segundo efeito das altas temperaturas no café poderá ser o deslocamento da produção para regiões de maiores altitudes, o que poderá dificultar o manejo, reduzir a produtividade e elevar o preço do grão. Em um primeiro momento (2020), a queda da área de baixo risco climático do café arábica não seria muito brusca no cenário otimista, 6,75%, mas, em 2050, o total de áreas com baixo risco poderá diminuir 18,3%, chegando a 27,6% em 2070. Em bases financeiras, o aquecimento global, segundo este trabalho, poderá trazer prejuízos da ordem de R\$628,5 milhões em 2020, R\$1,7 bilhão em 2050 e R\$2,55 bilhões em 2070. No cenário pessimista, a redução da área de baixo risco climático para a cafeicultura começaria com 9,48% em 2020, subindo para 17,1% em 2050 e chegando a 33% em 2070. Isso poderá representar um prejuízo de, respectivamente, R\$882 milhões, R\$1,6 bilhão e R\$ 3bilhões.

2.2 Clima e Ecofisiologia do Café arábica

Originário da Etiópia, onde se desenvolveu em condições de sub-bosque, o café arábica (*Coffea arabica* L.) requer temperaturas médias anuais amenas, entre 18°C e 23°C (PEZZOPANE, 2004; CAMARGO, 2010). Acima de 23°C, o desenvolvimento e a maturação dos frutos são acelerados, acarretando na perda da qualidade (DAMATTA et al., 2007).

Temperaturas médias acima de 30°C podem provocar danos à folhagem e, se essas temperaturas elevadas ocorrerem na fase do florescimento, poderão culminar no abortamento dos botões florais, não produzindo frutos (CAMARGO, 1985). Além disso, o mesmo autor ressalta que, se temperaturas altas no florescimento forem associadas a extensos períodos secos, a probabilidade de abortamento das flores aumenta. Exposições contínuas acima de 30°C resultam não apenas no menor crescimento, mas também em anormalidades como amarelecimento das folhas e tumores na base do caule (DAMATTA, 2004).

Em geral, o cafeeiro é pouco tolerante ao frio. Temperaturas próximas a 0,7°C no abrigo meteorológico (FAGNANI, 1985) e a -2,0 °C próximo às folhas (CAMARGO e SALATI, 1966) podem indicar início do processo de danos aos tecidos das plantas. Temperaturas foliares entre -3,0°C e -4,0°C provocam danos graves e morte dos tecidos (CARAMORI e MANETTI FILHO, 1993; SENTELHAS et al., 1995). CAMARGO (1985) e FAGNANI (1985) ressaltam que em regiões com temperaturas médias anuais inferiores a 18°C, a ocorrência de geadas, mesmo que esporádicas, e ventos frios, podem limitar a exploração econômica da cultura.

Quanto à necessidade hídrica, o cafezal requer solos úmidos durante seu período de vegetação e frutificação (de setembro/outubro a maio/junho, na maioria das regiões produtoras brasileiras), e de solos mais secos nos períodos de maturação e colheita dos frutos (que vão de junho a setembro) (PINTO et al., 2008). As necessidades hídricas do cafezal dependem das propriedades de retenção do solo, umidade atmosférica, cobertura de nuvens, práticas de cultivo (DAMATTA et al., 2007), distribuição anual de chuvas e ritmo anual da evapotranspiração, que pode compensar a ocorrência de precipitações relativamente baixas (PEZZOPANE, 2004). DAMATTA et al. (2007) indicam que o cafeeiro cresce sob ampla faixa de precipitação, embora ALÉGRE (1959) descreva que a faixa ótima de precipitação esteja entre 1200 mm e 1800 mm. CAMARGO (1985b), analisando dados comparativos do balanço hídrico climatológico em várias regiões produtoras do Brasil, sugere que a produção econômica do cafeeiro suporta deficiências hídricas de até 150 mm anuais, principalmente quando a estação seca coincide com a maturação e a colheita. Contudo, segundo o autor, deficiência hídrica anual inferior a 100 mm, que coincide com o período de frutificação, pode causar quebras significativas na produtividade.

Segundo CAMARGO e CAMARGO (2001), o cafeeiro leva dois anos para completar o ciclo fenológico de frutificação, ao contrário da maioria das plantas que completam o ciclo reprodutivo no mesmo ano fenológico. Os autores ressaltam que no primeiro ano formam-se os ramos vegetativos com gemas axilares nos nós, durante os meses de dias longos. Em janeiro, quando os dias começam a encurtar, as gemas vegetativas axilares são induzidas por fotoperiodismo e gemas reprodutivas (GOUVEIA, 1984).

Em abril, após o equinócio de março, com dias curtos tendo menos de 13 horas de luz efetiva (PIRINGER e BORTHWICK, 1955), intensifica-se a indução das gemas foliares existentes para gemas florais que começam a se desenvolver (CAMARGO e CAMARGO, 2001). Os mesmos autores relatam que as gemas florais vão amadurecendo e, quando maduras, entram em dormência e ficam prontas para a antese, quando ocorre um aumento substancial do potencial hídrico nas gemas dormentes. O choque hídrico, causado por chuva ou irrigação, é o principal fator para desencadear a florada. CAMARGO e FRANCO (1985) ressaltam que outros motivos, como um acentuado aumento da umidade relativa do ar, mesmo que os cafeeiros não recebam chuva diretamente, poderá provocar a florada.

O segundo ano fenológico inicia-se com a florada e a formação de “chumbinhos”, que precede a expansão dos grãos até atingir o tamanho normal. Em seguida, ocorre a granação dos frutos e a fase de maturação (CAMARGO e CAMARGO, 2001). Os autores relatam que depois dessa fase há a senescência, a morte dos ramos plagiotrópicos terminais e a auto-poda. Na primavera do ano civil seguinte, brotam novos ramos vegetativos, que se transformam em reprodutivos, permitindo nova produção.

A esquematização das diferentes fases fenológicas do cafeeiro pode ser vista na Figura 1, que divide a fenologia em seis fases distintas. O esquema de CAMARGO e CAMARGO (2001) apresenta as características principais de cada uma das fases.



Figura 1 – Esquematização das seis fases fenológicas do cafeeiro arábica, durante 24 meses, nas condições climáticas tropicais do Brasil (Fonte: Camargo e Camargo, 2001).

2.3 Arborização em Cafezais

Por serem originárias de sub-bosque, as primeiras plantações de café aconteceram sob sombras de árvores altas, com o intuito de simular seu habitat natural (CHAVES et al., 2007; DAMATTA et al., 2007; LIN, 2007). Em muitas situações, no entanto, o café pode se desenvolver e produzir adequadamente sem sombreamento (BEER et al., 1998). Isso ocorre, segundo DAMATTA (2004), quando as condições edafo-climáticas são extremamente favoráveis para o desenvolvimento da cultura, e a sombra, portanto, passa a não oferecer tantos benefícios. Assim, desde 1950, o sombreamento foi abandonado como uma prática cultural da cafeicultura em muitas regiões, principalmente no sudeste do Brasil (DAMATTA, 2004; CHAVES et al., 2007).

No entanto, plantações sombreadas apresentam características importantes, incluindo a conservação de recursos naturais, aumento da biodiversidade, estabilidade da produção de café, além dos benefícios financeiros, uma vez que as árvores de sombra podem aumentar a rentabilidade do produtor pelos produtos adicionais que elas podem oferecer (CHAVES et al., 2007). Para BEER et al. (1998), esses benefícios econômicos e ecológicos do café sombreado voltaram a estimular o interesse de agricultores por essa técnica.

O café é uma cultura adaptada a grandes variações de sombra (LIN, 2007). Sombrear ou arborizar uma plantação implica em modificações microclimáticas significativas, além de alterações no balanço de energia (PEZZOPANE, 2004), fazendo com que as plantas

arborizadas ou sombreadas apresentem características diferentes daquelas plantadas a pleno sol. MONTEITH et al. (1991) e PERFECTO (1996) relatam que as interações entre as plantas componentes de um sistema arborizado e a atmosfera podem ser resumidas da seguinte forma:

- Intercepção de energia radiante pela folhagem, sendo este fator dominante na produção de biomassa;
- Intercepção da chuva pela folhagem da planta sombreadora, interferindo na disponibilidade hídrica;
- Alteração no regime de vento que, além dos seus efeitos de danos mecânicos, afeta a taxa de transpiração e o fluxo de gás-carbônico;
- Modificação na temperatura, que determina a taxa de crescimento vegetal e;
- Alterações no regime de déficit de pressão de vapor d'água e modificações na transpiração.

As variáveis microclimáticas afetadas pela arborização são, geralmente, a radiação solar, a umidade relativa, o vento e a temperatura (MONTEITH et al. 1991; PEZZOPANE, 2004). Segundo estes autores, a radiação solar no interior da comunidade vegetal é o primeiro elemento meteorológico a ser modificado na prática da arborização. MORAIS e CARAMORI (2001) afirmam que, dependendo da densidade da copa e da disposição das árvores sombreadoras, quantidades e tamanhos diferentes de manchas de radiação direta atingem a cultura sombreada, repercutindo, também, na quantidade de radiação difusa. SILVA et al. (1999), em estudos de intercepção da radiação fotossinteticamente ativa em pastagens arborizadas, verificaram que a produção de matéria seca é favorecida na projeção da copa de árvores, embora tenha menor disponibilidade deste elemento, principalmente, em período seco. MORAIS e CARAMORI (2001), estudando um cafezal arborizado com feijão-guandu (*Cajanus cajan*) no Paraná, obtiveram intercepção de 87% da radiação solar global média, no período de maio a junho. Embora esse valor tenha sido considerado alto, a atenuação que ocorreu no período de inverno trouxe benefícios relacionados à proteção contra geadas.

A radiação solar também afeta um segundo elemento meteorológico que é a temperatura. PEZZOPANE (2004) e BRENNER (1996) ressaltam que, de modo geral, existindo menor disponibilidade de energia sob o dossel da cultura, a temperatura do ar, durante o período diurno, tende a ser menor do que em cultivo aberto. PEZZOPANE et al. (2003) encontrou redução de até 1,5°C de temperatura máxima em cafezal arborizado com

coqueiro-anão. Quando o cultivo de café ocorre em condições de sombreamento elevado, como apresentado por BARRADAS e FANJUL (1986) no México e por MIGUEL et al. (1995) no Brasil, as diferenças dos valores de temperatura máxima entre os sistemas podem atingir até 5,0°C, com valores inferiores no cultivo sombreado. PEZZOPANE (2004), no entanto, alerta que a temperatura pode ser afetada por outros elementos meteorológicos que não só a radiação, como o vento, o fluxo de calor e a umidade relativa, entre outros, fazendo com que, nem sempre, o cultivo a pleno sol tenha temperaturas superiores quando comparados com os sistemas arborizados.

A introdução de árvores ou arbustos em um cultivo agrícola modifica, também, o regime de vento sobre as plantas, alterando a velocidade no plano horizontal e a turbulência (BRENNER, 1996). Segundo CAMARGO e PEREIRA (1994), a redução da velocidade do vento é um dos efeitos mais benéficos para o cafezal. Os mesmos autores explicam que os efeitos do vento em cafeeiros podem ser diretos (simplesmente mecânicos), quando acarretam danos às folhas e gemas, potencializando queda de flores e frutos, ou indiretos, como os ecofisiológicos, provocando aumento da demanda hídrica. Ventos frios, quando são fortes e persistentes, podem intensificar o fenômeno conhecido como geada de adveção (MORAIS e CARAMORI, 2001). GUTIÉRREZ et al. (1994) sugere que ventos moderados, ao redor de 2,5m/s, provocariam aumento no déficit de saturação, reduzindo a transpiração como consequência do fechamento estomático.

No caso da umidade relativa do ar, PEZZOPANE (2004) relata que existe uma tendência de aumento da umidade nos cultivos arborizados ou protegidos. Sobre esse elemento meteorológico, DAMATTA e RENA (2002) ressaltam que os estômatos do cafeeiro são altamente sensíveis à redução da umidade relativa. Nesse sentido, segundo esses autores, o aumento da umidade relativa parece favorecer a maximização da eficiência do uso da água, via manutenção da abertura estomática, permitindo, assim, um influxo adequado de CO₂ à fotossíntese, sem, contudo, haver perda substancial de água, via transpiração.

Embora diversos autores concordem que a arborização é uma prática benéfica para a cultura, a redução da produtividade devida ao sombreamento é apontada como a razão principal para a não adoção dessa prática no Brasil (DAMATTA e RENA, 2002). Os mesmos autores descrevem pelo menos três razões que podem reduzir a produção do cafeeiro à medida que se aumenta o grau de arborização: menor assimilação de carbono pela planta inteira, maior

estímulo à emissão de gemas vegetativas em detrimento das gemas florais e redução do número de nós produzidos por ramo.

O efeito da arborização nos cafezais ainda é um assunto polêmico e contraditório, pois, em determinadas situações, pode-se encontrar cafeeiros arborizados produzindo satisfatoriamente e, até mesmo, mais que os cultivados a pleno sol (LEAL et al., 2005). Duas situações são, geralmente, apontadas como favoráveis à arborização do cafezal: em locais muito quentes e em locais com ocorrência de geadas (CARAMORI et al., 1996). PINTO et al. (2008) ressalta que em um possível clima mais quente, como o descrito pelo IPCC, a arborização pode se apresentar como uma técnica importante de adaptação da cultura.

LIN (2007) ressalta que em face do aumento da variabilidade climática descrita nos relatórios do IPCC (2007), a presença de árvores em cafezais gera, além de benefícios ecológicos, uma estabilidade na variabilidade do microclima dos plantios. Trabalhos recentes têm demonstrado a importância da agrofloresta em sistemas produtores de café como uma forma de adaptação às mudanças climáticas (ESTRADA et al., 2006; LIN, 2007; LIN, 2008; LIN, 2010). Além disso, LIN (2007) também expõe a importância sócio-econômica desses sistemas, evitando a possível modificação das áreas de plantio do café, trazendo alternativa econômica ao produtor, além de ser uma forma eficiente e economicamente acessível a produtores de pequeno porte.

2.4 Modelagem de Café e o software Envi-Met

OIJEN et al. (2010) destaca que, embora pesquisas de campo tenham demonstrado fatores ambientais que afetam o crescimento e o desenvolvimento de sistemas de agroflorestas com café, o conhecimento quantitativo deste e de outros sistemas agroflorestais ainda é limitado. Os mesmos autores e RAMIREZ (1993) ressaltam ainda que as medições feitas em campo são limitadas pelo pequeno número de repetições, proximidade com centros de pesquisa, poucas avaliações e muitas extrapolações. Uma das formas de aumentar o conhecimento desses sistemas e permitir extrapolações confiáveis é construir um processo baseado em modelos e simulações (OIJEN et al., 2010b).

Estudos de modelagem em culturas agrícolas começaram em 1960, seguidos por estudos de modelos em florestas, em 1970 e, na década seguinte, estudos com agroflorestas (BOUMAN et al., 1996; MUETZELFELDT e SINCLAIR, 1993). As primeiras simulações eram baseadas em modelos muito complexos (OIJEN et al., 2010), mas, recentemente, o foco mudou para processos mais simples que necessitam de parâmetros de entrada de fácil conhecimento e que forneçam resultados robustos (BOUMAN et al. 1996). No entanto, MATTHEWS et al. (2004), MUETZELFELDT e SINCLAIR (1993) e YOUNG (1997) salientam que, mesmo nessa fase onde se busca a simplicidade dos modelos, as simulações tendem a ser sofisticadas e exigir muitos parâmetros para gerar resultados consistentes. OIJEN et al. (2010), modelando sistemas agroflorestais com café, observaram que há uma série de lacunas na literatura que, na maioria das vezes, limita o avanço das pesquisas em modelagem. OIJEN et al. (2010b) encontraram resultados positivos na parametrização preliminar de um modelo para o cafeeiro, e os resultados de produtividade e balanço hídrico foram semelhantes com os da literatura. Os mesmos autores ainda ressaltam que o modelo desenvolvido por eles apresenta algumas limitações, como não fornecer resultados para alguns indicadores importantes como a qualidade do grão, a qualidade da madeira da árvore e auxílio no manejo ecológico da área.

A maioria dos estudos em modelagem leva em conta a produtividade, a interação entre as plantas, o carbono, o solo e a fertilidade, mas poucos estudos focam apenas nas variáveis climáticas como resposta do modelo. Nesse sentido, o software Envi-Met ganha destaque por conseguir simular a interação entre objetos (vivos ou não, tais como plantas ou edificações) e o microclima local.

O Envi-Met (<http://www.envi-met.com/>) é um modelo microclimático, tridimensional e não hidro-estático concebido para simular as interações planta-superfície-ar em ambientes urbanos, com resolução de 0,5 a 10 metros no espaço, e 10 segundos no tempo. O modelo computacional é composto por um modelo de solo com uma dimensão, um modelo de transferência radiativa e um modelo de vegetação (BRUSE e FLEER, 1998).

O software foi desenvolvido pela Universidade de Mainz, Alemanha, e é executado em computador padrão, com sistema operacional Windows XP ou Vista. O número máximo de células da grade é bastante limitado e não é possível simular o micro-clima de cidades inteiras, ou de grandes áreas, mas apenas quadras e bairros simples. O Envi-Met usa uma

malha uniforme com um máximo de 300 x 300 x 35 células (HUTNER et al., 2008). A versão do Envi-Met utilizada neste estudo foi a 3.1, que permite fornecer explicitamente as variáveis meteorológicas de entrada, viabilizando um controle exato de todos eles.

LAHME e BRUSE (2003) realizaram medições locais do clima e da qualidade do ar, além de simulações das condições climáticas, com o objetivo de investigar os efeitos destas variáveis (microclima e qualidade do ar) de um pequeno parque urbano cercado por uma área densamente ocupada. Eles concluíram que o Envi-Met reproduz os dados observados e coletados in loco com boa precisão.

SPANGENBERG et al. (2008), SILVA (2009), BISSON (2010) e NAKATA (2010), simulando a influência da vegetação no microclima de cidades, com o Envi-Met, também demonstraram que o software reproduz com fidelidade dados de microclima, e das interações das plantas com o ambiente, mostrando-se extremamente eficiente para esse tipo de estudo.

O estudo de SILVA e ROMERO (2009) com auxílio do Envi-Met concluiu que a ferramenta se mostrou adequada para simulação de áreas urbanas, sendo que as limitações encontradas foram consideradas irrelevantes diante do caráter pioneiro do estudo.

Diversos autores apontam para as possibilidades apresentadas pelo Envi-Met, porém, NAKATA (2010) ressalta que, pelos próprios resultados alcançados, sua aplicação não deve ser indiscriminada. Como cada local tem características térmicas específicas, a autora acredita que uma validação do modelo para cada região de estudo deve sempre preceder à simulação. Além disso, o fato do modelo ter sido desenvolvido para microclima de cidades pode não atender com exatidão as necessidades das pesquisas agrícolas. Nesse sentido, tornam-se necessários estudos específicos com objetivo de avaliar as simulações com finalidades agrícolas e agro-florestais.

2.5 Estoque de carbono como mitigação para emissão dos gases de efeito estufa (GEEs)

O uso e ocupação do solo, a mudança no uso do solo e florestas (sigla no relatório do IPCC de LULUCF – *Land Use, Land-Use Change and Forestry*) são assuntos fundamentais nas mudanças climáticas globais, pois, ao mesmo tempo em que são responsáveis por uma quantidade significativa de emissões de gases de efeito estufa (GEEs), também representam

uma fonte importante de mitigação desses gases (CERRI et al, 2004). O setor agrícola (uso da terra, por exemplo) é responsável por cerca de 14% do total de emissões globais de GEEs antropogênicos (CERRI et al., 2009) e o desmatamento é responsável por um adicional de 17% nas emissões, totalizando quase um terço das emissões globais atuais (IPCC, 2007).

CERRI et al. (2009) ainda destacam que uma das maiores contribuições para as emissões de GEEs do Brasil é proveniente da queima de florestas (ligado ao desmatamento da Amazônia) e, com isso, o país vem sofrendo pressões da comunidade internacional para reduzir as emissões e o desmatamento, assim como atuar no sequestro e estoque de carbono. Nesse sentido, escolher um conjunto de práticas para reduzir a quantidade de gases de efeito estufa é um dos grandes desafios que o país enfrenta (CERRI et al., 2007). A agricultura, nesse sentido, ganha destaque, pois tem dois dos maiores reservatórios de carbono atmosférico, solo e planta, se tornando assim uma importante alternativa de mitigação dos GEEs (PANDEY, 2002; MACHADO, 2005).

Diversos estudos vêm demonstrando a eficiência da agricultura em estocar e sequestrar carbono atmosférico. CAMPOS (2003), pesquisando a potencialidade do sistema de colheita de cana-de-açúcar sem queima para sequestro de CO₂, verificou mitigação das emissões dos GEE de cerca de 5Mg C-CO₂/ha/ano. MAESTRI et al. (2004) verificaram que plantações de eucalipto submetidas a um regime pluviométrico de 2.300 mm anuais conseguiram sequestrar cerca de 104,3 Mg C/ha, sendo que a mesma espécie, em localidades com 800 mm de precipitação/ano, sequestraram cerca de 66 Mg C/ha. COTTA et al. (2008) encontraram que o consórcio cacao-seringueira estoca 91,5 Mg C/ha. Rosa et al. (2003) e COLOZI-FILHO et al. (1999) destacam que sistemas de plantio direto (PD) também são capazes de reter CO₂ no solo devido, principalmente, à matéria orgânica.

Dentre as práticas agrícolas recomendadas para redução dos GEEs, destaca-se a agrofloresta (PANDY, 2007). MONTAGNINI e NAIR (2004) destacam que os sistemas agroflorestais têm uma enorme importância como estratégia de redução de carbono por causa do potencial de armazenamento de carbono em suas múltiplas espécies de plantas, podendo se tornar sumidouros efetivos de carbono, sendo que o protocolo de Kyoto nomeia a prática de “sumidouros de carbono” como *carbon sink*. MONTAGNINI e NAIR (2004) relatam, ainda, que as estimativas disponíveis de potenciais sequestro e estoque de carbono em sistemas agroflorestais são descritas principalmente para regiões tropicais. DIXON (1995) identificou

dois atributos principais benéficos dos sistemas agroflorestais no que se refere ao estoque de carbono: armazenamento direto e de curto prazo em árvores e solos e alto potencial para compensações imediatas de emissões de GEEs.

Estudos demonstraram esse potencial na Índia (SINGH et al., 2000), México (DE JONG et al., 1997), Canadá (STINSON e FREEDMAN, 2001), Brasil (BOLFE, 2010) e América Central (SHEPHERD e MONTAGNINI, 2001), entre outros. MONTAGNINI e NAIR (2004) descrevem que, para pequenos produtores agroflorestais nos trópicos, as taxas de sequestro de carbono potencial variam de 1,5 a 3,5 Mg C/ha. Além disso, os mesmos autores ressaltam que a agrofloresta tem um papel indireto no reservatório de carbono natural, uma vez que diminuem a pressão sobre as florestas naturais.

PALM et al. (2002) concluíram que o maior potencial para sequestro de carbono nos trópicos úmidos é acima do solo, através do estabelecimento de árvores em locais desmatados, em terras agrícolas não produtivas e em pastos degradados. Nesses locais, os estoques médios de carbono na vegetação aumentariam em até 50 Mg C/ha em 20 anos, enquanto que os estoques no solo aumentariam entre 5 a 15 Mg C/ha.

Com base nas taxas de crescimento de árvores e assumindo que 50% da biomassa seca das plantas seja carbono, SCHOEDER (1994) estimou que o armazenamento médio de carbono em práticas agroflorestais é de 9, 21, 50 e 63 Mg C/ha em regiões do semi-árido, sub-úmidas, úmido e temperado, respectivamente. Valores maiores em regiões temperadas refletem ciclos mais longos de corte nessas regiões (MONTAGNINI e NAIR, 2004). Concordando com as estimativas de SCHOEDER (1994), no Brasil, BOLFE (2010) encontrou que Sistemas Agroflorestais (SAFs) na região de Tomé-Açu, Pará, estocavam 47,93 Mg C/ha.

Desse modo, é importante o fato que, embora a agrofloresta não estoque carbono como uma floresta primária (MONTAGNINI e NAIR, 2004), ainda assim é uma importante e indispensável alternativa de estoque de carbono, mitigando o excesso de GEEs (WATSON et al. 2000). Nesse sentido, os sistemas agroflorestais com café, mais uma vez, ganham destaque nos cenários de mudanças climáticas globais, pois além de potencialmente permitirem a adaptação da cultura frente o aquecimento global, ainda são capazes de armazenar, em sua biomassa, o carbono atmosférico, como todos os demais SAFs.

2.6 – Medição de Carbono e Sensoriamento Remoto

O estoque de carbono nas plantas é medido através da biomassa da espécie. Segundo SILVEIRA et al. (2008), biomassa é a massa de matéria viva de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal. O mesmo autor ainda ressalta que biomassa florestal (ou biomassa agrícola) significa toda a biomassa existente na floresta (ou na plantação), ou apenas a sua fração arbórea, chamada de biomassa acima do solo (BAS).

Grande parte da biomassa, acima e abaixo do solo, é formada de estruturas carbônicas (SANQUETA et al., 2002). Segundo o IPCC, aproximadamente 50% da biomassa é composta de carbono e esse valor tem sido empregado como um fator de conversão para estimativa de estoque de carbono na vegetação.

Em linhas gerais, a biomassa pode ser quantificada por: a) amostragem direta – destrutiva com derrubada da vegetação; ou b) amostragem indireta – utilização de equações alométricas propostas com base nos dados da composição florística, no mapeamento da vegetação e na extrapolação de dados (CERQUEIRA e ROCHA, 2007). Os modelos alométricos podem ser específicos para um determinado local, quando elaborado para um ecossistema particular, ou gerais, que podem ser utilizados para estimar a biomassa em locais diferentes (VIEIRA et al., 2008).

Trabalhos têm sido realizados utilizando-se estimativas de volume e biomassa em diferentes partes das árvores e nos compartimentos das florestas, as quais são convertidas em quantidade de carbono pelo fator de conversão, utilizando o protocolo indireto de amostragem (BROWN et al., 1999; DIXON et al., 1994; SILVEIRA et al., 2008). SILVEIRA et al. (2008) ainda explica que o cálculo indireto da biomassa em árvores pode ser dado em função de medidas biofísicas das próprias árvores, como o diâmetro a altura do peito (DAP), altura (h), arquitetura foliar, densidade e volume da madeira.

Para diversas culturas agrícolas, a quantificação da biomassa segue o protocolo da amostragem direta, que exige áreas amostrais representativas, sendo altamente onerosa, além de apresentar certo grau de incerteza (HOUGHTON et al., 2001, MYNENI et al., 2001, DEFRIES et al., 2002, HOUSE et al., 2003, HESE et al., 2005, HOUGHTON, 2005; LU, 2006). Na cafeicultura, em específico, a retirada de plantas produtivas no campo nem sempre é

fácil e, normalmente, não é bem aceita pelos produtores, sendo dada, assim, prioridade aos métodos não-destrutivos, como técnicas de sensoriamento remoto.

O sensoriamento remoto, portanto, torna-se uma ferramenta importante para quantificação de carbono nas plantas, evitando, assim, o uso do protocolo destrutivo e permitindo a estimativa de biomassa de áreas extensas (LU, 2005). Nos últimos anos, técnicas de sensoriamento remoto tornaram-se predominantes na estimativa da biomassa acima do solo (NELSON et al., 1988, FRANKLIN e HIERNAUX, 1991, LEBLON et al., 1993, STEININGER, 2000, ZHENG et al., 2004, LU, 2005), sendo que a maior parte dos estudos ocorre em áreas florestais (WU e STRAHLER, 1994, TROTTER et al., 1997, ZHENG et al., 2004). As principais vantagens do uso do sensoriamento remoto, segundo ROSENQVIST et al. (2003), são a repetitividade de coleta de dados, pois o formato digital das imagens permite grande número de repetições, processamento rápido de grande quantidade de dados, extrapolação de dados e altas correlações entre bandas espectrais e parâmetros da vegetação.

Muitas são as técnicas de sensoriamento remoto que podem ser aplicadas para a estimativa de biomassa, como o sensoriamento remoto ótico, o hiperespectral, radar e lidar, entre outros (PATENAUD et al., 2005). O sensoriamento remoto ótico capta a energia solar refletida dos alvos da superfície da terra nos comprimentos de onda do visível e dos infravermelhos próximo e médio do espectro eletromagnético (~0,4 a 2,5 μ m) (JENSEN, 2009). Cada alvo, portanto, tem uma assinatura espectral relacionada a ele. A vegetação verde apresenta uma assinatura singular caracterizada por uma refletância elevada no infravermelho e, por um absortância elevada no vermelho e em algumas regiões do infravermelho médio. PATENAUD et al. (2005) ressaltam que é possível verificar variações internas na estrutura da célula das folhas, nos níveis de clorofila e variação no conteúdo de água nas folhas através de sensoriamento remoto. JENSEN (2009) relata que estudos têm demonstrado que existe uma relação direta entre a resposta no infravermelho próximo e variáveis relacionadas com a biomassa. Por outro lado, o autor ressalva que também tem sido demonstrada a relação inversa entre a resposta no visível, particularmente no vermelho, e variáveis relacionadas à biomassa das plantas.

JENSEN (2009) ainda explica que desde a década de 60 vem se extraindo e modelando parâmetros biofísicos da vegetação com o uso de dados de sensoriamento remoto. Grande parte desse esforço tem envolvido índices de vegetação – que são medidas

radiométricas adimensionais, as quais indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação, incluindo índice de área foliar (IAF), porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde e radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RUNNIN et al., 1994; HEUTE e JUSTICE, 1999). O índice mais utilizado é o NDVI (*Normalized Differencial Vegetation Index*) (ROUSE et al., 1974). Alguns estudos têm encontrado correlações significativas entre NDVI e biomassa (RAHMAN et al., 2000; BAPTISTA, 2003; CERQUEIRA e ROCHA, 2007; RAMIREZ e ZULLO JUNIOR, 2010; BOLFE, 2010), demonstrando a importância dos índices de vegetação em estudos de estimativa de biomassa.

Por outro lado, autores revelam que a precisão na estimativa de carbono em áreas extensas, como florestas, pode se apresentar inconsistente e varia de acordo com os estudos de caso (TROTTER et al., 1997; HOLMGREN e THURESSON, 1998; WULDER, 1998; FOODY et al., 2003; PATENAUD et al., 2005). TROTTER et al. (1997), investigando o potencial do sensor Landsat TM para estimar o volume de madeira em florestas coníferas, na Nova Zelândia, encontrou que os modelos utilizados com o satélite explicavam apenas 30% da variância no volume da madeira, em escala de pixel. Também tentando estimar parâmetros da cultura de coníferas na Carolina do Norte (EUA), utilizando Landsat e SPOT, BROCKHAUS e KHORRAM (1992) demonstraram que a correlação entre as bandas dos satélites e variáveis da floresta eram baixas demais para desenvolver um modelo de estimativa de biomassa. FAKAZAS et al. (1999) também encontraram correlações baixas entre dados de inventário florestal na Suíça com dados do Landsat TM. Estudos de FOODY et al. (2001), SADER et al. (1989), STEININGER (2000) e TOKOLA et al. (2001) também estimaram biomassa com variações no grau de sucesso.

Essas irregularidades refletem a dificuldade de calcular ou estimar biomassa utilizando apenas dados dos sensores óticos (LU, 2005; PATENAUD et al., 2005; FOODY et al., 2003). Nesse sentido, LU (2005), ZHENG et al. (2004) e FOODY et al. (2003) concordam no fato que combinar dados coletados em campo com dados de sensores remotos espectrais pode ser uma alternativa importante na estimativa da biomassa. ZHENG et al. (2004), FOODY et al. (2003), BAPTISTA (2003), CERQUEIRA e ROCHA (2007), RAMIREZ e ZULLO JUNIOR (2010) e BOLFE (2010) encontraram boa correlação entre biomassa, parâmetros biofísicos coletados em campo e dados de sensoriamento remoto.

2.7 – A cultura do Café e o Sensoriamento Remoto de Alta Resolução

HERWITZ et al. (2004) ressalta que devido às características dos tratos culturais, a importância da cultura e as peculiaridades de produção, a cafeicultura é um dos maiores beneficiários potenciais do sensoriamento remoto. Adicionalmente, RAMIREZ e ZULLO JUNIOR (2010) ressaltam que, no Brasil, uma das melhores formas de monitorar a produção cafeeira é o sensoriamento remoto, uma vez que as informações oficiais referentes à cultura, que são realizadas pela CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento) e IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), utilizam predominantemente informações municipais obtidas através de questionários padrões a produtores, cooperativas e representantes de órgãos públicos e privados.

O monitoramento de culturas perenes, como o cafeeiro, apresenta algumas restrições. EPIPHANIO et al. (1994) ressalta que, nessas culturas, as plantas crescem mais lentamente do que as culturas anuais, fazendo com que fatores como o solo, a sistemática de uso de implementos agrícolas, os tratos culturais, o sombreamento intra e entre fileiras e as características sazonais da planta, se tornem importantes no estudo do comportamento espectral da cultura. No entanto, apesar das dificuldades, trabalhos como os de MOREIRA et al. (2003), HERWITZ et al. (2004), RAMIREZ et al. (2006) e RAMIREZ e ZULLO JUNIOR (2010) ilustram o potencial da aplicação do sensoriamento remoto no monitoramento e desenvolvimento da setor cafeeiro.

A maioria dos trabalhos publicados utilizaram imagens de média resolução espacial e são destinados à classificação da cultura e estimativa de área plantada (BATISTA et al., 1990; TARDIN et al. 1992; MOREIRA et al., 2004; ADAMI et al., 2004; CORDERO-SANCHO e SADER, 2007). RAMIREZ (2010) explica que são escassos os estudos que utilizam imagens de alta resolução espacial com o objetivo de estimar parâmetros biofísicos da cultura, embora esses satélites apresentem potencial para esse tipo de estudo.

Dados de alta e média resolução espacial são utilizados em um amplo espectro de aplicações em nível regional (VINCIKOVÁ et al., 2010). Suas mais diversas aplicações são: mapeamento regional (monitoramento e mudanças na paisagem), planejamento regional e local, condições da vegetação (ZERGER et al., 2009; LELONG et al., 1998; YANG et al.,

2003) desenvolvimento e ocupação de solo, classificação e mapeamento de culturas agrícolas (VANCUTSEM et al., 2009, ROGAN et al., 2008), florestais (SCHLERF e ATZBERGER, 2006), monitoramento de florestas e de ecossistemas, monitoramento geológico (NIKOLAKOPOULOS e TSOMBOS, 2008), mapeamento geomorfológico e de impactos naturais (VINCIOVÁ et al., 2010).

VINCIOVÁ et al. (2010) ressaltam que o sistema mais antigo de média resolução espacial é o Landsat, que atua desde 1972. Em seguida, outros sistemas com parâmetros similares aos do Landsat se destacaram: ASTER (15 metros de resolução) (NIKOLAKOPOULOS e TSOMBOS, 2008), ALI (*Advanced Land Manage*) (30 metros de resolução), IRS (*Indian Remote Sensing*) (5,8 metros na banda do visível e do infravermelho) e o SPOT, que fez a transição entre esses satélites e os de alta resolução (Ikonos e Quickbird).

A última geração de satélites de alta resolução, segundo VINCIOVÁ et al. (2010), é aquele que apresenta resolução por volta de 1 metro na banda pancromática e destaca os sistemas KOSMOS, EROS, CARTOSAT-1, WorldView-1, FORMOSAT-2, IKONOS, OrbView-3, QuickBird, KOMPSAT-2. Mais recentemente, os últimos satélites dessa geração foram lançados e são: WorldView-1 e Geoeye-1.

Lançado em setembro de 2008, o satélite Geoeye-1 se tornou importante por usar uma tecnologia nova em satélites comerciais de sensoriamento remoto, que é a capacidade de diferentes detalhamentos e a precisão de localização. Ele é capaz de gerar imagens com detalhamento de 0,41 metros no modo pancromático (tons de cinza) e com 1,65 metros de detalhamento no modo multiespectral. A empresa Geoeye ainda destaca que tão importante quanto a sua resolução espacial é a sua precisão de localização, pois o satélite Geoeye-1 é capaz de localizar qualquer objeto com precisão de localização de até 3 metros. Tal nível de precisão de georreferenciamento nunca havia sido alcançado anteriormente por qualquer outro sistema de geração de imagens orbitais. Dentre suas principais características, destaca-se, além da sua alta resolução espacial, a capacidade de gerar até 700 km² de imagens pancromáticas e 350km² de imagens pancromática e multiespectral (PSM) por dia, o que faz do satélite uma ferramenta importante para estudos sobre a cultura do café (PEREIRA-COLTRI et al., 2011).

Os trabalhos com satélites de alta resolução espacial destinam-se, na maioria das vezes, à estimativa da densidade de plantio e cobertura do terreno (COUVRE, 1989; RAMIREZ, 2010). No entanto, alguns trabalhos recentes apontam que satélites de alta

resolução são promissores na estimativa de parâmetros biofísicos de culturas agrícolas, além de promissores para estudo em escalas locais (SAWAYA et al., 2003; VINCIKOVÁ et al., 2010), como muitas vezes o café é plantado.

WU et al. (2007) avaliaram a eficiência de índices de vegetação no cálculo do índice de área foliar (IAF), em imagens Quickbird, e obtiveram valores de R^2 iguais a 0,63 para a cultura do milho e 0,79 para a batata. COLOMBO et al. (2003) obtiveram correlação de 0,73 para determinar IAF de áreas florestais em imagens Ikonos. RAMIREZ e ZULLO JUNIOR (2010) concluíram que altura, índice de área foliar e biomassa de plantios de café podem ser estimados utilizando-se as bandas espectrais do azul e do verde do satélite Quickbird, através do emprego de modelos de regressão baseados em equações não lineares, mas que os índices de vegetação NDVI, SAVI, GVI e RVI não são bons estimadores dos parâmetros biofísicos de cafezais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi dividido em três etapas:

- 3.1 - Análise climática regional de dez municípios produtores de café arábica no norte de São Paulo e sul de Minas Gerais, com o modelo brasileiro ETA/CPTEC;
- 3.2 - Análise da arborização em cafezais como uma forma de adaptação da cultura aos cenários futuros;
- 3.3 - Quantificação do estoque de carbono atmosférico na biomassa das plantas de café como uma atividade de mitigação dos GEEs.

A primeira etapa foi subdividida em três:

- 3.1.1- Análise comparativa dos dados do *baseline* (1961-1990) do modelo ETA/CPTEC com as normais climatológicas de 1961 a 1990 das estações meteorológicas de superfície;
- 3.1.2- Análise dos dados dos quatro cenários futuros do modelo: *control*, *low*, *mid* e *high* e,
- 3.1.3- Aptidão climática do café arábica na região estudada, nos quatro cenários futuros.

A segunda etapa foi denominada de “**arborização como uma prática de adaptação da cultura aos cenários climáticos futuros**” e avaliou como diferentes formas de arborização podem diminuir a temperatura no microclima local do plantio de café. A avaliação foi feita tanto com dados medidos em campo quanto por meio de simulações com o software Envi-Met.

A terceira etapa consistiu na quantificação de carbono estocado na cultura de café arábica e na essência de arborização da macadâmia. A medição do carbono do café foi feita por métodos diretos (destrutivos) em campo e indiretos, por meio de técnicas de sensoriamento remoto com imagens de alta resolução. Essa última etapa foi chamada de “**estoque de carbono atmosférico na biomassa das plantas de café como uma prática de mitigação ao excesso de GEEs**”.

A Figura 2 apresenta o fluxograma e a divisão da metodologia de trabalho. Cada etapa será detalhada individualmente de acordo com a numeração do esquema.

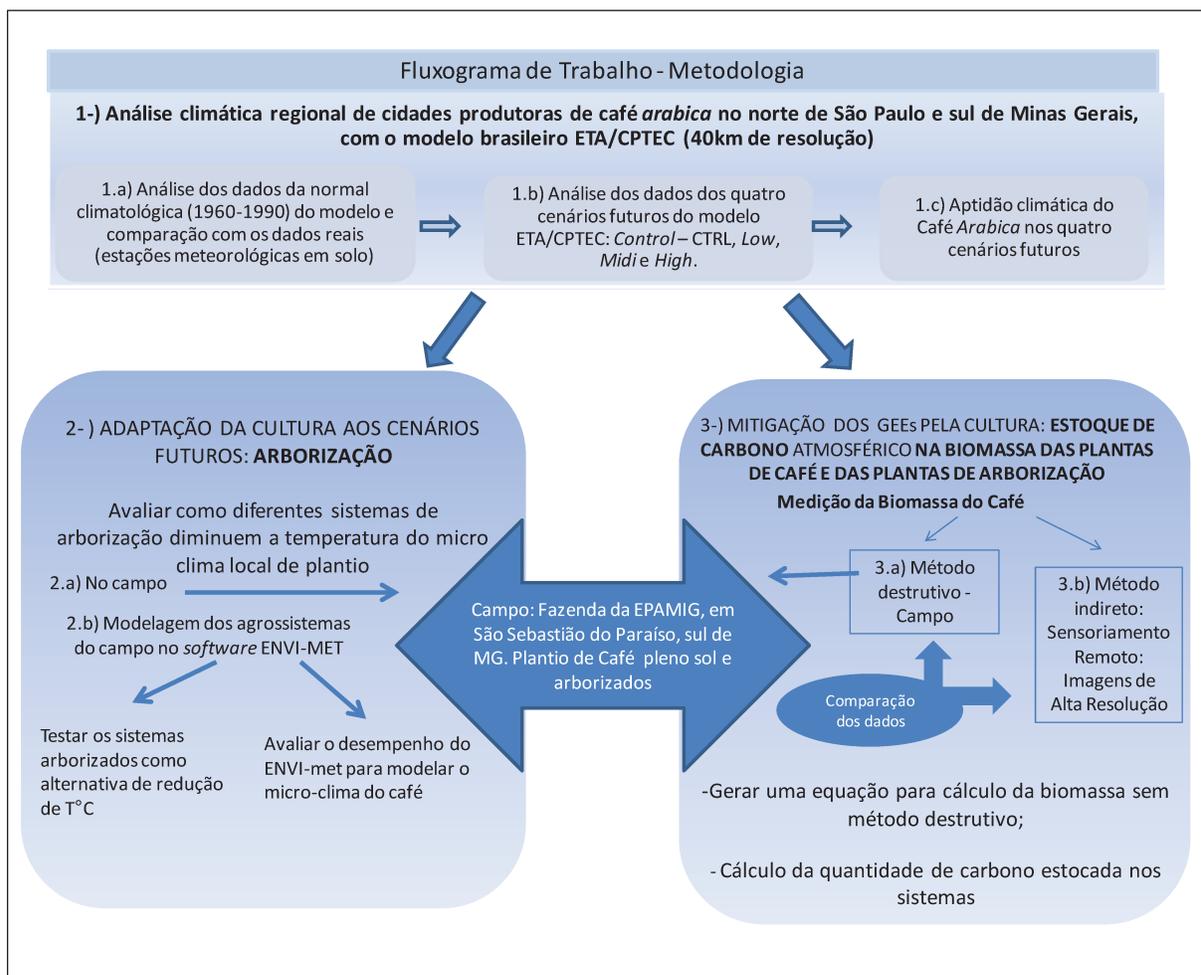


Figura 2 – Esquema da divisão da metodologia do trabalho

3.1- Análise climática regional de municípios produtores de café arábica no norte de São Paulo e sul de Minas Gerais, com o modelo brasileiro ETA/CPTEC

3.1.1) Análise dos dados do baseline do modelo (1961-1990) em comparação com os dados reais das estações meteorológicas em solo

Foram selecionados dez municípios com dados disponíveis da normal climatológica de 1961 a 1990 (ou o mais próximo disso), que fossem aptas ao plantio do cafeeiro e que estivessem localizadas na região produtora do sul de Minas Gerais e norte de São Paulo. Os

municípios selecionados foram: Franca (SP), Guaxupé (MG), Machado (MG), Mococa (SP), Piracicaba (SP), São Carlos (SP), São Lourenço (MG), São Roque de Minas (MG), São Simão (SP) e Vargem Bonita (MG). A Figura 3 apresenta os municípios selecionados e sua localização. A Tabela 1 apresenta as estações meteorológicas utilizadas e as séries de dados.

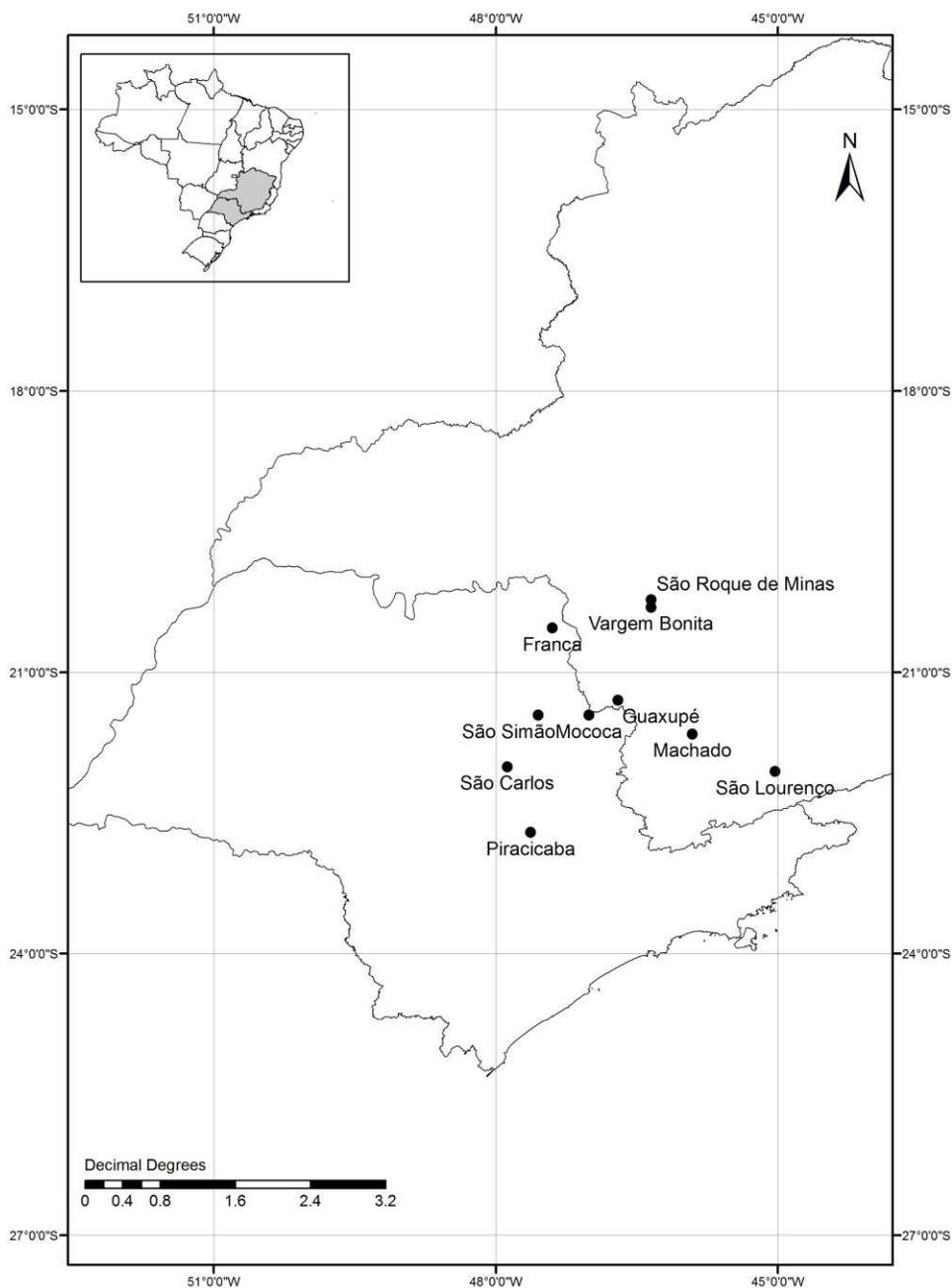


Figura 3 – Localização dos municípios selecionados para análise do clima regional atual e futuro

Tabela 1 – Estações meteorológicas e séries de dados utilizadas

Cidade/Estado	Fonte	Série de dados
Franca/SP	Agritempo	1961-1990
Guaxupé/MG	Cooxupé	1960-1990
Machado/MG	Agritempo	1961-1986
Mococa/SP	IAC	1960-1990
Piracicaba/SP	ESALQ/USP	1960-1990
São Carlos/SP	Agritempo	1961-1990
São Simão/SP	Agritempo	1961-1990
São Lourenço/MG	Agritempo	1961-1990
São Roque de Minas/MG	Agritempo	1979-1990
Vargem Bonita/MG	Agritempo	1978-1990

Primeiro, verificou-se como os dados *baseline* (1960-1990) do modelo ETA/CPTEC simularam os dados reais das estações meteorológicas. Para isso, foi feita a análise estatística do índice de concordância “d” de WILLMOTT (1985), correlação, desvio padrão e viés das médias. O viés foi calculado subtraindo a média estimada pela média real.

O método de WILLMOTT (1985) propõe um índice de concordância (d) que reflete o grau em que a variável observada é estimada com precisão pela variável predita, segundo a Equação (1).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + (|O_i - \bar{O}|))} \quad (1)$$

(Onde: P= variável predita pelo modelo; O= variável observada; \bar{O} = média dos valores observados).

O índice “d” não é uma medida de correlação no sentido formal, mas sim, uma medida do grau em que as variáveis preditas são livres de erros. O índice varia entre 0 (completa discordância entre os valores previstos e observados) e 1 (concordância perfeita). Medidas de diferença são úteis também na avaliação da utilidade de um modelo. O erro médio produzido por um modelo (erro quadrado médio -MSE) ou a sua raiz quadrada, a raiz do erro médio quadrado (RMSE) também foram calculadas, de acordo com a Equação (2).

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n - 1} \right)^{0,5} \quad (2)$$

Onde: P= variável predita pelo modelo; O= variável observada; n = número de observações.

As análises também foram divididas nas estações do ano: verão (dezembro, janeiro, fevereiro – DJF), outono (março, abril e maio – MAM), inverno (junho, julho, agosto – JJA) e primavera (setembro, outubro e novembro - SON).

Os dados do modelo ETA/CPTEC foram cedidos pelo CPTEC/INPE.

3.1.2) Análise dos dados dos quatro cenários futuros

Para a análise dos dados dos cenários climáticos futuro foi realizado, inicialmente, um teste de homogeneidade das séries, através do teste não paramétrico de Pettitt (PETTITT, 1979). BLAIN (2011) explica que esse teste indica se duas amostras oriundas da mesma série Y_1, \dots, Y_t e Y_{t+1}, \dots, Y_T são da mesma população. A estatística $U_{t,T}$ verifica o número de vezes que um elemento da primeira amostra é maior que um elemento da segunda. A estatística $U_{t,T}$ é estimada pela Equação 3.

$$U_{t,T} = U_{t-1,T} \sum_{j=1}^T \text{signal}(y_t - y_j) \quad (3)$$

O mesmo autor explica que, após essa etapa, a estatística $k(t)$ assume o maior valor absoluto dos fatores $U_{t,T}$, indicando o ponto aproximado da alteração nos valores da série (*changing point*). A significância de $k(t)$ é dada pela Equação 4, em que o valor crítico desse fator é estimado.

$$K(t)_{\text{crítico}} = \sqrt{\frac{(T^3 + T^2) \left[-\ln\left(\frac{p}{2}\right) \right]}{6}} \quad (4)$$

BACK (2001) e BLAIN (2011), analisando as Equações 3 e 4, verificaram que este teste é uma versão do teste de populações de Mann-Whitney (teste U). Assim como

VICTORIA et al. (1998), BACK (2001) e MORTATTI et al. (2004), o presente trabalho adotou o nível de significância de $p=5\%$ para a utilização desse método.

Após a realização do teste e a verificação da homogeneidade da série, os dados dos quatro cenários climáticos futuros foram separados em dois grupos: normal climatológica do início do século (2011-2055) e normal climatológica do final do século (2056-2099).

O cálculo da deficiência e do excedente hídrico foi feito por meio da estimativa do balanço hídrico climático utilizando o método de THORNTHWAITE & MATHER (1955), e o método de planilhas no ambiente Excel de ROLIM et al. (1998), considerando um armazenamento de água no solo correspondente a 125 mm (ASSAD et al., 2004). O balanço hídrico foi feito para os dados disponíveis do clima atual (normal climatológica), para os dados futuros do início e do final do século dos quatro cenários futuros.

3.1.3) Aptidão climática de café arábica para os cenários futuros

Os riscos climáticos para a cafeicultura foram definidos a partir dos valores de deficiência hídrica anual e temperatura média anual, conforme a metodologia descrita por CAMARGO (1977) que considera as seguintes características:

- Temperatura Média Anual (T_a)
 - “ T_a ” menor que 17 °C - Inapta Por Frio, por risco de geada – referida nos resultados como **Alto risco climático por frio**;
 - “ T_a ” entre 17°C e 18°C – Marginal - referida nos resultados como **marginal inferior**;
 - “ T_a ” entre 18°C e 23°C – Apta sem restrição – referida nos resultados como **Baixo risco climático**;
 - “ T_a ” entre 23 °C e 24 °C – Marginal – referida nos resultados como **Marginal superior**;
 - “ T_a ” maior que 24 °C - Inapta Por Calor , risco de abortamento floral – referida nos resultados como Alto risco climático por calor (Aborta Flores) – **Alto risco climático**;
- Deficiencia Hídrica Anual (D_a):

- “Da” menor que 150 mm - Apta sem irrigação – referida nos resultados como **Baixo risco climático (irrigação não necessária)**;
- “Da” entre 150 e 200 mm – Marginal – referida no texto como **Marginal**;
- “Da” maior que 200 mm – Apta com irrigação – referida nos resultados como **Necessidade de irrigação**.

A segunda e a terceira etapas do trabalho foram realizadas com base em uma área experimental de plantio de café arábica da fazenda da EPAMIG, em São Sebastião do Paraíso, no sul de Minas Gerais. A descrição da área de estudo, do experimento com a cultura e as medições são explicadas nos itens seguintes.

Descrição da Área de Estudo

O experimento foi instalado em um Latossolo Vermelho distroférico (LVd), na Fazenda Experimental da EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais), em São Sebastião do Paraíso, sul de Minas Gerais, numa altitude de 991 m, latitude 20°55'S e longitude 46°55'W. O município apresenta precipitação pluvial anual média de 1.470 mm distribuídas de outubro a abril, e temperatura média anual de 20,8°C. A Figura 4 apresenta a localização da área de estudo. Nela, havia três tratamentos com tipos diferentes de arborização e uma testemunha a pleno sol. As arborizações, nesses casos, são consideradas “em renque”.

A área de estudo foi implantada inicialmente pela fazenda EPAMIG para medições de incorporação de biomassa verde na cultura do café, aumentando a fertilidade do solo com as leguminosas.

Em cada tratamento foi instalada uma estação meteorológica que mediu, de abril a dezembro de 2009, as variáveis meteorológicas temperatura, radiação, umidade relativa e vento a cada hora. As estações foram colocadas na linha de café, conforme pedido da administração da fazenda, para não atrapalhar os tratamentos culturais.

A área experimental foi implantada em dezembro de 1999 pela EPAMIG e constava de café arábica arborizado com leguminosas e uma testemunha, com café a pleno sol. O café arábica era da cultivar *Catuai IAC 99*, e estava plantado no espaçamento de 3,5 por 0,7 metros. As leguminosas utilizadas no experimento foram:

- Feijão guandu (*Cajanus cajan*) que apresentava porte alto com 2,30 metros de altura e índice de área foliar de aproximadamente 2,75;

- Gliricídia (*Gliricidia sepium*) com 4,50 metros de altura e índice de área foliar (IAF) de 2,15 e;

- Leucena (*Leucoena leucocephala*) com 6,20 metros de altura e IAF de 3,10.

As parcelas estavam dispostas em curva de nível, sequencialmente, em uma encosta homogênea com exposição nordeste e inclinação de 20°. Cada tratamento foi constituído por quatro linhas de leguminosa com cinco metros de largura cada e 90 metros de comprimento, acima de cinco linhas com café em espaçamento de 3,5m x 0,7m e 90m de comprimento. A testemunha, sem arborização, e com o mesmo espaçamento, estava plantada na parcela inferior do experimento. Os tratamentos podem ser visualizados nas Figuras 5 (imagem de satélite de alta resolução – Geoeye-1, da área de estudo) e 6 (esquematização da área). O tratamento com feijão guandu ao norte e leucena ao sul foi chamado de SAF1, enquanto que ao tratamento com Leucena ao norte e gliricidia ao sul foi chamado de SAF2. A testemunha é o pleno sol.

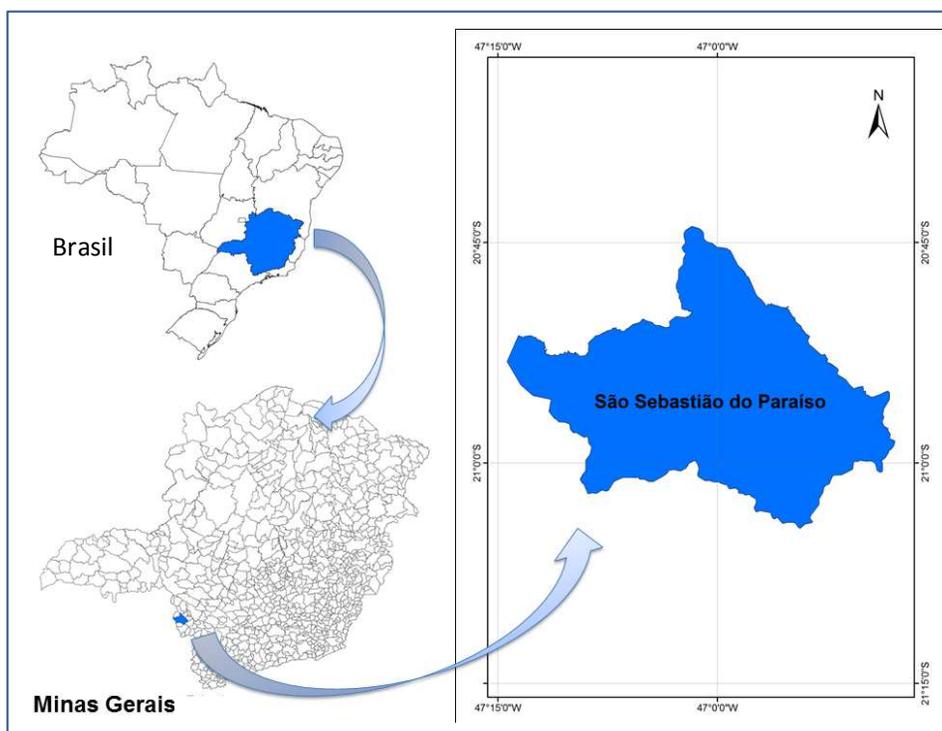


Figura 4 – Localização da área de estudo: São Sebastião do Paraíso, sul de Minas Gerais.

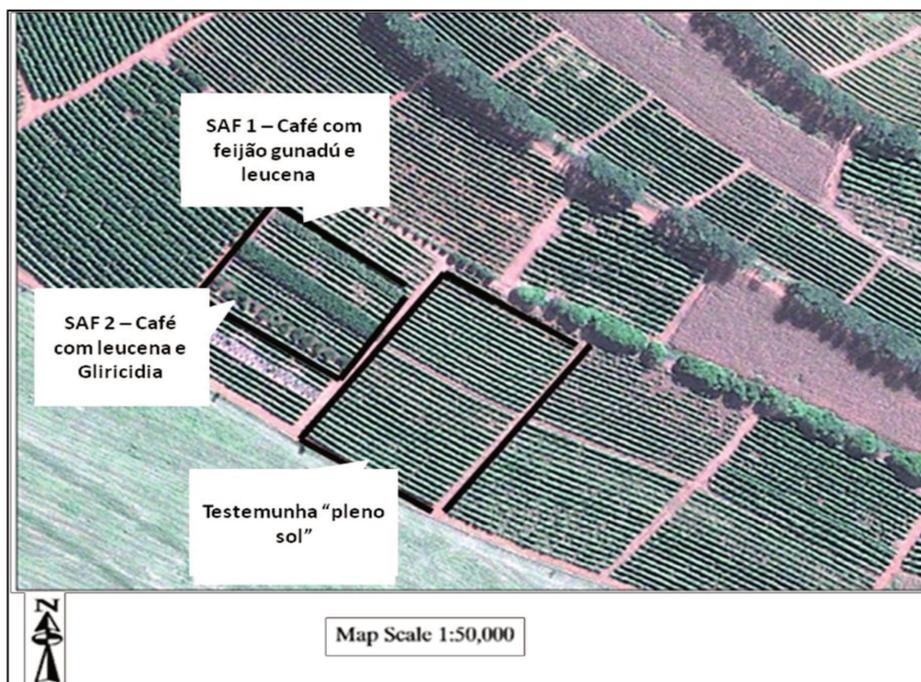


Figura 5- Composição RGB da Imagem de Satélite de alta resolução Geoeye-1 para caracterização da área de estudo com os tratamentos SAF1 e SAF2, e a testemunha pleno sol.

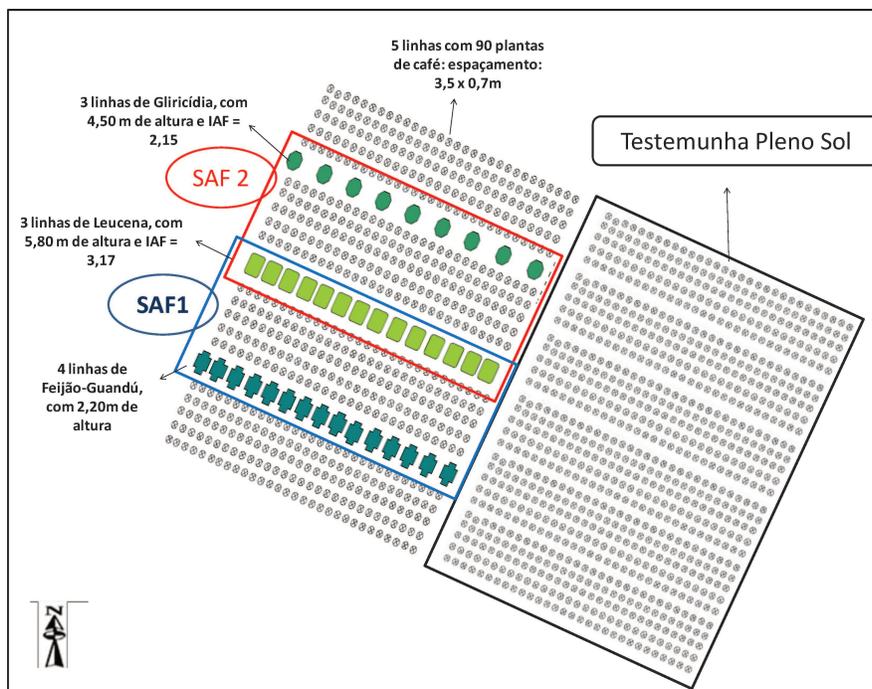


Figura 6- Croqui da área de estudo com os tratamentos SAF1 e SAF2, e a testemunha a pleno sol.

Em uma área adjacente, há o terceiro tratamento (SAF 3), com as mesmas características anteriores, mas com a arborização feita com macadâmia, que tem, aproximadamente, sete metros de altura. O ensaio está localizado nas coordenadas 20°55'S e 47°06'W, em uma encosta com 30° de inclinação, face nordeste. A cultivar utilizada também é Catuai IAC 99 e os espaçamentos e épocas de plantio também são os mesmos do ensaio anterior. A Figura 7 apresenta a imagem de satélite do local. As árvores de macadâmia são plantadas a cada cinco metros, conforme a Figura 8.



Figura 7- Composição RGB da Imagem de satélite de alta resolução Geoeye-1 da área do terceiro tratamento (SAF 3), de café arborizado com macadâmia.

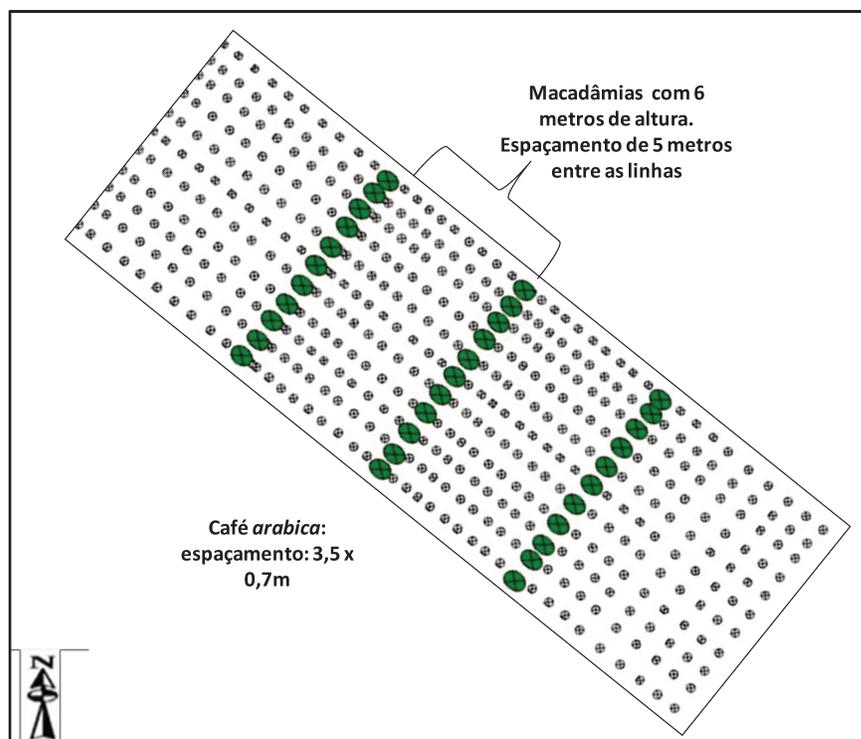


Figura 8 – Croqui da área de plantio com o tratamento SAF3 de café arborizado com macadâmia.

A vegetação periférica de ambas as áreas era constituída por café de porte baixo e não interfere nas condições experimentais. Sendo a exposição do terreno correspondente à face nordeste, as condições de sombreamento são adequadas, durante o ano, a um gradiente homogêneo de insolação para cada um dos tratamentos. A área do experimento é de 7.975 m².

O café, com 13 anos de idade, plantado na mesma época que as leguminosas, foi conduzido de maneira tradicional com as adubações e tratamentos fitossanitários aplicadas de acordo com a recomendação técnica para Minas Gerais, sendo, portanto, uma fazenda representativa dos cafeicultores do sul de Minas Gerais, principal produtor do país.

No tratamento SAF3, o café, plantado no mesmo espaçamento do pleno sol, totalizou 3.775 plantas de café por hectare, e as árvores de macadâmia, que estavam plantadas nas linhas do café, com espaçamento de 5m entre plantas por 3,5m entre linhas, totalizaram 666 plantas por hectare. Já o tratamento a pleno sol totalizou 4.081 plantas por ha. As fotos dos tratamentos e das estações meteorológicas no campo encontram-se no anexo.

3.2 Arborização como uma prática de adaptação da cultura aos cenários climáticos futuros

3.2.1.) Avaliações micrometeorológicas em campo

As estações meteorológicas localizaram-se em áreas representativas das parcelas, na linha de plantio do café, no meio da parcela. Os sensores estavam localizados em altura padrão (1,60m), conforme orientação da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e os anemômetros na altura da copa das plantas de café, conforme proposto por MARIN (2003). Pelo fato das parcelas estarem plantadas em uma encosta sequencial e por não serem extensas, optou-se por instalar uma estação por parcela. Os sensores de todas as estações foram calibrados antes da instalação e aferidos regularmente durante as coletas de dados.

3.2.2) Medições biofísicas da cultura do café e das essências de arborização

Em cada tratamento, selecionou-se cinco plantas de café e mediu-se, durante os meses de abril a novembro de 2009, a altura das plantas (h), o índice de área foliar (IAF) – através do aparelho LAI-2000, a circunferência do tronco (ct), o diâmetro da “saia” da copa (dc) e a altura da copa (ac). Nas plantas arborizadas, foram medidos, na mesma época, a altura das plantas (h), o índice de área foliar (IAF) e a circunferência do tronco à altura do peito (cap).

3.2.3) Simulação com o software Envi-Met

As simulações foram feitas para os meses de floração do cafeeiro, uma vez que o conhecimento prévio do microclima de plantio nessa fase pode determinar a produção da cultura. Assim, foram escolhidas duas datas para os experimentos de simulação: das 23h do dia 13/09/2009 às 24 horas do dia 16/09/2009 – **experimento 1**; e das 23 horas do dia 19/09/2009 às 24 horas do dia 22/09/2009 – **experimento 2**. No primeiro experimento, as condições meteorológicas do dia foram estáveis, os dias estavam secos e sem nebulosidade. Já no segundo experimento os dias estavam instáveis, com alta nebulosidade e chuva.

3.2.4) Área de estudo e desenvolvimento da área para simulação

Para realizar os experimentos de simulação, a mesma área de estudo da fazenda EPAMIG (SAF 1, SAF 2, SAF3 e testemunha) foi recriada no software Envi-Met. Utilizou-se, como dados de entrada no modelo Envi-Met, os seguintes parâmetros:

- Coordenadas geográficas da fazenda (latitude, altitude, longitude);
- Tipo de solo;
- Configuração de plantio dos cafezais arborizados e não arborizados: espaçamento do café, espaçamento das leguminosas e da macadâmia e orientação geográfica de plantio;
- Densidade de plantio (recriada a partir da imagem de satélite de alta resolução da área);
- Características biofísicas das plantas de café coletadas em campo: altura das plantas (h), índice de área foliar (IAF), circunferência do tronco (ct), diâmetro da “saia” da copa (dc) e altura da copa (ac);
- Características biofísicas das plantas de arborização: altura das plantas (h), índice de área foliar (IAF), circunferência do tronco (ct) e altura da copa (ac);
- Dados das estações meteorológicas instaladas nas áreas de plantio.

3.2.5) Modelagem da arquitetura de plantas no Envi-Met

A modelagem das plantas de café foi feita relacionando o formato da planta a um cilindro (representando o tronco) e um triângulo (representando a copa), conforme as Figuras 9a e 9b. Em seguida, a planta modelada foi dividida em dez partes, conforme a Figura 9c. O índice de área foliar (IAF) foi dividido proporcionalmente nessas dez partes da planta, ou seja, quanto maior a circunferência da planta, maior o IAF associado a ela. Assim, as partes 5, 6 e 7 tem maior quantidade de IAF associado a elas.

A Figura 10 apresenta a área de café no software Envi-Met, com os tratamentos SAF1, SAF2, SAF3 e a testemunha (a pleno sol). Os receptores de medição das variáveis meteorológicas no modelo Envi-Met foram colocados na mesma posição que as estações meteorológicas estavam no campo com o intuito de verificar como o modelo Envi-Met reproduz os dados reais (indicado na Figura 10 com um círculo vermelho).

Além disso, também foi realizando um terceiro experimento, chamado de “**experimento 3**”, com as mesmas datas dos dois primeiros, colocando receptores do modelo em todas as linhas de café dos sistemas SAF1, SAF2 e SAF3, conforme a Figura 11, com o

intuito de verificar as variáveis meteorológicas nas linhas de café com as diferentes arborizações, ao longo do dia. Os receptores estão representados pelas letras A, B, C, D e E. Apenas o tratamento SAF3, pela estrutura de plantio, não teve o sensor E.

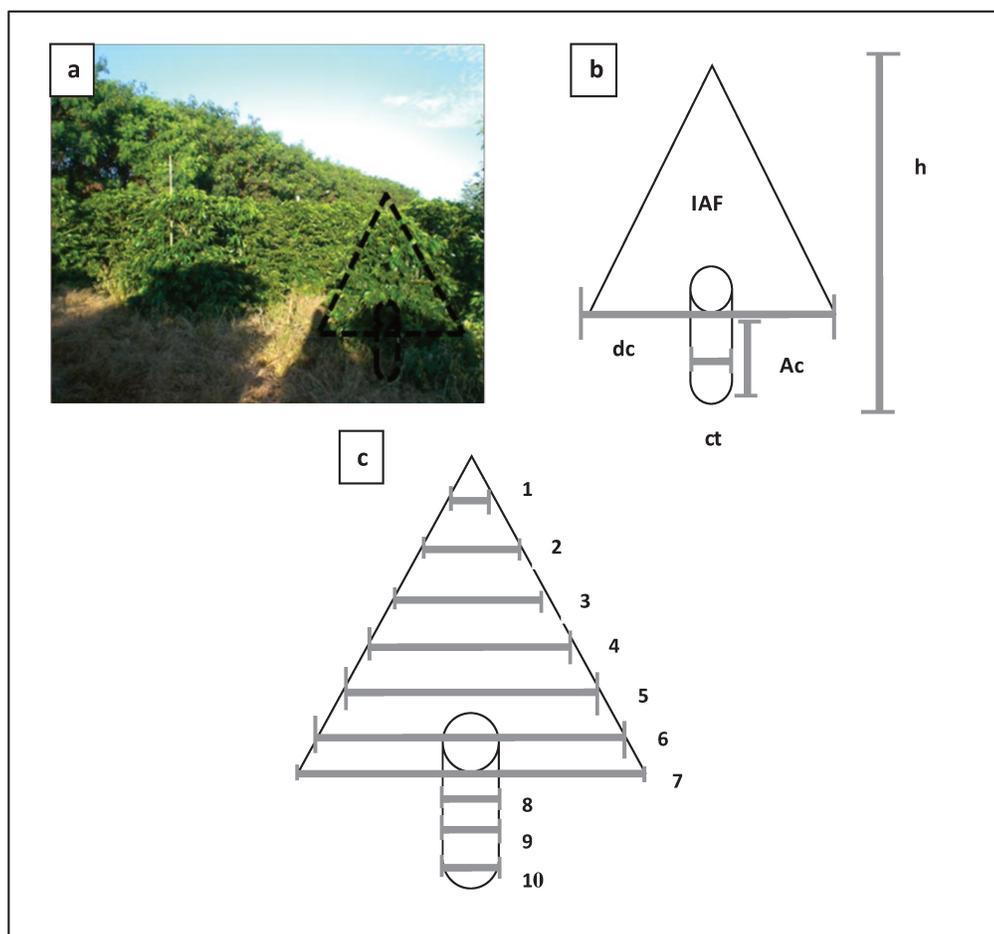


Figura 9 – Modelagem das plantas de café no Envi-Met. Em a: planta no campo e identificação das figuras geométricas que a compõe. Em b: Planta geométrica com as medições feitas em campo, sendo h a altura total da planta, ct a circunferência do tronco, Ac a altura da copa; dc o diâmetro da copa e IAF o índice de área foliar. Em c: divisão das dez partes do modelo.

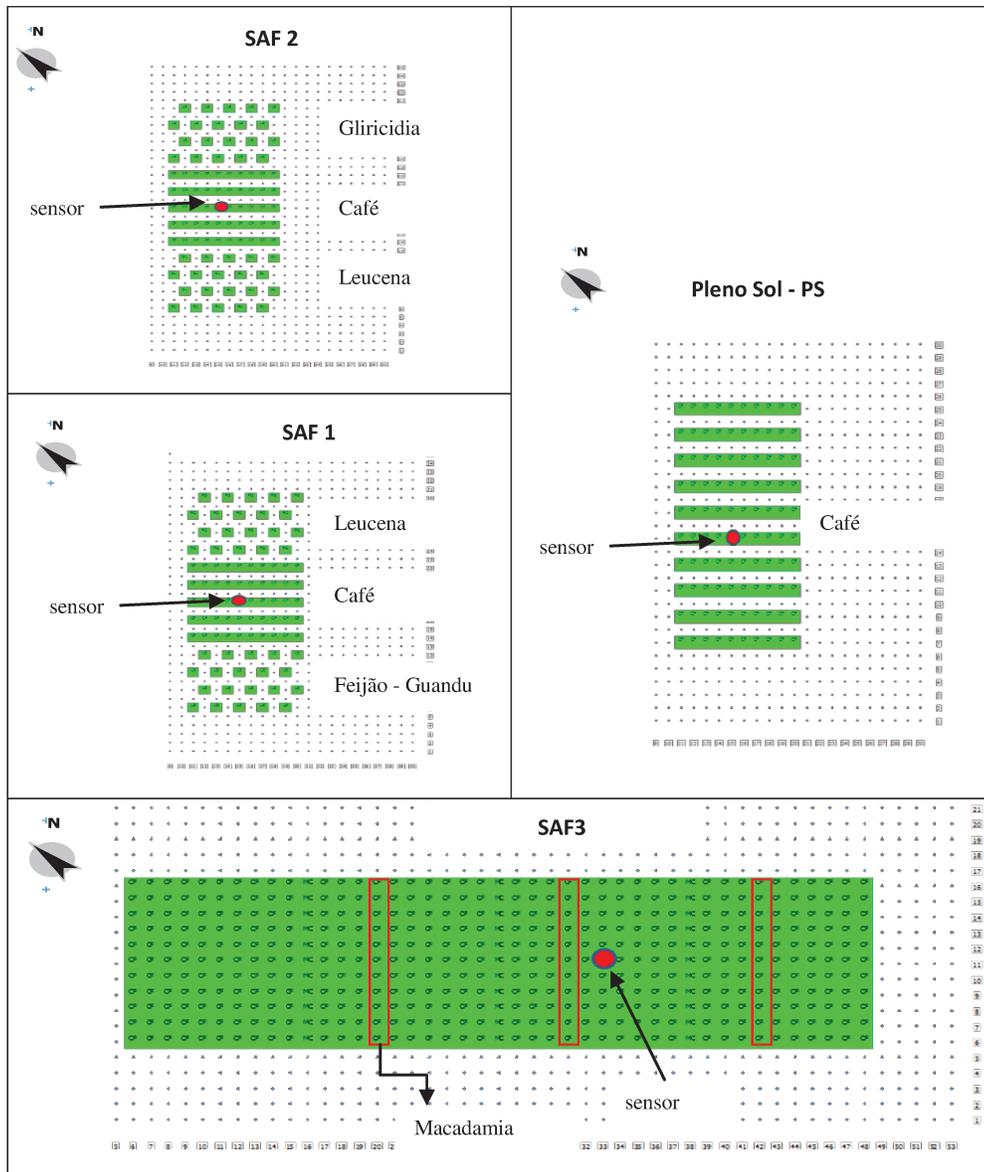


Figura 10 – Tratamentos no software Envi-Met e localização dos sensores de campo

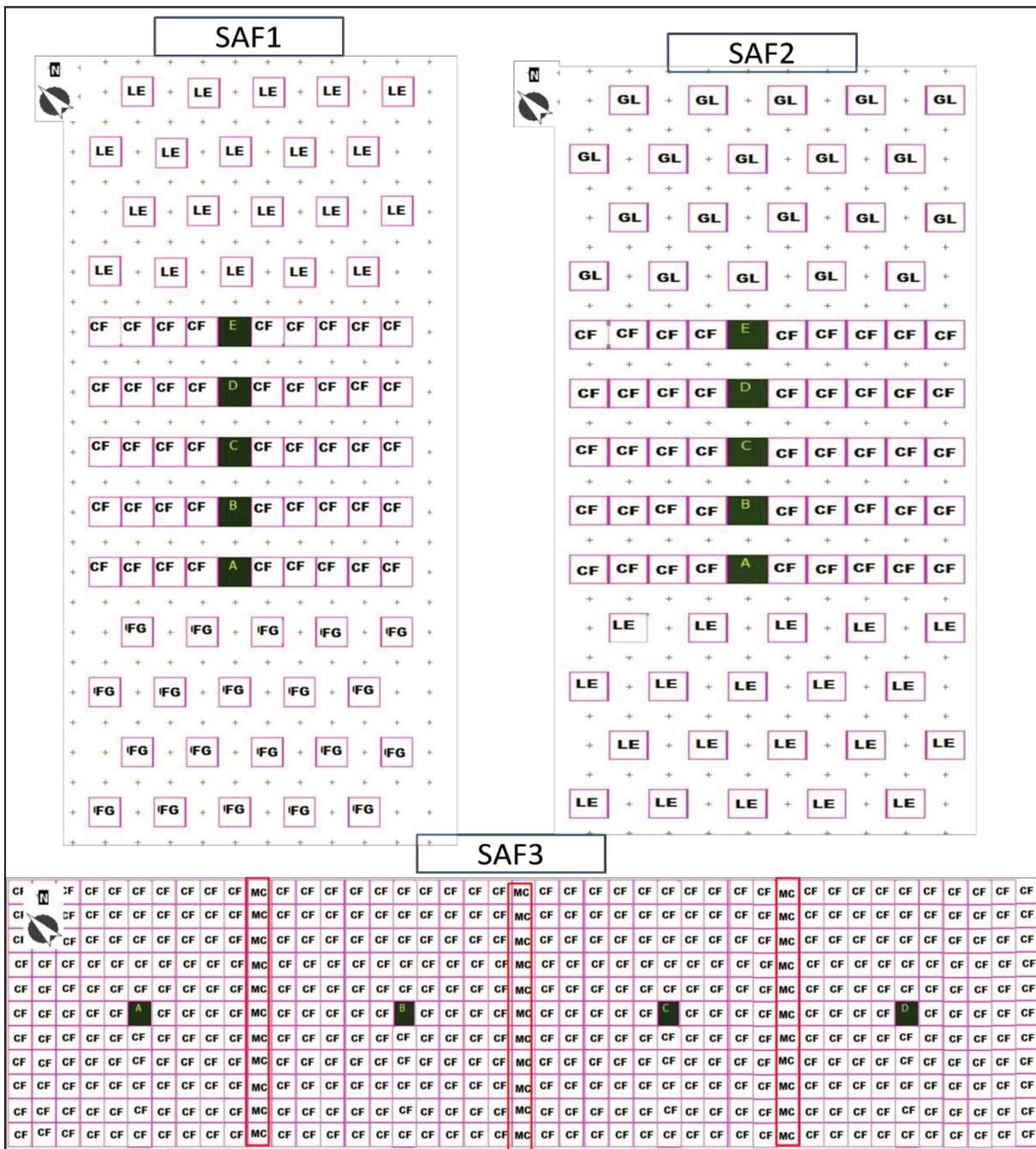


Figura 11 - Localização dos sensores nos sistemas SAF1, SAF2 e SAF3, para o experimento 3. FG = Feijão Guandu, LE = Leucena; GL = Gliricídia, MC = Macadâmia e CF = Café.

3.3 - Mitigação dos GEEs pela cultura do café arábica e pelas essências de arborização:

3.3.1) Estimativa do estoque de carbono na vegetação

3.3.1.a) Biomassa do café arábica cultivado a pleno sol e arborizado com macadâmia (SAF3)

Para o cálculo da biomassa e do estoque de carbono do café arábica cultivado no sistema pleno sol e cultivado com macadâmia (SAF3), utilizou-se o método destrutivo de amostragem direta. Foram retirados 12 exemplares de café da área de estudo, sendo seis do cultivo a pleno sol e seis do cultivo SAF3. Em cada exemplar, mediu-se os seguintes parâmetros biofísicos: altura da planta (h), circunferência do tronco (ct), diâmetro da copa (dc) e índice de área foliar (IAF). O índice de área foliar (IAF) foi medido com o aparelho LAI-2000.

Após a medição, as plantas amostradas foram separadas em folhas, ramos, tronco e fruto e pesados frescos, conforme a Figura 12. Em seguida, amostras de cada parte da planta foram secas em estufa com circulação forçada, a 105°C, até peso constante. O estoque de carbono na biomassa da vegetação foi estimado de duas maneiras: (i) pela metodologia do IPCC (2006), onde se considera que 50% da biomassa seca do café seja constituído de carbono e, (ii) através de análises químicas de carbono no material vegetal.



Figura 12 - Foto do barracão da Fazenda da EPAMIG com planta de café na análise destrutiva, separada em ramos, folhas, tronco e frutos (no balde).

A análise química foi feita no laboratório de Biogeoquímica Ambiental do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) da Universidade de São Paulo (USP). Para tanto, cada parte do material vegetal seco (folhas, ramos, tronco e fruto) foi moído e, através do aparelho LECO CR – 412, foi determinada a porcentagem de carbono em cada parte do material.

Para verificar se os exemplares da amostra destrutiva das plantas de café da testemunha (sol) eram diferentes dos exemplares cultivados no SAF3 foi realizado o teste estatístico não paramétrico de Mann-Whitney (teste U), com nível de significância de 5%. NACHAR (2008) explica que o teste U foi desenvolvido por MANN e WHITNEY (1947) e tem a grande vantagem de poder ser utilizado para amostras pequenas, com um número de observação (n) inferior a 20.

O mesmo autor explica que, matematicamente, o teste U é definido pelas equações (5) e (6):

$$U_x = nxny + \left(\frac{nx(nx+1)}{2} \right) - R_x \quad (5)$$

$$U_y = nxny + \left(\frac{ny(ny+1)}{2} \right) - R_y \quad (6)$$

Onde n_x é o número de observações (n) do primeiro grupo, n_y é o número de observações (n) do segundo grupo, R_x a soma dos dados do primeiro grupo e R_y a soma dos dados do segundo grupo.

Verificando as tabelas de Mann-Whitney, é possível, segundo NACHAR (2008), rejeitar ou não a hipótese nula.

O teste foi realizado no software estatístico JMP/SAS.

3.3.1.b) Biomassa da macadâmia:

Para a determinação da biomassa da macadâmia, foi utilizada a equação alométrica (equação 7) descrita por ANDRADE e IBRAHIM (2003).

$$y = \exp[-3,1141 + 0,9719 \ln(D \times 2h)] \quad (7)$$

onde: D= DAP – diâmetro à altura do peito e h a altura.

Para tanto, foram escolhidas, aleatoriamente, dez plantas de macadâmia, e foi medido o DAP (diâmetro à altura do peito) e a altura (h). O carbono foi estimado pela metodologia do IPCC (2006), considerando que 50% da biomassa seca das árvores seja constituída de carbono.

3.3.1.c) Biomassa do café arábica para equação com dados biofísicos e de sensoriamento remoto

Para o calculo da biomassa de café arábica com dados biofísicos e de sensoriamento remoto, primeiro, realizou-se, novamente, a análise destrutiva como referência de campo. O procedimento destrutivo foi realizado como descrito no item 3.3.1.a. Selecionou-se, aleatoriamente, 13 exemplares de café (cultivados a pleno sol e nos sistemas SAF1 e SAF2). Nesse caso, escolheu-se junto com os sistemas SAF1 e SAF2 porque, além das plantas não apresentarem diferenças estatísticas nos parâmetros biofísicos, a fazenda não permitiu a retirada de mais exemplares de café de cada um dos tratamentos, uma vez que outros experimentos de tese são feitos na área, e uma amostra representativa poderia destruir a área inteira. Sendo assim, no experimento com sensoriamento remoto, optou-se por retirar exemplares da área inteira, não diferenciando os tratamentos arborizados.

3.3.1.d) Equação para estimativa de biomassa com dados de sensoriamento remoto com imagens de alta resolução

Foi utilizada a imagem de alta resolução do satélite Geosy-1, que tem 0,65m de resolução espacial na banda pancromática e 1,65m nas bandas multiespectrais. A imagem foi adquirida em 24 de maio de 2009. As correções atmosférica e radiométrica foram feitas utilizando o sistema SCORADIS (Sistema de Correção Radiométrica de Imagens de Satélite), desenvolvido por ZULLO JUNIOR (1994), que se baseia na teoria e nos parâmetros atmosféricos calculados pelo Modelo 5S (TANRE et al., 1990). Os parâmetros atmosféricos (espessura ótica dos aerossóis, ozônio e coluna total de vapor d'água) utilizados como

parâmetros no SCORADIS foram obtidos no banco de dados do sistema MODIS. Após a transformação dos números digitais (NDs) em valores de refletância real, foi calculado o índice NDVI com a Equação 8.

$$NDVI = \frac{(R_{nir} - R_{red})}{(R_{nir} + R_{red})} \quad (8)$$

onde: R_{nir} – corresponde à banda do infra-vermelho próximo e R_{red} corresponde à banda do vermelho.

Todos os procedimentos de processamento das imagens foram realizados utilizando o software ENVI 4.3 (www.envi.com). Em seguida, os dados do índice de vegetação NDVI foram associados aos dados de campo da biomassa do café e aos parâmetros biofísicos das plantas, e a partir daí, foi elaborada a equação de estimativa de biomassa.

Para escolher os parâmetros biofísicos mais importantes para compor o modelo de estimativa de biomassa, utilizou-se a técnica de cluster hierárquico. A seleção do melhor modelo de estimativa de biomassa foi baseada no coeficiente de determinação (R^2) e nas análises residuais. Os modelos e as demais análises estatísticas foram feitas utilizando o software JMP/SAS (www.jmp.com)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e as discussões serão apresentados seguindo a mesma divisão do fluxograma da metodologia ilustrado na Figura 2.

4.1-) Análise climática regional de municípios produtoras de café arábica no norte de São Paulo e sul de Minas Gerais, com o modelo brasileiro ETA/CPTEC

4.1.a) Análise dos dados do modelo ETA/CPTEC em relação às normais climatológicas reais

A análise comparativa (diferença das médias) entre os dados do modelo ETA/CPTEC e os dados da normal climatológica das estações meteorológicas reais é apresentada na Figura 13 e na Tabela 2. É possível observar que o modelo ETA/CPTEC tendeu a:

- Subestimar os dados da temperatura máxima: oito em dez municípios tiveram temperatura máxima do ETA/CPTEC inferior à real. A maior diferença foi observada em São Lourenço (-5,12°C), e a menor em Vargem Bonita (-0,7°C). Por outro lado, Franca e São Carlos, apresentaram valores de temperatura máxima superestimado: 1,16°C e 0,48°C, respectivamente;
- Superestimar os dados da temperatura mínima: todos os municípios tiveram a temperatura mínima do ETA/CPTEC superior à temperatura real. As temperaturas mínimas do modelo foram superiores entre 0,76°C (em São Lourenço, MG) e 4,12°C (em Piracicaba, SP);
- Superestimar a temperatura média: seis dos dez municípios tiveram a temperatura média do ETA superior à temperatura real: Vargem Bonita, Guaxupé, São Roque de Minas, São Carlos, Piracicaba e Franca. É possível observar que os dados da temperatura média foram superestimados, principalmente, em função da temperatura mínima;
- Superestimar a precipitação, sendo os dados do modelo ETA/CTEC superiores à precipitação real em todos os municípios estudados. A Tabela 2 apresenta as diferenças absoluta e relativa entre a precipitação do modelo e a precipitação real. O modelo superestimou a precipitação, na normal climatológica, entre 1% (em São Roque de Minas) e 37% (em Mococa).

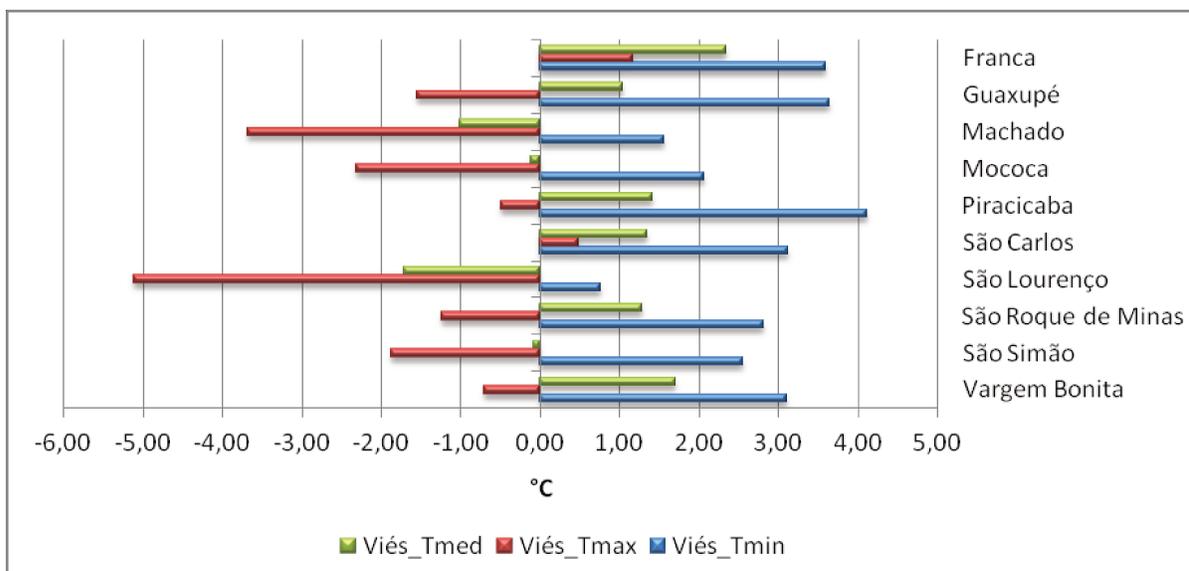


Figura 13- Diferenças, em graus celsius (°C), entre os dados do modelo ETA/CPTEC e a normal climatológica dos dados reais para as temperaturas média (em verde), máxima (em vermelho) e mínima (em azul).

Tabela 2 – Valores da normal climatológica da precipitação dos dados reais e do *baseline* modelo ETA/CPTEC e valores da diferença absoluta e relativa entre os dados do modelo e reais.

Cidade	Precipitação (mm)		Diferença	
	Real	Modelo	Absoluta (mm)	Relativa (%)
Franca	134,9	147,1	12,19	9
Guaxupé	130,4	153,8	0,99	22
Machado	127,4	151,9	24,48	19
Mococa	125,5	171,5	46,02	37
Piracicaba	101,4	132,5	31,08	31
São Carlos	120,0	129,8	9,74	8
São Lourenço	130,8	173,6	48,43	33
São Roque de Minas	117,7	118,7	42,80	1
São Simão	117,8	140,9	23,09	2
Vargem Bonita	126,3	153,5	23,40	18

Uma das explicações para o viés da temperatura máxima é a diferença entre a altitude considerada no modelo e a real. CHOU et al. (2007) explicam que em um modelo com resolução horizontal de 40km, a altitude considerada representa valores homogêneos de uma “caixa” de 1600km² (40km x 40km), não representando adequadamente características de

orografia e vegetação complexas que muitas vezes uma área de 40 km x 40 km pode apresentar.

Nesse sentido, enquanto a altitude do modelo representa uma área de 40km por 40km, os dados reais de altitude são pontuais, referentes à localização da estação meteorológica. A Tabela 3 apresenta os valores de altitude do modelo e dos dados reais e o viés da temperatura máxima, mínima e média.

Tabela 3 – Valores de altitude (em metros) das estações meteorológicas de superfície e do modelo ETA/CPTEC e viés de temperaturas máxima, mínima e média.

Cidade	Altitude (m)			Viés Temperatura		
	Estação	Modelo ETA/CPTEC	Diferença Altitude	Tmax	Tmin	Tmed
Franca	1026,8	831,1	195,7	1,16	3,60	2,34
Guaxupé	879,0	959,6	-80,6	-1,55	3,63	1,04
Machado	873,3	897,4	-24,1	-3,68	1,56	-1,01
Mococa	879,0	917,5	-38,5	-2,31	2,07	-0,12
Piracicaba	546,0	568,5	-22,5	-0,49	4,12	1,41
São Carlos	856,0	672,4	183,6	0,48	3,12	1,35
São Lourenço	953,2	1241,9	-288,7	-5,12	0,76	-1,72
São Roque de Minas	819,0	888,9	-69,9	-1,25	2,81	1,28
São Simão	617,4	688,5	-71,1	-1,88	2,55	-0,08
Vargem Bonita	754,0	888,9	-134,9	-0,70	3,10	1,70

É possível verificar que quanto maior a diferença entre os dados de altitude, maior o viés da temperatura. Essa relação, no entanto, é inversa, sendo a temperatura máxima superestimada quando a altitude no modelo é menor que a real, e subestimada quando a altitude do modelo é maior que a real.

É possível observar que Franca e São Carlos foram os únicos municípios que apresentaram dados de altitude do modelo ETA inferiores aos dados da estação real, sendo também os únicos municípios a apresentarem temperaturas máximas do modelo ETA superestimadas em relação aos dados reais. Nos demais municípios, onde os dados de altitude do modelo foram superiores aos dados de altitude real, o ETA/CPTEC subestimou a temperatura máxima.

Essa relação é mais forte para a temperatura máxima, seguida da média e da mínima. O coeficiente de correlação quadrado (R^2) entre as diferenças de altitude e o viés de temperaturas máximas foi de -0,79. Para a temperatura mínima, o coeficiente de correlação quadrado (R^2) foi de -0,54 e, para temperatura média, foi -0,62.

CHOU et al. (2011) observam que a temperatura a 2 metros é fortemente dependente dos dados de relevo, altitude e camadas superficiais da terra do modelo. Na técnica de “*dowscaling*”, essas representações de superfície apresentam diferenças nas grades aninhadas do modelo, e podem, então, resultar em diferenças no padrão da temperatura a 2 metros.

Além disso, a diferença entre os dados de temperatura real e temperatura do modelo também podem estar relacionados, mais uma vez, à representatividade da grade do modelo. Os valores das temperaturas registrados na estação representam uma área menor que a grade do modelo. CHOU et al. (2011), ao comparar os dados de temperatura a 2 metros do modelo ETA/CPTEC com os dados climatológicos do CRU/ IPCC (*Climate Research Unit*), que também é um dado em grade, observou alta correlação, principalmente no sudeste do Brasil, com algumas diferenças sazonais.

A mesma correlação entre variável climática e altitude, no entanto, não acontece com a precipitação. O valor do coeficiente de correlação (R^2) entre o viés de precipitação e a diferença de altitude foi de 0,37, demonstrando que a diferença de altitude influenciou pouco o viés da precipitação. Segundo CHOU et al. (2011) e MARENGO et al. (2011), a diferença da precipitação real e do modelo é explicada pelos padrões de circulação de alta escala. Os autores ressaltam que o modelo ETA/CPTEC, quando avaliado em relação aos dados do CRU, apresenta a máxima precipitação concentrada ao longo do centro do continente, que tem a presença das Zonas de Convergências do Atlântico Sul (ZCAS). Essa característica também está presente no modelo inglês HadCm3. Nesse contexto, a área de estudo, por estar localizada na região de influência das ZCAS, tende a apresentar dados de precipitação do modelo acima dos dados registrados nas estações. Tendência semelhante de superestimar a precipitação em áreas de atuação das ZCAS foi encontrado por SOLMAN et al. (2008) com o modelo regional MM5 e por SILVESTRI et al. (2009) com o modelo regional REMO, ambos aplicados na América do Sul.

CHOU et al. (2011) ressaltam que a região da Bacia do Prata (região do modelo correspondente à área de estudo) apresenta amplitude no ciclo de precipitação anual menor

quando comparada às demais regiões do modelo, e varia entre 5mm/dia na estação chuvosa e 2mm/dia na estação seca. Esses valores corroboram com os dados encontrados nos municípios estudados. Foi possível observar que, em todos os municípios, o modelo superestima mais a chuva na época chuvosa que na época seca, conforme Figura 14 (exemplo de Franca). SILVESTRI et al. (2009) também encontraram maior superestimação da chuva na época chuvosa do que na época seca. O modelo REMO, no entanto, apresenta maior superestimação (até 50%) quando comparado ao ETA/CPTEC para essa área.

Na Figura 14 também é possível observar que embora haja diferença entre os valores do modelo ETA/CTEC e dos dados reais, é importante notar que o modelo consegue reproduzir o ciclo anual de precipitação e de temperatura, corroborando com os dados de CHOU et al. (2011) que ressaltam que o modelo ETA/CPTEC reproduz com muita proximidade os padrões de circulação de larga escala. Ressalta-se que todos os municípios analisadas apresentaram o mesmo padrão de gráfico que a cidade de Franca. SOLMAN et al. (2008), utilizando o modelo regional MM5 para a América do Sul, também encontraram boa reprodução dos ciclos anuais de temperatura e precipitação.

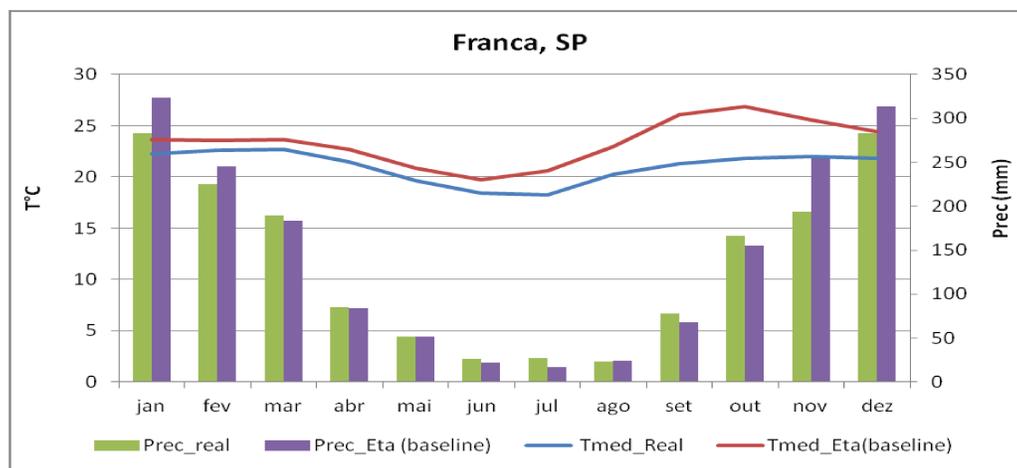


Figura 14- Dados das normais climatológicas real (em azul e verde) e do modelo ETA/CPTEC (vermelho e roxo) para a temperatura em °C (à direita) e a precipitação em mm (à esquerda).

A concordância entre os dados do modelo e os dados reais também pode ser verificado por meio da análise do índice de concordância “d” de WILLMOTT (1985). A

Figura 15 apresenta o índice “d” para os dados da normal climatológica das temperaturas máxima, mínima e média e da precipitação em relação aos dados do modelo. É possível observar que, exceção feita aos dados da temperatura máxima de São Lourenço, todos os outros valores apresentaram índice “d” superior a 0,5, indicando concordância entre os grupos de dados. A precipitação e a temperatura média foram as variáveis que apresentaram os maiores valores de concordância.

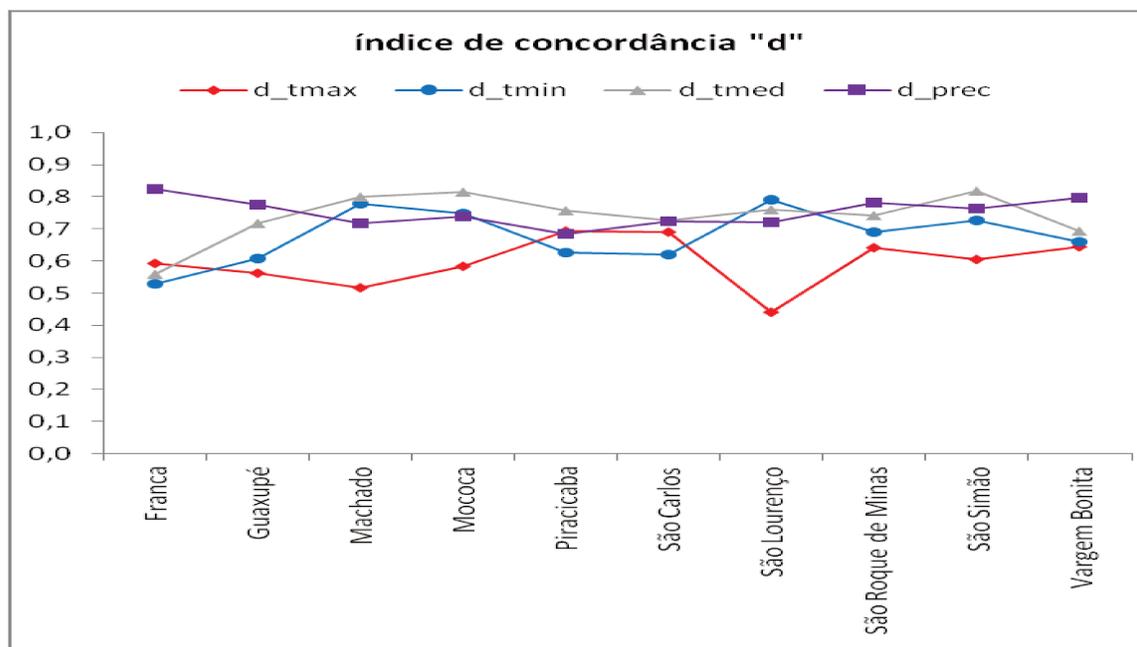


Figura 15 – Índice de concordância “d” entre os dados reais e os dados do modelo para as temperaturas máxima (vermelho), mínima (azul) e média (cinza) e precipitação (roxo).

Análise sazonal das normais climatológicas

De maneira geral, é possível observar que os dados do modelo dos meses de Setembro/Outubro/Novembro (SON) apresentaram as maiores diferenças em relação aos dados reais. A temperatura máxima, de SON, foi superestimada em seis dos dez municípios analisadas, variando entre 0,004°C em São Simão e 2,2°C em São Carlos. A temperatura mínima, superestimada em todos os municípios nessa mesma fase, apresentou valores do modelo maiores entre 1,01°C (em São Lourenço) e 4,62°C (em São Simão). A temperatura média, seguindo a mesma tendência, foi superestimada na maioria dos municípios, e apresentou valores do modelo entre 1,17°C (em Mococa) e 3,58°C (em Vargem Bonita)

superiores aos dados reais. Apenas Machado e São Lourenço apresentaram temperaturas médias subestimadas em SON.

Também nessa fase do ano, a precipitação foi superestimada, com dados do modelo entre 8% (em Franca) e 43% (em São Lourenço) superiores em relação aos dados reais. O modelo superestimou a precipitação entre 0,15mm/dia e 1,08 mm/dia.

As demais estações do ano seguiram a tendência geral de subestimar a temperatura máxima e superestimar as temperaturas mínima e média e a precipitação. A Figura 16 apresenta as diferenças nas médias dos dez municípios, nas quatro estações do ano.

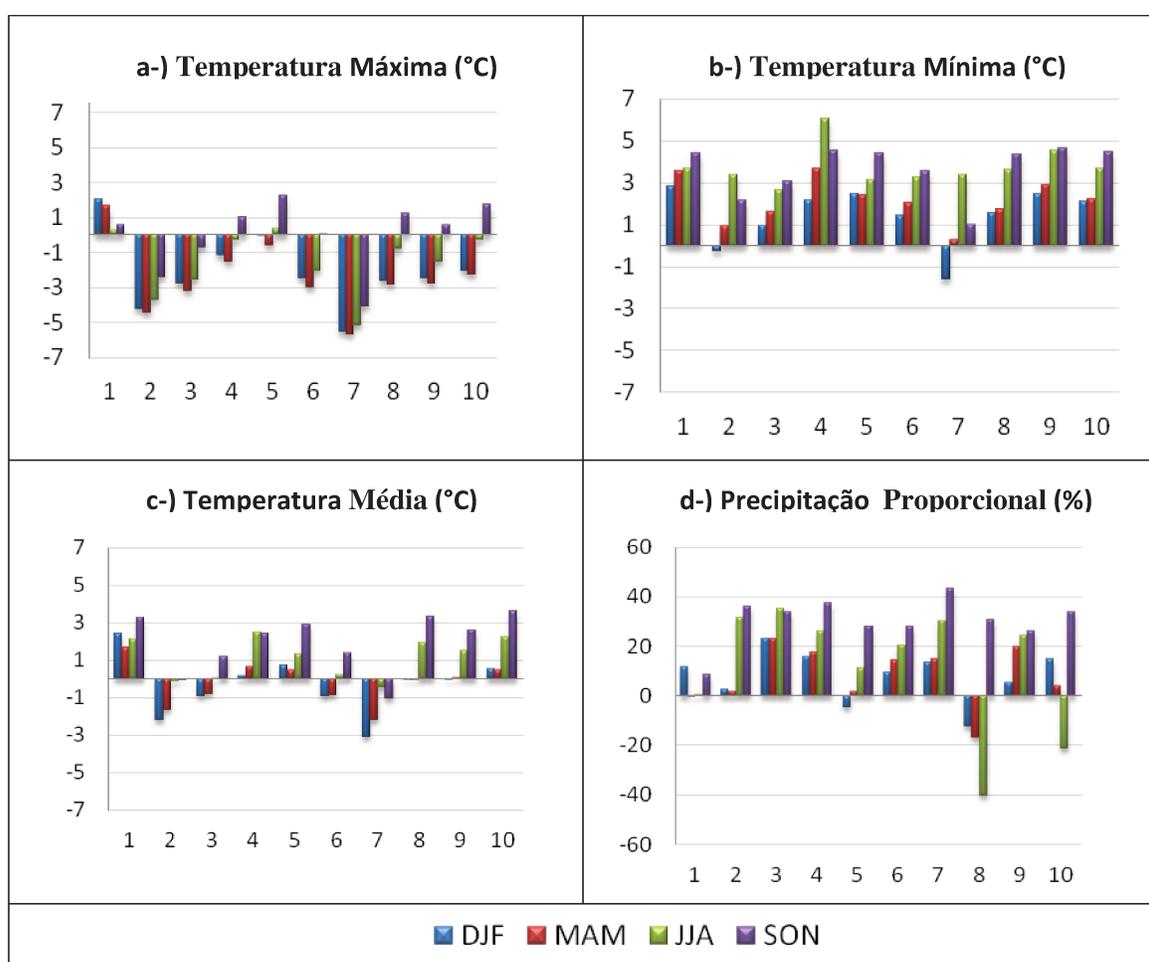


Figura 16 - Diferença sazonal das temperaturas máxima (em a), mínima (em b) e média (em c) e da precipitação (em d), para os municípios de Franca (1), Machado (2), Mococa (3), Piracicaba (4), São Carlos (5), São Simão (6), São Lourenço (7), São Roque de Minas (8), Guaxupé (9) e Vargem Bonita (10). Valores para DJF (em azul), MAM (em vermelho), JJA (em verde) e SON (em roxo).

Essas diferenças nos meses de SON são explicadas pela mudança da estação. CHOU et al. (2011) ressaltam que a primavera, por ser uma época de transição entre o inverno e o verão, e quando as monções sul-americanas começam a se desenvolver, faz com que, em geral, os modelos tenham mais dificuldades em simular adequadamente várias de suas características climatológicas. Dados semelhantes foram encontrados por SILVESTRI et al. (2009) em que as temperaturas do modelo regional REMO foram superestimadas em mais de 4°C nas regiões norte e nordeste e em mais de 3°C entre as latitudes 20°S e 40°S. SOLMAN et al. (2008) também encontraram vieses positivos de temperatura, na primavera, na região sudeste do Brasil.

4.1.b.) Análise dos dados dos cenários futuros

O teste de Pettitt (1979) demonstrou que houve mudança significativa na homogeneidade das séries, em todos os cenários futuros, para todas as variáveis estudadas: temperaturas máxima, mínima e média e precipitação. O cenário que apresentou maior homogeneidade nas séries foi o *low*. As mudanças (quebras nas séries) nem sempre ocorreram no mesmo ano, e variaram de acordo com o cenário e variável. O ano que mais apresentou quebra nas séries foi 2056. Por isso, as séries dos cenários futuros foram divididas em duas épocas: “1- início do século”, período que vai de 2011 a 2055; e “2- final do século”, período que vai de 2056 a 2099.

Temperatura

A Tabela 4 apresenta o acréscimo da temperatura média do ar (ou anomalias positivas) entre os dados da temperatura máxima do início do século (2011-2055) e os dados do clima de referência (*baseline* do ETA/CPTEC 1961-1990). No início do século, nos quatro cenários, a temperatura máxima poderá aumentar entre 0,75°C (na cidade de Machado, cenário *control - CTRL*) e 3,7°C (na cidade de São Roque de Minas, no cenário com média emissão de gases de efeito estufa – *midi*). Os municípios que apresentaram valores de anomalias positivas acima de 3°C foram: São Roque de Minas (cenários *midi* e *high*), Vargem Bonita (cenário *midi*), São Carlos (no cenário *midi*) e São Simão (cenário *midi*). O cenário *midi* foi o que apresentou, nesse primeiro período de estudo, maiores anomalias positivas.

Na média geral dos municípios estudados, a região tende a apresentar anomalias positivas da ordem de 2,2°C, corroborando com os dados de MARENGO et al. (2011) que estima que, até 2040, a região da bacia do Paraná (onde a área de estudo se localiza) poderá apresentar anomalias positivas da ordem de 1,8°C e, entre 2041 e 2070, essas anomalias atingiriam 3,2°C.

Tabela 4 – Acréscimo da temperatura máxima (em °C) – anomalias positivas - dos quatro cenários futuros do início do século e os dados ETA 61-90 (*baseline*).

Cidade	Cenário			
	CTRL	LOW	MIDI	HIGH
Franca	1,93	2,07	3,05	2,61
Guaxupé	1,96	2,10	3,02	2,63
Machado	0,75	0,88	1,68	1,44
Mococa	1,91	2,02	2,91	2,55
Piracicaba	1,32	1,56	2,33	2,09
São Carlos	1,90	2,20	3,06	2,71
São Lourenço	1,07	0,88	1,65	1,44
São Roque de Minas	2,43	2,76	3,70	3,32
São Simão	1,98	2,10	3,01	2,61
Vargem Bonita	2,00	2,32	3,27	2,88

A Figura 17 demonstra que não só a média da temperatura máxima tende a aumentar, mas também a mediana, demonstrando que as temperaturas máximas apresentam um deslocamento para valores mais elevados. Também é possível verificar na Figura 17 que nos cenários de maior emissão de gases de efeito estufa (*midi* e o *high*), a distribuição dos dados é menos extensa (caixas menores nos gráficos *boxplot*) concentrando-se nos valores mais elevados de temperatura. Além do aumento médio da temperatura máxima foi possível observar, para a maioria dos dez municípios estudados (exceção feita a Machado e São Lourenço), a maior frequência de valores extremos acima de 35°C (os dados *outliers* dos gráficos *boxplot*). Machado e São Lourenço, embora não tenham apresentado valores extremos acima de 35°C, apresentaram maior frequência de temperaturas elevadas, diferentes da normal climatológica. Os municípios de Franca, São Simão, São Carlos, Mococa, São Roque de Minas e Vargem Bonita são as que apresentam maior quantidade de valores extremos nos cenários futuros.

O aumento da frequência dos eventos climáticos extremos representa, segundo o relatório do IPCC (2007), uma das principais características das mudanças climáticas globais. Para a cultura do café arábica, a ocorrência frequente de temperaturas máximas superiores a 34°C causa o abortamento de flores e, conseqüentemente, perda de produtividade (CAMARGO, 1985; PINTO et al., 2001; SEDIYAMA et al., 2001; ASSAD et al., 2004). Assim, o período de setembro a novembro, que é a época de florescimento do cafeeiro, é o mais sensível ao aumento extremo da temperatura e, segundo MARENGO et al. (2011), os cenários futuros do modelo ETA/CPTEC apresentam incremento de temperatura na região sudeste do Brasil no início da primavera, demonstrando mais uma vez a susceptibilidade da cultura frente às mudanças climáticas. Segundo DRINNAN e MENZEL (1995), temperaturas entre 28°C e 33°C já provocam redução na produção de folhas e na atividade fotossintética do cafeeiro.

Seguindo, ainda, a discussão do item anterior (viés entre a temperatura do modelo e real) a Figura 17 também ilustra essas diferenças, demonstrando a superestimação da temperatura máxima de Franca e São Carlos, e a subestimação dos demais municípios. Vale ressaltar ainda, que, exceção feita a São Roque de Minas, o modelo não superestima os dados de extremos de temperatura (*outliers*). Pelo contrário, tende a subestimar os extremos em relação aos dados reais. Nesse sentido, então, é de se esperar que, já na primeira metade do século, os cenários futuros apresentem valores extremos um pouco mais acentuados que os demonstrados na figura 17.

A Figura 18 apresenta os valores das temperaturas máximas mensais dos dados do modelo ETA/CPTEC (*baseline* e cenários futuros) e da normal climatológica dos dados reais. É possível observar que os cenários *high* e *midi* são os que mais estimam um aumento de temperatura, e que a estação da primavera é a que apresenta esse aumento mais acentuado. Embora em alguns municípios (como São Lourenço e Machado) o modelo subestime as temperaturas máximas (fazendo com que a temperatura real das estações meteorológicas seja superior aos cenários futuros), é importante notar a tendência de aumento. Os modelos climáticos globais apresentam incertezas em suas predições, pois são muitas as forçantes que atuam no modelo de projeção de mudanças climáticas globais (GIORGI, 2005). O autor explica que as principais fontes de incertezas são os aspectos randômicos das forçantes antropogênicas e naturais, processos estocásticos e não-lineares do sistema climático,

inabilidade de representar todos os processos climáticos em um modelo numérico, entre outros. Assim, é importante que o usuário final das projeções as entenda e esteja consciente das incertezas e limitações dos modelos (GIORGI e MEARNNS, 2002).

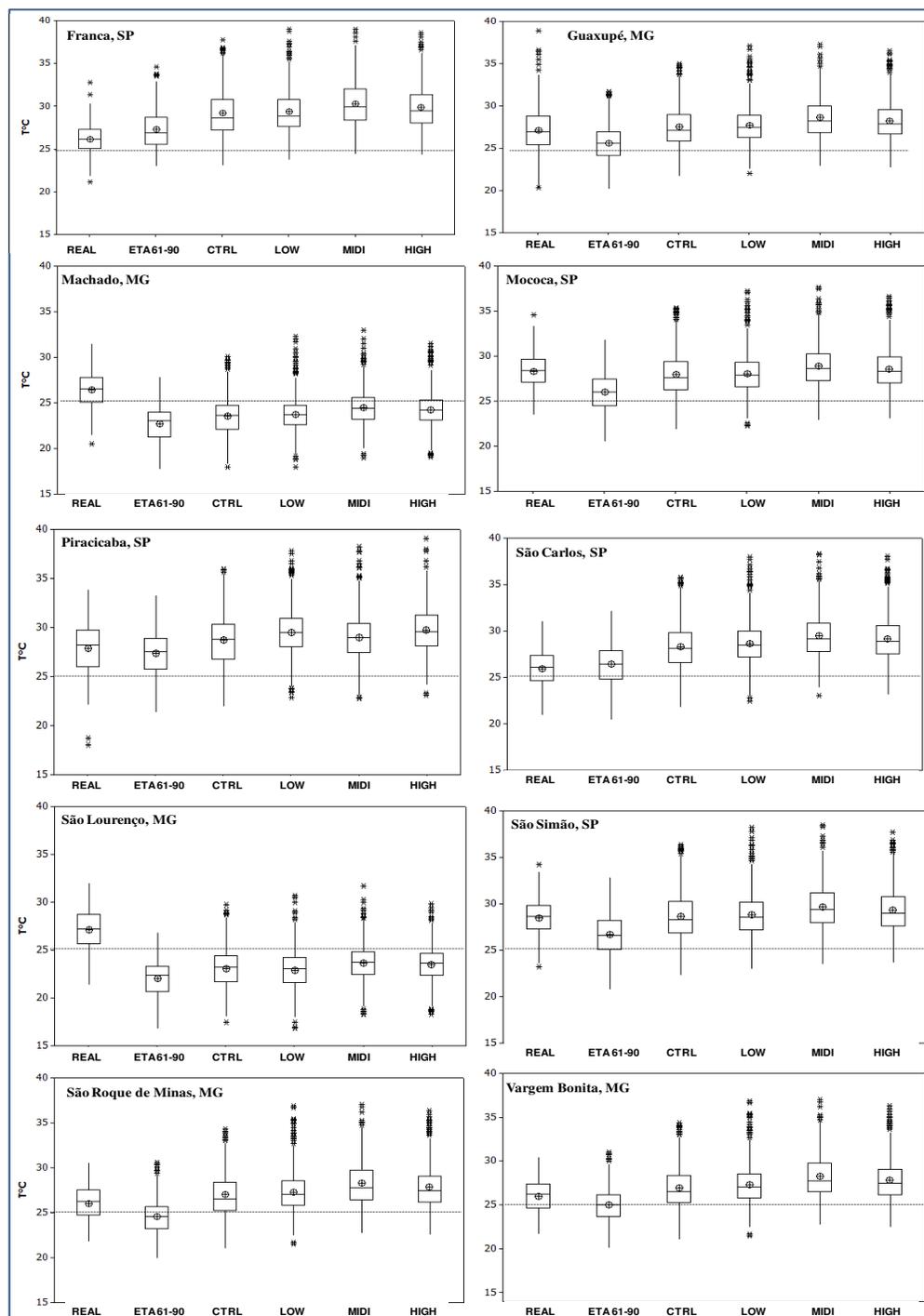
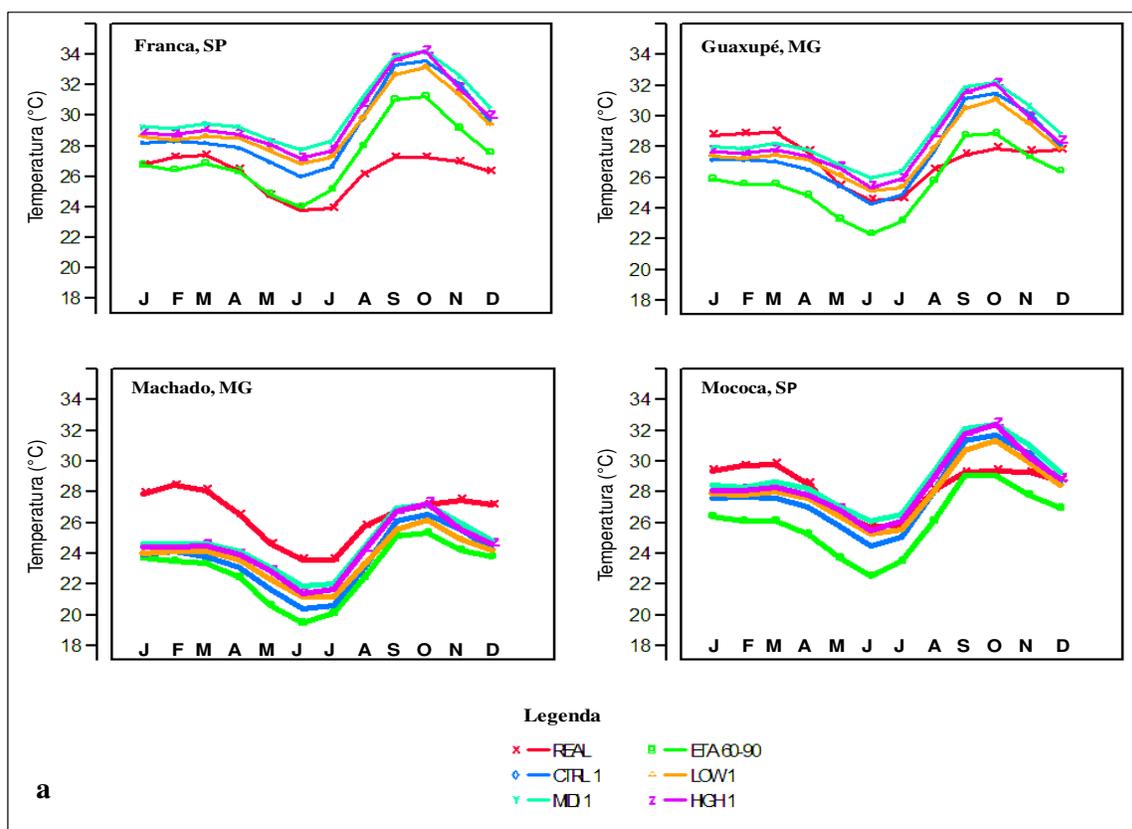


Figura 17– Valores das temperaturas máximas nos quatro cenários futuros para o início do século.

Nesse sentido, é importante que o usuário final do modelo ETA/CPTEC e dos dados dessa região de estudo note as diferenças entre os dados reais e os dados do *baseline* do modelo, mas também é importante ressaltar que os cenários futuros apresentam uma tendência de aumento da temperatura, e é esse fator que deve ser considerado para estudos de impactos do aquecimento global. MARENGO et al. (2011) ressaltam que as projeções quantitativas das anomalias futuras têm o potencial de uso em estudos que planejem ações de adaptação e mitigação, e, nesse sentido, os cenários futuros podem fornecer informações que possibilitem a tomada de decisão dos setores econômicos.

Na Figura 18, em vermelho, estão os dados reais da temperatura máxima (dados de estação) e, em verde, os dados do modelo ETA/CPTEC. Os cenários futuros tendem a aumentar os valores de temperatura, em relação ao *baseline*, em até 3,7°C no início do século atual. Logo, espera-se um aumento significativo das temperaturas dos dados reais, também, já para a primeira metade deste século.



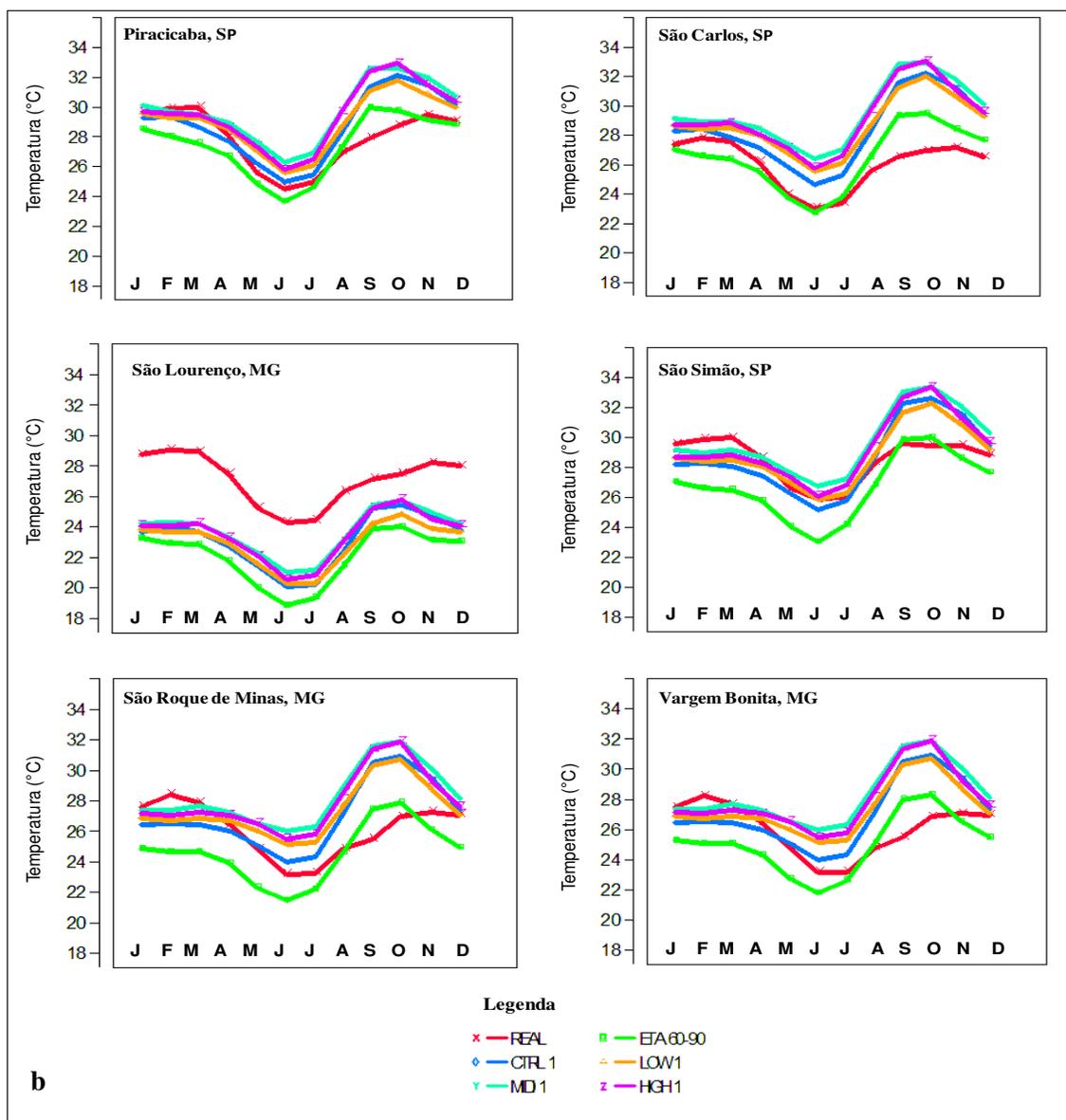


Figura 18– Valores da temperatura máxima mensal do modelo ETA/CPTEC (*baseline* e cenários futuros) e dos dados reais da normal climatológica do início do século. Em a as municípios de Franca, Guaxupé, Machado e Mococa e, em b, Piracicaba, São Carlos, São Lourenço, São Simão, São Roque de Minas e Vargem Bonita.

A Tabela 5 apresenta a diferença entre os dados do *baseline* do modelo ETA/CPTEC e os dados dos cenários futuros do final do século (2056-2099). É possível observar que os dados de temperatura máxima dos cenários futuros do final do século apresentam a mesma tendência de aumento do início do século, mas com valores superiores. A temperatura máxima poderá subir entre 0,7°C (Machado, cenário com baixas emissões de gases de efeito estufa –

low) e 6,1°C (São Roque de Minas, cenário com alta emissão de gases de efeito estufa – *high*). Esses valores corroboram com os dados do cenário mais pessimista e extremo do relatório do IPCC (2007).

Tabela 5 – Diferença (em °C) entre os dados do *baseline* do modelo ETA/CPTEC e os dos cenários futuros para a segunda metade do século (2056-2099).

Temperatura Máxima – Final do Século				
Cidade	CTRL	LOW	MIDI	HIGH
Franca	3,83	1,89	5,58	5,74
Guaxupe	3,77	1,93	5,43	5,54
Machado	2,27	0,75	3,79	3,92
Mococa	3,69	1,85	5,26	5,38
Piracicaba	3,03	1,42	4,69	4,83
São Lourenço	2,50	0,79	3,63	3,74
São Carlos	3,71	2,03	5,46	5,63
São Roque de Minas	4,24	2,61	6,05	6,19
São Simão	3,84	1,93	5,49	5,62
Vargem Bonita	3,80	2,17	5,61	5,75

A Figura 19 apresenta os valores das temperaturas máximas nos cenários futuros, do *baseline* do ETA/CPTEC e dos dados reais para o período 2056-2099. É possível observar que a maioria dos municípios (oito entre as dez municípios estudadas) apresenta a média (e a mediana) da temperatura máxima acima de 30°C nos cenários *midi* e *high*, demonstrando que a frequência de temperatura máxima acima desse valor será maior a partir de 2056. Em seis municípios, os cenários *ctrl* e *low* apresentam as médias e as medianas próximas de 30°C. Franca, Piracicaba, São Carlos e São Simão, no entanto, apresentam o cenário *control* acima de 30°C.

Também conforme a primeira metade do século é possível observar maior frequência de valores extremos, mas a partir de 2056, os municípios passarão a apresentar maior frequência de valores acima de 40°C. Apenas Machado e São Lourenço, em Minas Gerais, apresentam valores extremos menores que os demais, embora, o modelo projete temperaturas extremas acima de 35°C para esses municípios.

Também no período do final do século, é possível observar um aumento mais significativo da temperatura máxima nos meses da primavera, conforme pode ser observado na Figura 20. Os cenários *high* e *midi* são os que apresentam maiores aumentos.

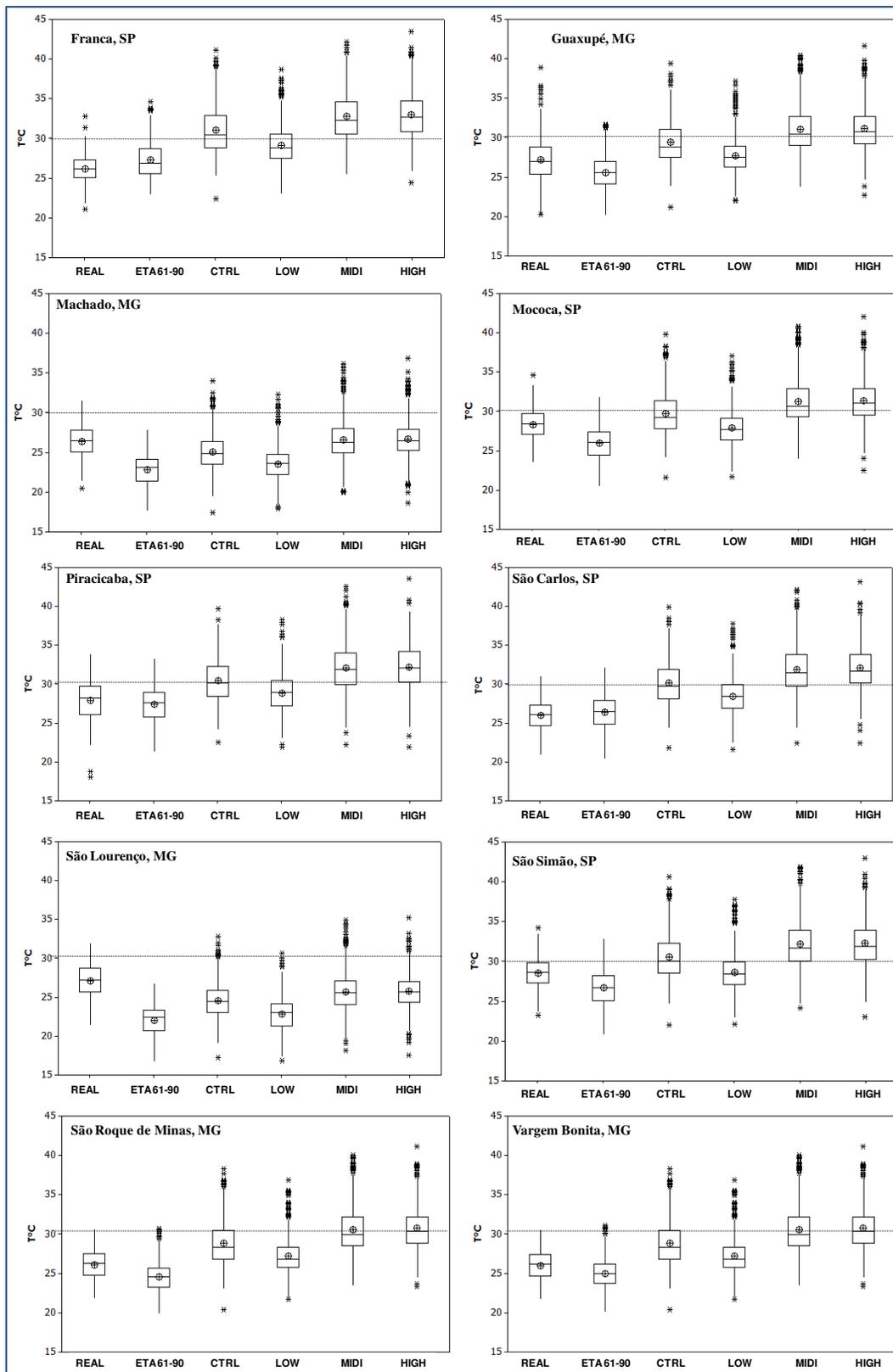
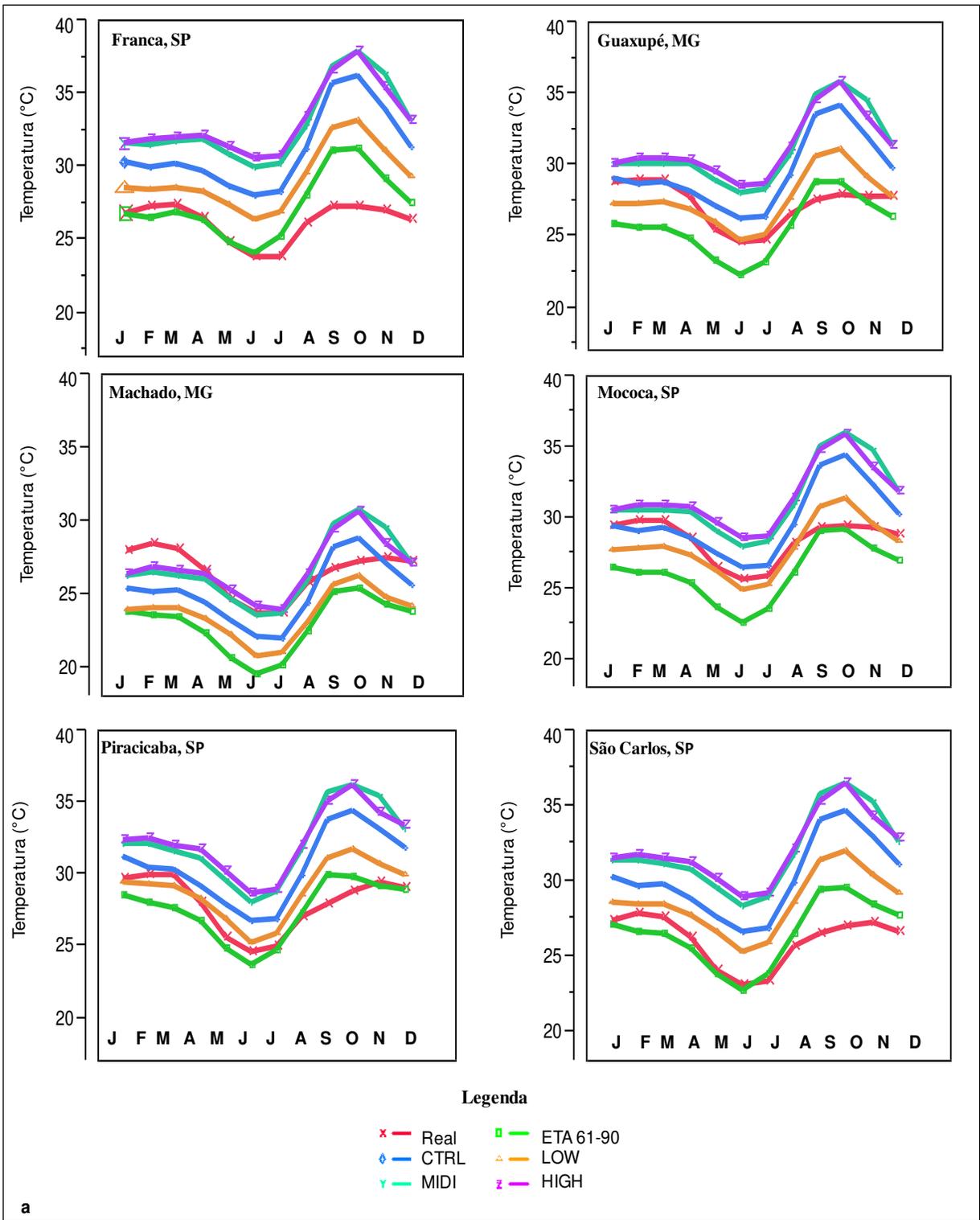


Figura 19 – Valores das temperaturas máximas dos cenários para 2056-2099.



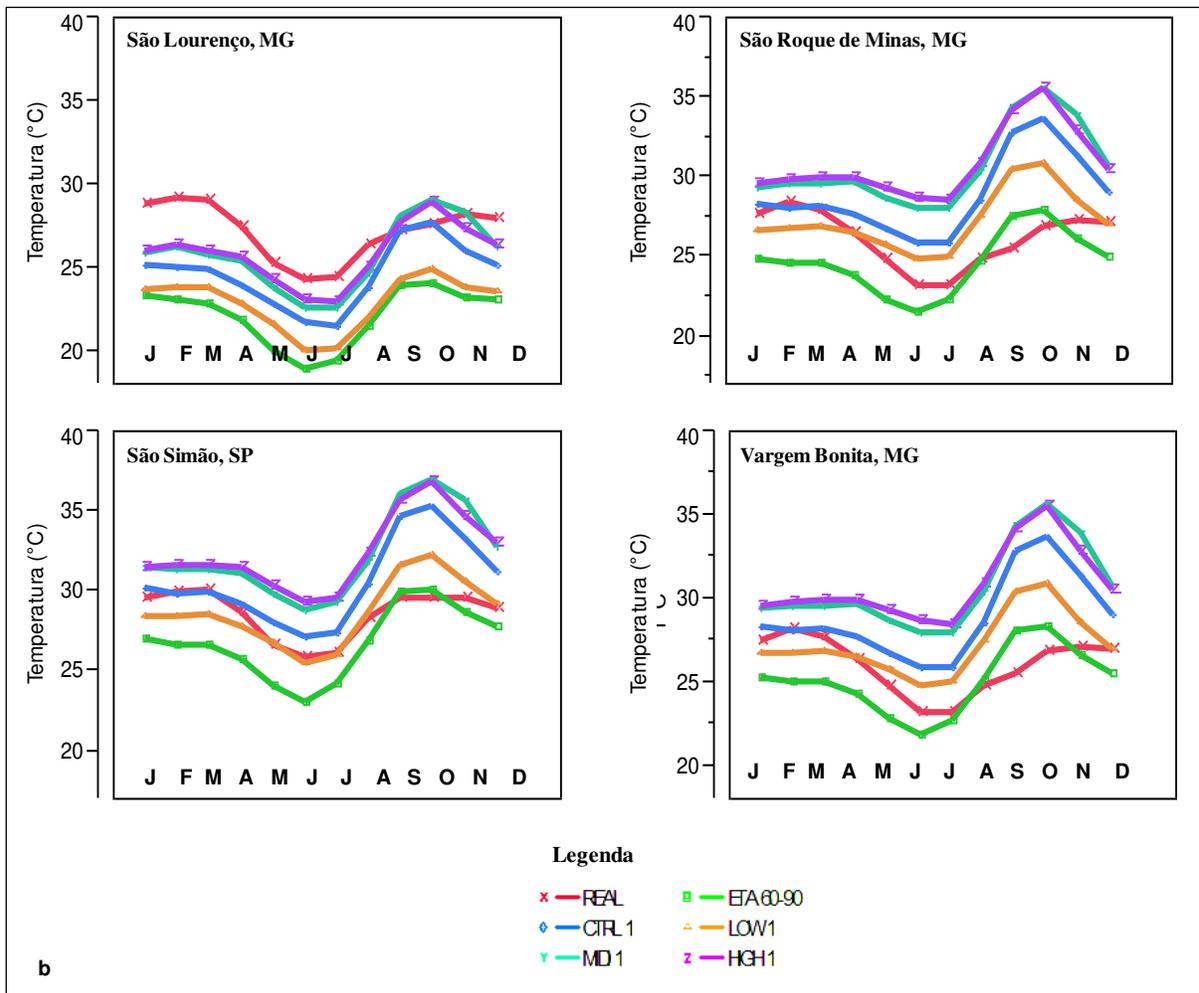


Figura 20 - Valores da temperatura máxima mensal do *baseline* do modelo, dos cenários futuros (2056 – 2099) e dos dados reais da normal climatológica (1961-1990). Em (a) os municípios de Franca, Guaxupé, Machado, Mococa, Piracicaba e São Carlos. Em (b), São Lourenço, São Roque de Minas, São Simão e Vargem Bonita.

Os dados da temperatura mínima nos quatro cenários futuros, tanto no início quanto no final do século, seguem as mesmas tendências que os dados da temperatura máxima, que é o de maior aumento nos cenários *high* e *medi*. O primeiro período estudado, do início do século, apresentou os maiores valores no cenário *medi*. No segundo período de estudo (2056-2099), os maiores valores foram encontrados no cenário *high*. No início do século, os municípios que apresentaram maior diferença entre os dados do *baseline* do modelo e dos cenários futuros foram São Roque de Minas (diferença de 3,1°C, no cenário *medi*), São Simão

(diferença de 2,89°C, no cenário *midi*), Mococa (diferença de 2,86°C, no cenário *midi*), Guaxupé e São Carlos (2,84°C nos cenários *midi* e *high*, respectivamente).

No final do século, as diferenças entre os dados do *baseline* do modelo e dos cenários futuros foram maiores, chegando a 5,28°C em São Carlos, no cenário *high*. Guaxupé, Mococa, São Roque de Minas e São Simão também apresentaram diferenças da ordem de 5°C, no cenário *high*. A Tabela 6 apresenta a diferença entre os valores do *baseline* do modelo (ETA 61-90) e dos cenários futuros, no início e final do século. As maiores diferenças estão em negrito.

Tabela 6 – Diferença entre os dados do *baseline* do modelo (ETA 60-90) e os dados dos cenários futuros do início e final do século.

Cidade	Temperatura Mínima							
	Início do Século (2011-2055)				Final do Século (2056-2099)			
	CTRL1	LOW1	MIDI1	HIGH1	CTRL2	LOW2	MIDI 2	HIGH2
Franca	1,72	1,82	2,61	2,45	3,30	1,71	4,55	4,91
Guaxupé	1,97	2,06	2,84	2,70	3,53	1,97	4,74	5,07
Machado	0,45	0,56	1,30	1,20	2,01	0,47	3,16	3,50
Mococa	2,02	2,10	2,86	2,73	3,59	2,00	4,77	5,12
Piracicaba	1,70	1,94	2,61	2,56	3,33	1,86	4,50	4,94
São Lourenço	0,49	0,53	1,25	1,16	2,09	0,44	3,09	3,47
São Carlos	1,99	2,23	2,95	2,84	3,62	2,13	4,89	5,28
São Roque de Minas	2,24	2,32	3,11	3,00	3,71	2,28	4,94	5,26
São Simão	2,05	2,13	2,89	2,76	3,62	2,04	4,79	5,17
Vargem Bonita	1,92	2,01	2,79	2,69	3,39	1,96	4,63	4,94

Em todos os municípios, os meses de maio/junho e outubro/novembro foram os que apresentaram as maiores diferenças entre o *baseline* (ETA/CPTEC 60-90) e os dados dos cenários futuros. Isso ocorreu tanto no início quanto no final do século. A Figura 21 apresenta o exemplo da cidade de Mococa, SP.

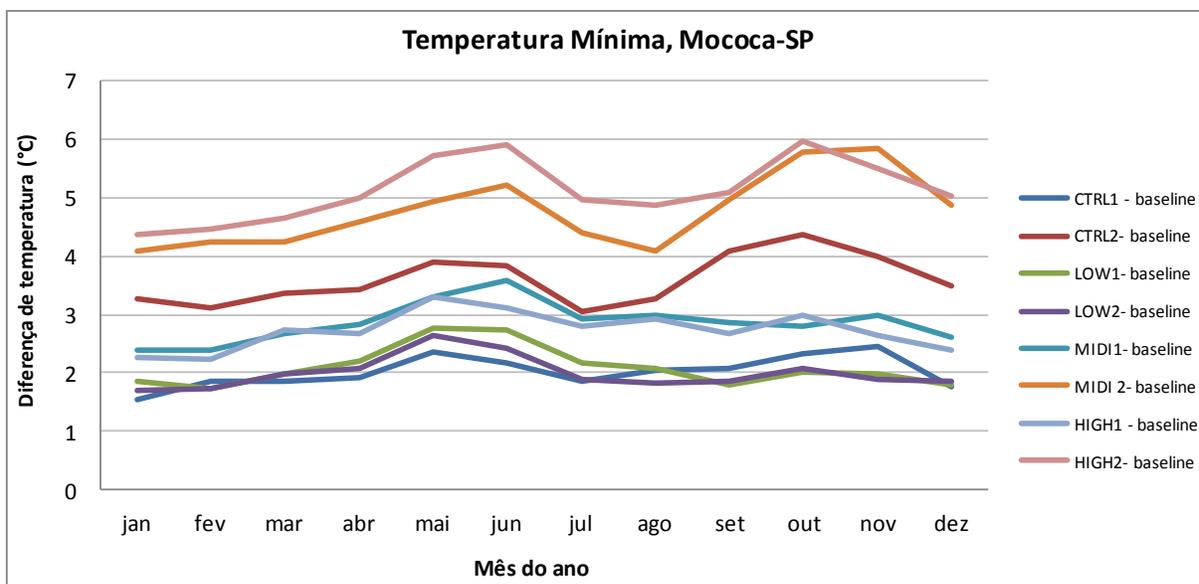


Figura 21 – Diferença mensal entre os dados do *baseline* do modelo (ETA 60-90) e dos cenários futuros da primeira e segunda metades do século para a cidade de Mococa, SP.

A temperatura média segue a mesma tendência das temperaturas máxima e mínima. A diferença entre os dados do *baseline* do modelo e os dados dos cenários futuros do início e final do século encontram-se na Tabela 7. A maior diferença foi na cidade de São Roque de Minas, seguindo a tendência da temperatura máxima e mínima. Nessa cidade, o modelo aponta que, em média, no início do século, a temperatura média poderá subir 3,41°C no cenário de média emissão de gases de efeito estufa (*midi*). São Carlos, São Simão e Guaxupé poderão subir 3,01°C, 2,95°C e 2,91°C, respectivamente, também no cenário *midi*.

Para o final do século, o cenário de alta emissão de gases de efeito estufa (*high*) estima que a temperatura média poderá aumentar em, até, 5,7°C, em São Roque de Minas, seguido de São Simão, Vargem Bonita, Franca e Guaxupé, que poderão aumentar 5,3°C. Os maiores aumentos foram constatados nos meses de maio/junho e nos meses de setembro/outubro/novembro (Figura 22).

Tabela 7 – Diferença entre os dados do *baseline* do modelo e os dados futuros do início e final do século para os dez municípios estudadas.

Temperatura Média								
Cidade	Início do Século (2011-2055)				Final do Século (2056-2099)			
	CTRL1	LOW1	MIDI1	HIGH1	CTRL2	LOW2	MIDI 2	HIGH2
Franca	1,83	1,95	2,83	2,53	3,56	1,80	5,07	5,33
Guaxupé	1,97	2,08	2,93	2,66	3,65	1,95	5,09	5,31
Machado	0,60	0,72	1,49	1,32	2,14	0,61	3,48	3,71
Mococa	1,97	2,06	2,89	2,64	3,64	1,92	5,02	5,25
Piracicaba	1,51	1,75	2,47	2,33	3,18	1,64	4,60	4,89
São Lourenço	0,78	0,70	1,45	1,30	2,29	0,62	3,36	3,61
São Carlos	1,95	2,22	3,01	2,78	3,66	2,08	5,18	5,46
São Roque de Minas	2,34	2,55	3,41	3,16	3,98	2,44	5,50	5,73
São Simão	2,01	2,12	2,95	2,69	3,73	1,98	5,14	5,39
Vargem Bonita	1,96	2,17	3,03	2,79	3,60	2,07	5,12	5,35

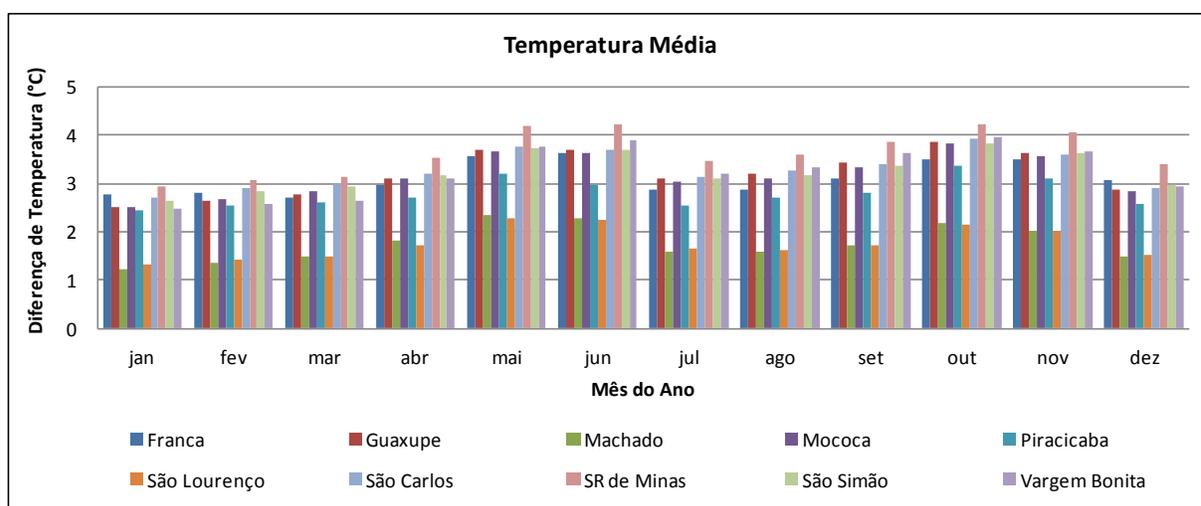


Figura 22 – Diferença mensal entre os dados do *baseline* do modelo e os dados futuros para todos os cenários do início e final do século para os dez municípios estudadas.

O aumento da temperatura média é de extrema importância para as culturas agrícolas, em especial para o café arábica. PEZZOPANE et al. (2008) ressaltam que, dentre os elementos climáticos a serem conhecidos para a produção de café, destaca-se a temperatura do ar, que atua na duração do ciclo reprodutivo, condicionando a época da colheita.

Dentre os processos fisiológicos do ciclo do café arábica que são mais afetados pela temperatura, a florada (CAMARGO, 1985), a maturação dos frutos (PEZZOPANE et al.,

2008) e o crescimento vegetativo (DAMATTA et al., 2007a) ganham destaque. DAMATTA et al. (2007) ressalta que temperaturas médias acima de 23°C aceleram o desenvolvimento e o amadurecimento dos frutos e CAMARGO (1985) destaca a perda de qualidade nos frutos maturados acima dessa temperatura. DAMATTA et al. (2007a) ressalta que em Viçosa, MG, foi observada uma queda temporária no crescimento vegetativo durante a época ativa de crescimento dos ramos, e esse fator estava associado, principalmente, ao aumento das temperaturas.

Além disso, a temperatura média influencia o balanço hídrico, determinando, em parte, a disponibilidade de água para as plantas. As fases fenológicas do cafeeiro ocorrem com uma quantidade mínima de água no solo. DAMATTA et al. (2007) ressalta que um período seco, que dure entre dois e quatro meses, seguido de um “choque hídrico” são importantes para estimular a florada. O mesmo autor coloca que quando as taxas de crescimento vegetativo do cafeeiro diminuem por problemas climáticos (como temperaturas baixas, por exemplo) a disponibilidade de água parece ser o fator decisivo para a retomada do crescimento. Assim, o aumento da temperatura média e a mudança da quantidade de água no solo podem causar danos sérios à produção cafeeira.

Precipitação e Balanço Hídrico

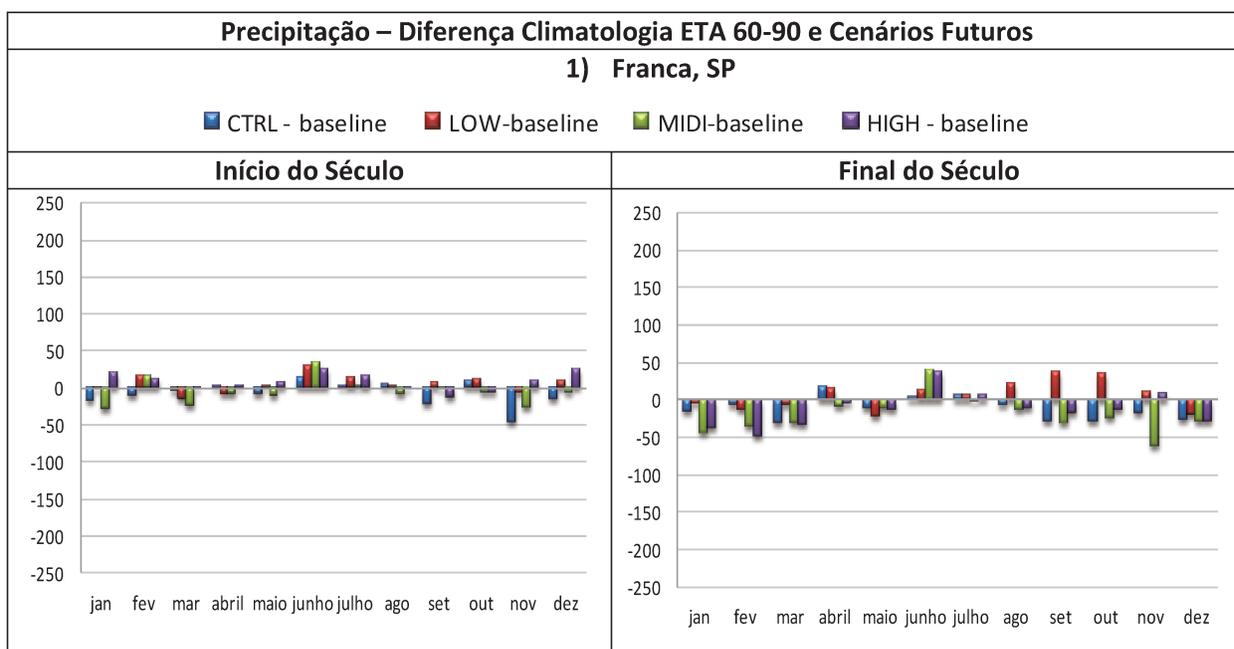
A Figura 23 apresenta a diferença de precipitação entre o *baseline* do modelo ETA/CPTEC e os dados dos cenários futuros, para todos os municípios, no início e final do século. A precipitação não apresenta uma tendência clara entre os municípios estudados. O único fator que pode ser observado em comum é que, no mês de junho, a diferença entre a precipitação do *baseline* do modelo e a precipitação dos cenários futuros aumenta na primeira metade e no final do século.

No início do século, São Lourenço e Mococa são os municípios que apresentaram maior dispersão nos dados. Enquanto a primeira estima um aumento de chuva em todos os meses, a segunda estima decréscimo de até 150 mm em todos os meses (exceção feita ao mês de junho). Mococa não segue a mesma tendência para os cenários no final do século, ao contrário de São Lourenço, que continua a seguir a tendência.

O cenário *control (ctrl)*, na primeira metade do século, estima uma queda na precipitação para os meses de setembro, outubro e novembro (SON). Já, no final do século,

esse mesmo cenário estima um decréscimo na precipitação a partir do mês de julho. O cenário *low*, tanto no início quanto no final do século, estima um aumento na precipitação (exceção feita à cidade de São Lourenço). Já os cenários *midi* e *high*, assim como o *control*, estimam queda de precipitação nos meses de setembro, outubro e novembro, no final do século. O mesmo não ocorre na primeira metade do século.

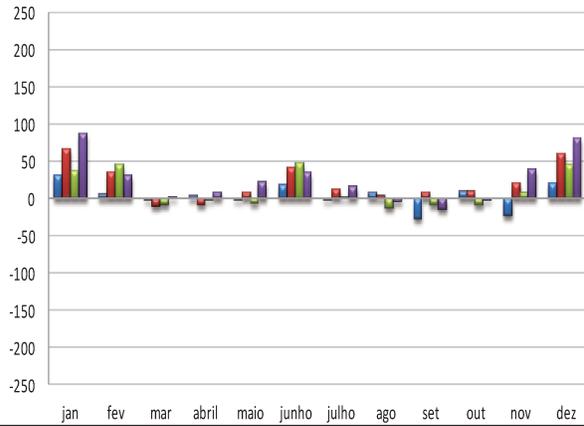
No início e final do século, exceção feita a São Lourenço e Franca, os municípios apresentaram maior quantidade de precipitação nos meses de janeiro, fevereiro e março. DAMATTA (2007) destaca que o excesso de chuvas durante o ano normalmente é prejudicial para a cultura do café, uma vez que resulta em uma colheita dispersa e com rendimentos baixos. A falta de um período seco também pode limitar o cultivo do cafeeiro em regiões tropicais (MAESTRI e BARROS, 1977).



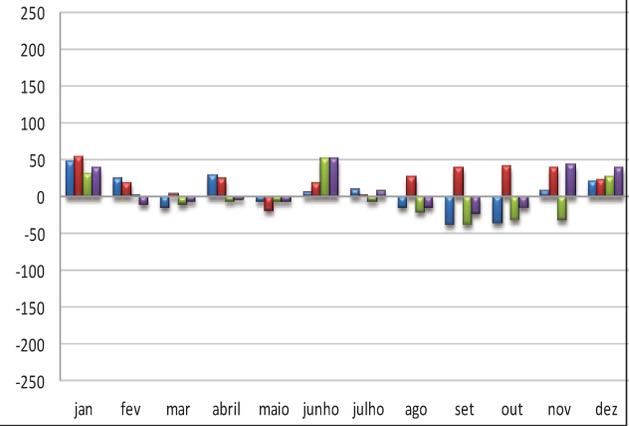
2-) Guaxupé, MG

■ CTRL - baseline ■ LOW-baseline ■ MIDI-baseline ■ HIGH - baseline

Início do Século



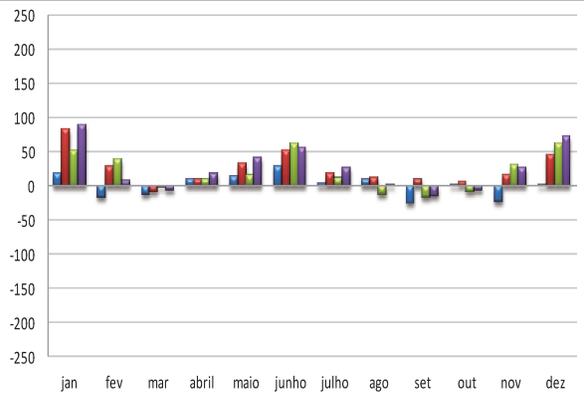
Final do Século



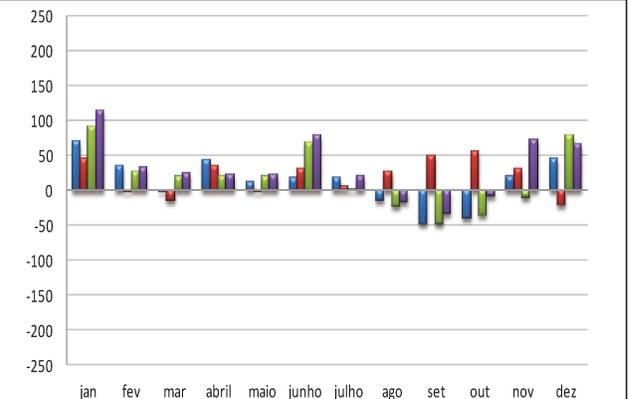
3-) Machado, MG

■ CTRL - baseline ■ LOW-baseline ■ MIDI-baseline ■ HIGH - baseline

Início do Século



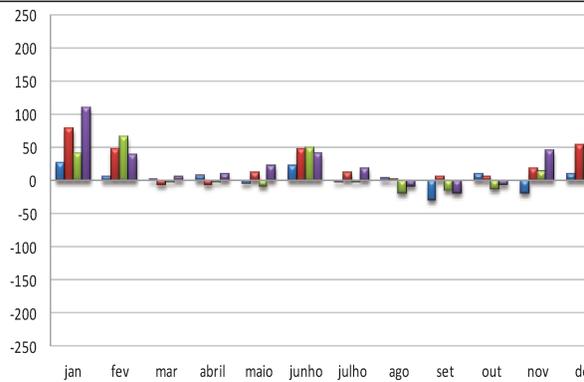
Final do Século



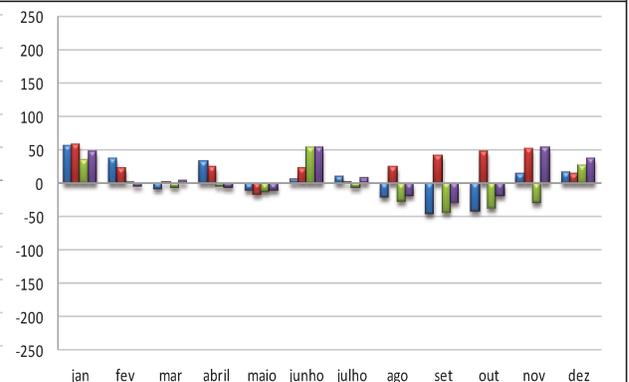
4-) Mococa

■ CTRL - baseline ■ LOW-baseline ■ MIDI-baseline ■ HIGH - baseline

Início do Século



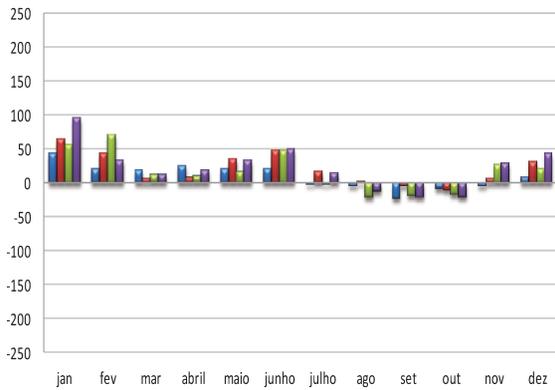
Final do Século



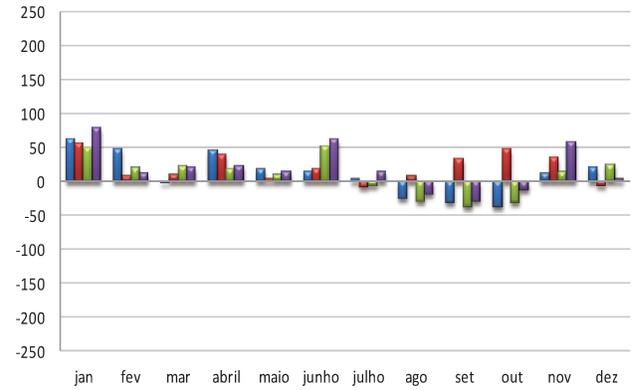
5-) Piracicaba, SP

■ CTRL - baseline ■ LOW-baseline ■ MIDI-baseline ■ HIGH - baseline

Início do Século



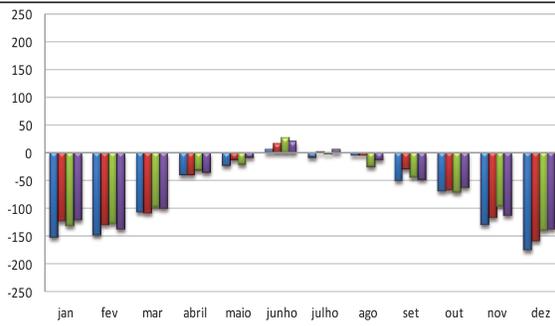
Final do Século



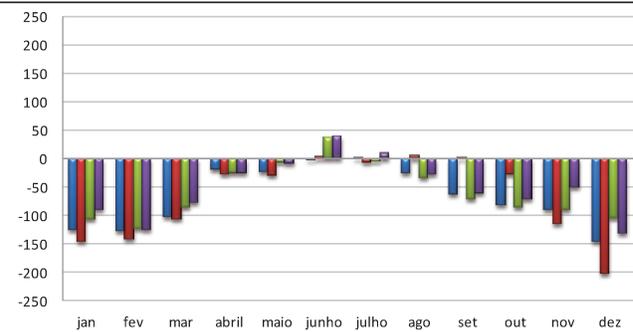
6-) São Lourenço, MG

■ CTRL - baseline ■ LOW-baseline ■ MIDI-baseline ■ HIGH - baseline

Início do Século



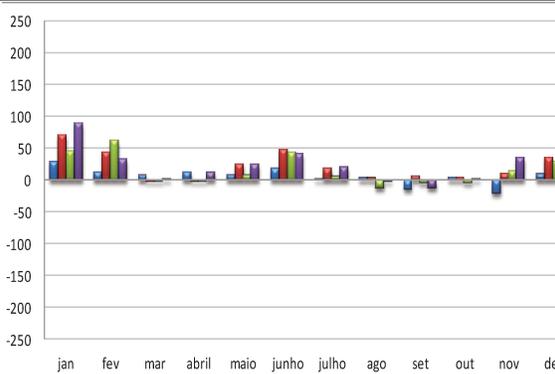
Final do Século



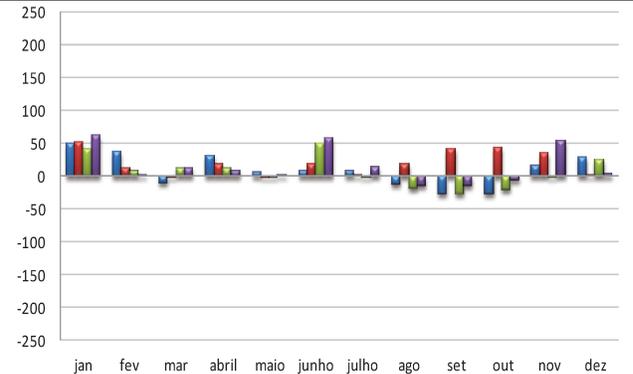
7-) São Carlos, SP

■ CTRL - baseline ■ LOW-baseline ■ MIDI-baseline ■ HIGH - baseline

Início do Século



Final do Século



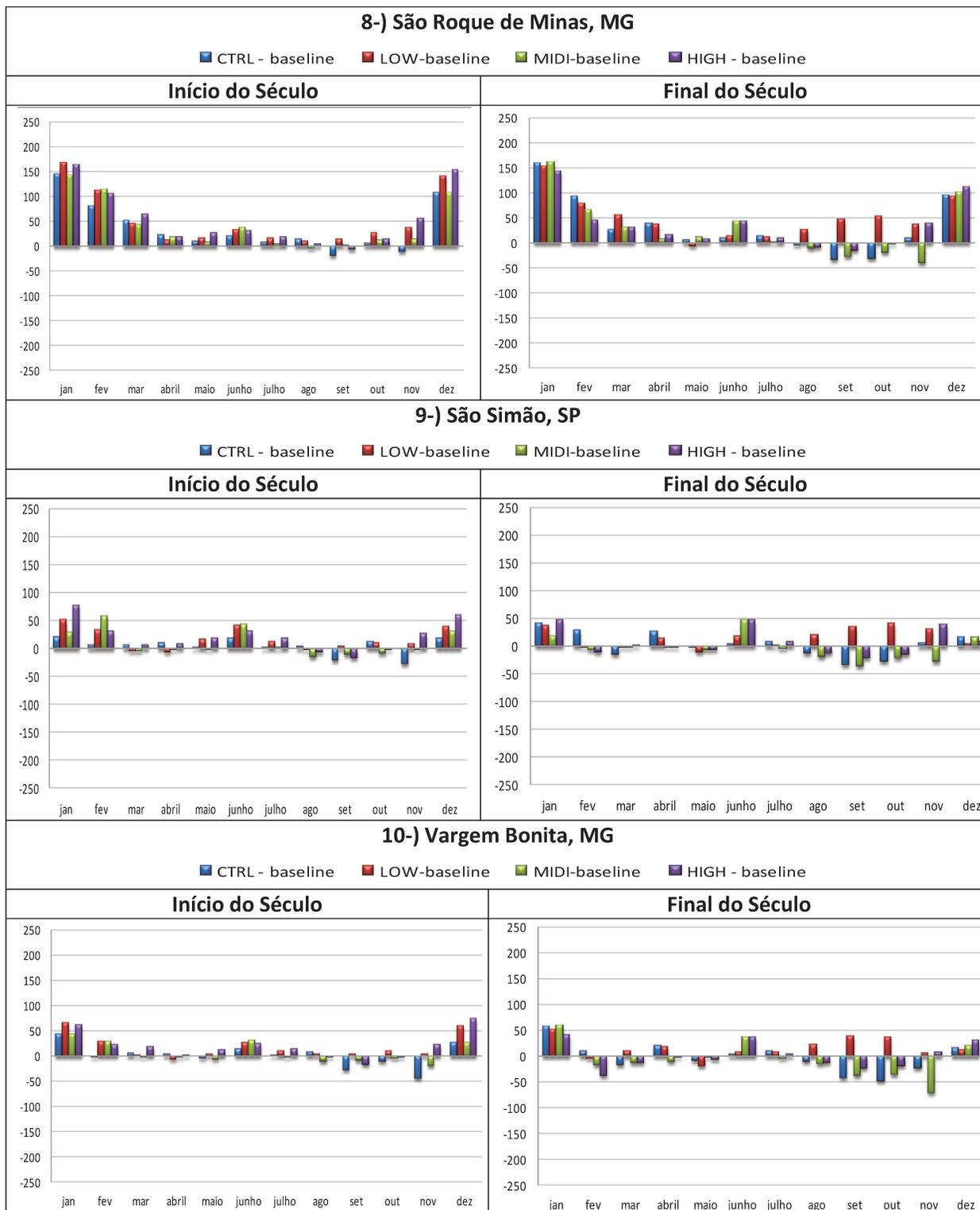


Figura 23- Diferença de precipitação entre o *baseline* do modelo ETA/CPTEC e os cenários futuros, para todos os municípios, no início e final do século. Cenário *control*, em azul, cenário *low*, em vermelho, cenário *medi*, em verde e cenário *high*, em roxo.

A Figura 24 apresenta o balanço hídrico dos dez municípios nos cenários futuros. É possível verificar que, em seis dos dez municípios estudadas, há um deslocamento do déficit hídrico, que passará a começar antecipadamente, em relação aos dados do *baseline* do modelo, no mês de abril. Em quatro municípios, no final do século, o déficit hídrico se estenderá até novembro. Por outro lado, sete, dos dez municípios estudados, passarão a apresentar excedente hídrico no mês de junho, diferente do que ocorre nos dados do *baseline*.

Cidade/Período	Cenário	Mês											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Franca, SP 2011-2055	ETA	216,17	153,02	75,65	-0,17	-0,73	-5,33	-16,80	-33,59	-41,31	0,00	64,36	190,40
	CTRL 1	180,60	123,73	57,23	-1,09	-7,34	-8,31	-24,15	-47,32	-95,99	0,00	1,51	147,35
	LOW 1	191,45	150,30	43,00	-4,23	-8,87	-5,76	-21,63	-50,56	-66,65	0,00	51,42	174,81
	MIDI 1	156,61	141,12	22,12	-5,93	-17,19	-8,31	-38,90	-78,13	-90,99	0,00	0,00	198,60
	HIGH 1	210,60	140,94	47,50	-2,51	-6,89	-7,03	-21,30	-61,75	-93,04	0,00	37,20	241,26
2056-2099	CTRL 2	214,59	106,87	33,51	-1,73	-14,56	-22,93	-33,81	-78,28	-126,47	-18,44	0,00	165,33
	LOW 2	189,63	120,35	51,61	-0,19	-10,50	-10,85	-25,22	-33,43	-40,28	0,00	100,95	146,62
	MIDI 2	180,80	67,60	24,88	-21,19	-42,34	-18,50	-61,32	-130,71	-143,38	-20,41	0,00	99,02
	HIGH 2	187,04	52,33	20,16	-20,35	-67,76	-29,87	-65,51	-138,27	-129,43	-9,76	0,00	171,97
Guaxupé, MG 2011-2055	ETA	190,49	148,94	93,17	16,36	8,27	-0,58	-4,72	-11,83	-7,76	3,75	160,70	196,27
	CTRL 1	209,97	140,43	77,95	8,66	-0,09	-0,11	-5,65	-14,97	-40,84	0,00	87,52	198,26
	LOW 1	240,64	170,33	66,41	-0,35	-0,09	4,16	-2,06	-13,56	-13,66	4,95	157,56	240,23
	MIDI 1	205,27	174,74	60,15	-0,20	-2,52	0,00	-7,92	-34,95	-53,33	0,00	107,41	212,48
	HIGH 1	257,68	161,41	71,51	5,01	8,51	7,13	-1,99	-20,59	-48,56	0,00	128,56	253,68
2056-2099	CTRL 2	201,69	143,59	45,23	19,28	-1,89	-5,90	-10,92	-43,36	-93,70	0,00	50,11	232,01
	LOW 2	231,32	153,50	80,17	25,02	-2,62	-1,27	-10,11	-8,66	0,00	44,39	179,65	202,36
	MIDI 2	232,55	102,99	62,51	-5,29	-13,11	0,00	-28,24	-66,21	-110,62	0,00	0,00	217,26
	HIGH 2	239,48	89,32	62,81	-9,24	-20,74	0,00	-30,11	-75,69	-99,60	0,00	82,05	241,32
Machado, MG 2011-2055	ETA	161,97	137	86,186	16,77	8,747684	-0,26	-1,7889	-2,446	0	110,6	206,37	208,45
	CTRL 1	181,13	117,4	72,454	24,91	18,31511	17,88	-0,4576	-0,4182	-1,14165	93,18	174,371	208,12
	LOW 1	242,46	163,5	73,811	20,81	33,26863	38,55	0,9678	-0,0113	29,43196	122,3	219,569	252,73
	MIDI 1	210,11	172	77,981	19,96	14,62623	45,69	-0,3135	-5,4896	-0,75248	63,71	227,349	264,46
	HIGH 1	247,98	141,6	73,62	28,5	39,66706	41,79	6,455	-0,9496	0	86,99	226,534	276,7
2056-2099	CTRL 2	222,18	164,9	73,917	50,85	11,67306	1,826	1,0897	-3,7871	-15,3469	0	204,73	242,09
	LOW 2	205,85	132,7	68,198	48,64	1,744574	18,03	-0,4222	4,879	69,93091	171	235,948	184,76
	MIDI 2	237,75	147,8	89,928	19,79	13,05992	48,1	-1,5844	-12,551	-27,7223	0	115,77	263,27
	HIGH 2	259,38	151,8	91,56	18,74	11,3464	53,63	-0,0973	-8,1434	-15,2627	5,22	244,96	250,12
Mococa, SP 2011-2055	ETA	226,94	171	107,35	27,53	22,29101	-0,06	-2,1196	-6,763	-3,22144	32,4	172,403	223,97
	CTRL 1	241,26	161	92,094	21,14	4,515292	10,18	-2,8814	-11,394	-44,8621	0	148,025	214,5
	LOW 1	287,26	201,7	81,07	1,763	16,39615	29,77	-1,21	-10,454	-9,63605	22,79	165,466	258,49
	MIDI 1	242,83	214,3	77,217	1,068	-0,38366	16,96	-4,5786	-30,194	-50,4248	0	138,975	239,45
	HIGH 1	315,85	189,5	86,201	16,56	22,32154	22,77	-0,8441	-17,017	-43,3528	0	190,56	278,23
2056-2099	CTRL 2	242,01	174,8	60,199	30,59	-0,70216	-2,85	-6,3192	-37,824	-89,0561	0	81,1371	257,93
	LOW 2	268,35	178	90,586	35,88	-0,65069	0	-3,9306	-3,6712	0	98,29	202,311	219,49
	MIDI 2	275,08	125,5	80,384	-5,42	-10,5069	0	-20,735	-61,034	-106,241	0	15,3151	260,86
	HIGH 2	286,71	117,4	87,395	-6,96	-15,0712	0	-20,203	-88,023	-96,8748	0	118,645	270,56

Cidade/Período		Mês											
		Cenário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Piracicaba, SP 2011-2055	ETA	100,4	94,3	48,12	-0,016	5,321	-0,004	-0,896	-4,331	-4,537	9,862	90,69	109
	CTRL 1	129	94,85	52,11	13,26	16,52	13,76	-1,847	-10,01	-27,13	0	53,16	97,32
	LOW 1	142,4	118,8	33,26	0	13,57	35,77	-0,124	-5,876	-12,1	0	58,5	119,4
	MIDI 1	191,3	140	32,41	-0,812	0	18,08	-3,223	-24,8	-52,89	0	50,06	163,4
	HIGH 1	167,8	102	32,26	-0,042	16,46	37,52	-0,443	-15,54	-47,94	0	54,87	186,6
2056-2099	CTRL 2	191,2	111,1	36,79	17,95	1,362	-0,034	-2,348	-27,66	-70,06	-1,93	0	152,3
	LOW 2	135,3	84,72	37,21	21,66	-0,095	4,442	-3,32	-7,775	0	56,78	104,4	83,37
	MIDI 2	176,2	71,9	53,99	-6,779	-7,356	0	-13,81	-57,08	-100,2	-4,197	0	129,2
	HIGH 2	202,2	62,69	51,38	-7,587	-10,3	0	-7,236	-70,8	-94,06	0	33,25	134,1
Cidade/Período		Mês											
		Cenário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
São Lourenço, MG 2011-2055	ETA	206,96	188,37	123,52	30,77	17,84	0,91	-0,16	0,00	51,93	161,01	246,97	264,73
	CTRL 1	55,04	38,29	14,12	-0,47	-1,14	0,00	-2,81	-0,75	-0,47	53,17	108,98	86,92
	LOW 1	80,81	56,50	11,98	-0,55	-0,06	0,39	-0,16	-0,17	16,70	90,90	126,88	105,27
	MIDI 1	71,06	55,19	20,60	-0,13	-0,99	4,11	-0,73	-4,86	0,00	53,04	141,90	120,13
	HIGH 1	82,22	46,65	16,84	-0,29	0,00	8,00	-0,09	-1,23	0,00	73,22	127,55	122,37
2056-2099	CTRL 2	72,52	52,62	14,15	3,42	-0,89	-0,97	-1,65	-8,60	-10,47	0,00	137,50	107,83
	LOW 2	59,90	45,72	14,06	0,00	-1,17	0,00	-2,49	0,00	36,64	130,46	131,42	59,76
	MIDI 2	86,70	49,84	25,28	-0,30	-0,17	16,69	-1,27	-9,29	-16,31	0,00	101,33	140,83
	HIGH 2	100,77	47,43	29,57	-0,46	-0,82	9,85	-0,12	-5,82	-8,28	5,86	170,17	111,29
Cidade/Período		Mês											
		Cenário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
São Carlos, SP 2011-2055	ETA	120,6	100,6	59,8	8,53	5,314	-0,226	-3,487	-10,63	-13,04	0	83,21	129,8
	CTRL 1	132,8	93,43	51,08	8,80	1,229	1,784	-3,168	-13,54	-37,46	0	38,6	116,2
	LOW 1	170,3	124,6	34,23	-0,64	0	23,37	-1,279	-12,9	-21,3	0	58,32	145
	MIDI 1	136,8	136,8	29,71	-1,16	-1,959	0	-7,083	-34,38	-59,63	0	40,27	124
	HIGH 1	185,3	109	33,16	-0,01	6,374	19,24	-1,293	-20,64	-56,57	0	76,63	149
2056-2099	CTRL 2	190,2	100,6	8,709	11,77	-0,663	-2,823	-8,516	-38,57	-90,08	-5,585	0,373	178
	LOW 2	152,1	94,3	36,05	9,20	-0,951	-0,008	-7,505	-11,93	-3,941	16,83	116,8	110,2
	MIDI 2	178	60,3	49,84	-6,69	-14,25	0	-26,55	-70,21	-113,3	-7,391	0	129,9
	HIGH 2	195,7	51,69	47,94	-9,45	-19,7	0	-22,08	-96,25	-102,3	0	26,76	146,5
Cidade/Período		Mês											
		Cenário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
São Roque de Minas, MG 2011-2055	ETA	112,1	118,3	64,99	-0,04	-1,65	-6,52	-15,3	-23,19	-13,58	0	144	152,8
	CTRL 1	244,9	185,3	101,3	5,53	-1,79	-3,15	-12,92	-21,88	-42,8	0	66,48	239,6
	LOW 1	262,8	215,8	94,36	-0,33	-2,80	-2,08	-11,24	-24,94	-19,18	0	155,4	275,8
	MIDI 1	234,2	210,6	82,67	-0,20	-5,30	-2,67	-21,58	-46,07	-44,43	0	94,62	231
	HIGH 1	255,4	206,5	106,4	-0,13	-1,50	-2,44	-10,21	-30,93	-43,17	0	155,4	283,1
2056-2099	CTRL 2	239,4	183	62,69	9,49	-4,42	-11,67	-17,29	-45,13	-96,45	0	45,6	206,3
	LOW 2	251	182,6	103,5	16,49	-6,13	-8,74	-15,9	-16,48	0	7,664	185,7	227,4
	MIDI 2	226,2	141	50,57	-5,67	-16,71	-7,10	-37,92	-67,33	-110,3	0	0	230,2
	HIGH 2	204,7	117,5	43,68	-4,58	-21,85	-11,32	-38,35	-75,8	-99,1	0	79,02	262,5
Cidade/Período		Mês											
		Cenário	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
São Simão, SP 2011-2055	ETA	169,8	135,1	73,23	8,61	3,805	-0,571	-5,26	-14,21	-17,12	0	76,91	152,9
	CTRL 1	173,2	121	62,86	3,91	-0,253	-0,23	-7,05	-21,56	-64,52	0	32,8	146,4
	LOW 1	199,9	148,7	46,6	-1,32	0	0	-3,028	-19,17	-39,28	0	84,52	170,3
	MIDI 1	168,1	165,8	37,97	-1,34	-4,996	0	-13,93	-47,19	-72,76	0	21,62	208,3
	HIGH 1	221,1	141,7	49,1	-0,13	0	0	-2,593	-26,77	-64,87	0	68,71	181,1
2056-2099	CTRL 2	231,4	127,4	44,54	3,96	-2,595	-7,737	-14,53	-51,1	-106,9	-10,15	0	186,1
	LOW 2	187,2	116	51,02	5,73	-2,412	-1,327	-11,25	-15,23	-20,53	0	143,4	134,4
	MIDI 2	203,2	79,23	50,93	-11,45	-21,68	0	-38,69	-81,61	-126,2	-11,68	0	131,5
	HIGH 2	231,1	74,5	50,89	-12,87	-28,71	-2,534	-37,57	-112,5	-115,1	-5,255	15,21	173,3

Cidade/Período	Cenário	Mês											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vargem Bonita, MG 2011-2055	ETA	210	198,5	105,8	12,535	-0,125	-2,576	-9,674	-17,2	-7,066	3,488	198,5	229,6
	CTRL 1	244,9	185,3	101,3	5,530	-1,787	-3,155	-12,92	-21,88	-42,8	0	66,48	239,6
	LOW 1	262,8	215,8	94,36	-0,327	-2,805	-2,077	-11,24	-24,94	-19,18	0	155,4	275,8
	MIDI 1	234,2	210,6	82,67	-0,205	-5,297	-2,671	-21,58	-46,07	-44,43	0	94,62	231
	HIGH 1	255,4	206,5	106,4	-0,132	-1,499	-2,436	-10,21	-30,93	-43,17	0	155,4	283,1
2056-2099	CTRL 2	239,4	183	62,69	9,489	-4,421	-11,67	-17,29	-45,13	-96,45	0	45,6	206,3
	LOW 2	251	182,6	103,5	16,489	-6,134	-8,737	-15,9	-16,48	0	7,664	185,7	227,4
	MIDI 2	226,2	141	50,57	-5,670	-16,71	-7,099	-37,92	-67,33	-110,3	0	0	230,2
	HIGH 2	204,7	117,5	43,68	-4,577	-21,85	-11,32	-38,35	-75,8	-99,1	0	79,02	262,5

Figura 24- Balanço Hídrico dos municípios estudadas nos cenários futuros, no início e final do século. Armazenamento de água no solo em milímetros. Déficit hídrico destacado em vermelho.

4.1.c) Aptidão climática do Café Arábica nos cenários futuros

De acordo com as necessidades hídricas e térmicas para o cultivo do café arábica, verificou-se que, exceção feita aos municípios de Machado, MG e São Lourenço, MG, os demais municípios tenderão a se tornar de alto risco climático para a cultura, principalmente por restrições térmicas que hídricas.

Na primeira metade do século, oito dos dez municípios estudadas, apresentarão risco térmico nos cenários de maior emissão de gases de efeito estufa (*midi* e *high*) e cinco apresentarão já nos cenários *control* e *low*. Os municípios de Guaxupé, São Roque de Minas e Vargem Bonita, nos cenários de menor emissão de gases de efeito estufa, passarão a ser consideradas como marginal superior, ou seja, com temperaturas médias anuais acima de 23°C, que já podem apresentar risco à produção do café arábica.

A restrição hídrica, na primeira metade do século, ocorrerá apenas nos municípios de Franca e Guaxupé, que passarão a necessitar de irrigação para a produção do café nos cenários de maior emissão de gases de efeito estufa: *midi* para Franca e *high* para Guaxupé. Os demais municípios não apresentarão risco climático por inadequação hídrica nessa fase.

A partir de 2056, exceção feita a Machado e São Lourenço, todos os municípios apresentarão alto risco climático por temperaturas elevadas nos cenários *control*, *midi* e *high*. Já no cenário *low*, Guaxupé, São Roque de Minas e Vargem Bonita foram classificadas como

“marginal superior”, com temperaturas médias anuais acima de 23°C. Os demais municípios no cenário *low* também apresentaram alto risco climático por temperaturas elevadas.

A restrição hídrica, na segunda metade do século, poderá ocorrer em sete dos dez municípios estudados. Machado, São Roque de Minas e Piracicaba não necessitariam de irrigação para o cultivo do café arábica nos cenários futuros. Os demais municípios apresentaram necessidade de irrigação nos cenários de maior emissão de gases de efeito estufa (*high* e *mid*). Já os cenários *low* e *control* foram classificados como “marginal” ou “baixo risco climático”, indicando que não haveria necessidade de irrigação.

Nenhum município nos cenários estudados apresentou alto risco climático por temperaturas baixas. A Tabela 8 apresenta os resultados das aptidões térmica e hídrica, para cada cidade estudada, em cada um dos cenários.

Tabela 8 – Aptidão climática para o cultivo do café arábica nos municípios estudados, nos cenários futuros, no início e final do século. Temperatura média anual em graus celsius e deficiência hídrica em milímetros.

1-) Franca, SP					
Ano	Cenário	Tmed Anual (°C)	Def. Hídrica Anual (mm)	Aptidão Térmica	Aptidão Hídrica
2011-2055	CTRL 1	25,2	-184,2	alto risco climático por calor	marginal
	LOW 1	25,3	-157,7	alto risco climático por calor	marginal
	MIDI 1	26,2	-239,5	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação
	HIGH 1	25,9	-192,5	alto risco climático por calor	marginal
2056-2099	CTRL 2	26,9	-296,2	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação
	LOW 2	25,2	-120,5	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	MIDI 2	28,4	-437,9	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação
	HIGH 2	28,7	-461,0	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação
2-) Guaxupé, MG					
Ano	Cenário	Tmed Anual (°C)	Def. Hídrica Anual (mm)	Aptidão Térmica	Aptidão Hídrica
2011-2055	CTRL 1	23,8	-61,7	marginal superior	baixo risco climático
	LOW 1	23,9	-29,7	marginal superior	baixo risco climático
	MIDI 1	24,8	-98,9	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	HIGH 1	24,5	-235,4	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação
2056-2099	CTRL 2	25,5	-155,8	alto risco climático por calor	marginal
	LOW 2	23,8	-22,7	marginal superior	baixo risco climático
	MIDI 2	26,9	-223,5	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação
	HIGH 2	27,2	-235,4	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação

3-) Machado, MG					
Ano	Cenário	Tmed Anual (°C)	Def. Hídrica Anual (mm)	Aptidão Térmica	Aptidão Hídrica
2011-2055	CTRL 1	19,7	-2,0	baixo risco climático	baixo risco climático
	LOW 1	19,8	0,0	baixo risco climático	baixo risco climático
	MIDI 1	20,6	-6,6	baixo risco climático	baixo risco climático
	HIGH 1	20,4	-0,9	baixo risco climático	baixo risco climático
2056-2099	CTRL 2	21,3	-19,1	baixo risco climático	baixo risco climático
	LOW 2	19,7	-0,4	baixo risco climático	baixo risco climático
	MIDI 2	22,6	-41,9	baixo risco climático	baixo risco climático
	HIGH 2	22,8	-23,5	baixo risco climático	baixo risco climático
4-) Mococa, SP					
Ano	Cenário	Tmed Anual (°C)	Def. Hídrica Anual (mm)	Aptidão Térmica	Aptidão Hídrica
2011-2055	CTRL 1	24,2	0,0	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	LOW 1	24,3	-21,3	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	MIDI 1	25,1	-85,6	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	HIGH 1	24,9	-61,2	alto risco climático por calor	baixo risco climático
2056-2099	CTRL 2	25,9	-136,8	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	LOW 2	24,2	-8,3	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	MIDI 2	27,3	-203,9	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação
	HIGH 2	27,5	-227,1	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação
5-) Piracicaba, SP					
Ano	Cenário	Tmed Anual (°C)	Def. Hídrica Anual (mm)	Aptidão Térmica	Aptidão Hídrica
2011-2055	CTRL 1	24,4	-39,0	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	LOW 1	24,7	-18,8	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	MIDI 1	25,4	-81,7	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	HIGH 1	25,3	-64,0	alto risco climático por calor	baixo risco climático
2056-2099	CTRL 2	26,1	-102,0	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	LOW 2	24,6	-11,2	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	MIDI 2	27,5	-189,4	alto risco climático por calor	marginal
	HIGH 2	27,8	-190,0	alto risco climático por calor	marginal
6-) São Lourenço, MG					
Ano	Cenário	Tmed Anual (°C)	Def. Hídrica Anual (mm)	Aptidão Térmica	Aptidão Hídrica
2011-2055	CTRL 1	18,8	-5,6	baixo risco climático	baixo risco climático
	LOW 1	18,7	-0,9	baixo risco climático	baixo risco climático
	MIDI 1	19,5	-6,7	baixo risco climático	baixo risco climático
	HIGH 1	19,3	-1,6	baixo risco climático	baixo risco climático
2056-2099	CTRL 2	20,3	-22,6	baixo risco climático	baixo risco climático
	LOW 2	18,6	-3,7	baixo risco climático	baixo risco climático
	MIDI 2	21,4	-27,4	baixo risco climático	baixo risco climático
	HIGH 2	21,6	-15,5	baixo risco climático	baixo risco climático
7-) São Carlos, SP					
Ano	Cenário	Tmed Anual (°C)	Def. Hídrica Anual (mm)	Aptidão Térmica	Aptidão Hídrica
2011-2055	CTRL 1	24,3	-54,2	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	LOW 1	24,6	-36,1	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	MIDI 1	25,3	-104,2	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	HIGH 1	25,1	-78,5	alto risco climático por calor	baixo risco climático
2056-2099	CTRL 2	26,0	-146,2	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	LOW 2	24,4	-24,3	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	MIDI 2	27,5	-238,4	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação
	HIGH 2	27,8	-249,8	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação

8-) São Roque de Minas					
Ano	Cenário	Tmed Anual (°C)	Def. Hídrica Anual (mm)	Aptidão Térmica	Aptidão Hídrica
2011-2055	CTRL 1	23,1	-82,5	marginal superior	baixo risco climático
	LOW 1	23,3	-60,6	marginal superior	baixo risco climático
	MIDI 1	24,2	-120,3	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	HIGH 1	24,0	-88,4	marginal superior	baixo risco climático
2056-2099	CTRL 2	24,8	-175,0	alto risco climático por calor	marginal
	LOW 2	23,2	-47,2	marginal superior	baixo risco climático
	MIDI 2	26,3	-245,0	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação
	HIGH 2	26,5	-251,0	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação
9-) São Simão, SP					
Ano	Cenário	Tmed Anual (°C)	Def. Hídrica Anual (mm)	Aptidão Térmica	Aptidão Hídrica
2011-2055	CTRL 1	24,7	-93,6	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	LOW 1	24,8	-62,8	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	MIDI 1	25,6	-140,2	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	HIGH 1	25,3	-94,4	alto risco climático por calor	baixo risco climático
2056-2099	CTRL 2	26,4	-193,0	alto risco climático por calor	marginal
	LOW 2	24,6	-50,8	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	MIDI 2	27,8	-291,3	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação
	HIGH 2	28,1	-314,5	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação
10-) Vargem Bonita, MG					
Ano	Cenário	Tmed Anual (°C)	Def. Hídrica Anual (mm)	Aptidão Térmica	Aptidão Hídrica
2011-2055	CTRL 1	23,1	-82,5	marginal superior	baixo risco climático
	LOW 1	23,3	-60,6	marginal superior	baixo risco climático
	MIDI 1	24,2	-120,3	alto risco climático por calor	baixo risco climático
	HIGH 1	24,0	-88,4	marginal superior	baixo risco climático
2056-2099	CTRL 2	24,8	-175,0	alto risco climático por calor	marginal
	LOW 2	23,2	-47,2	marginal superior	baixo risco climático
	MIDI 2	26,3	-245,0	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação
	HIGH 2	26,5	-251,0	alto risco climático por calor	necessidade de irrigação

4.2. Arborização como uma prática de adaptação da cultura aos cenários climáticos futuros

4.2.1 Avaliações micrometeorológicas em campo de café arborizado e a pleno sol

4.2.1.a.) Radiação e estudo da sombra nos plantios

Os dados medidos em campo, durante os meses de abril a dezembro de 2009, demonstram que, na média geral, a testemunha (a pleno sol) foi a que recebeu maior quantidade de radiação, seguida de SAF1, SAF2 e SAF3. O tratamento SAF1 recebeu uma quantidade de radiação que não diferiu estatisticamente da testemunha. O tratamento SAF2 recebeu, em média, 15,2% a menos de radiação que a testemunha, enquanto que o tratamento SAF3 recebeu, em média, 29,47% a menos que a testemunha. SAF2 e SAF3 diferem estatisticamente de SAF1 e da testemunha, conforme apresentado na Tabela 9. Na média

horária, o mesmo ocorreu, ou seja, a testemunha recebeu mais radiação, seguida de SAF1, SAF2 e SAF3. A Figura 25 apresenta a média da radiação horária (em 25a) e a média geral recebida em cada tratamento (em 25b).

Tabela 9- Comparação de médias com o teste t de Student. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.

Tratamento	Diferença Estatística	Média Radiação Solar (W/m ²)
Testemunha (sol)	a	204,8
SAF1	a	202,7
SAF2	b	173,7
SAF3	c	144,5

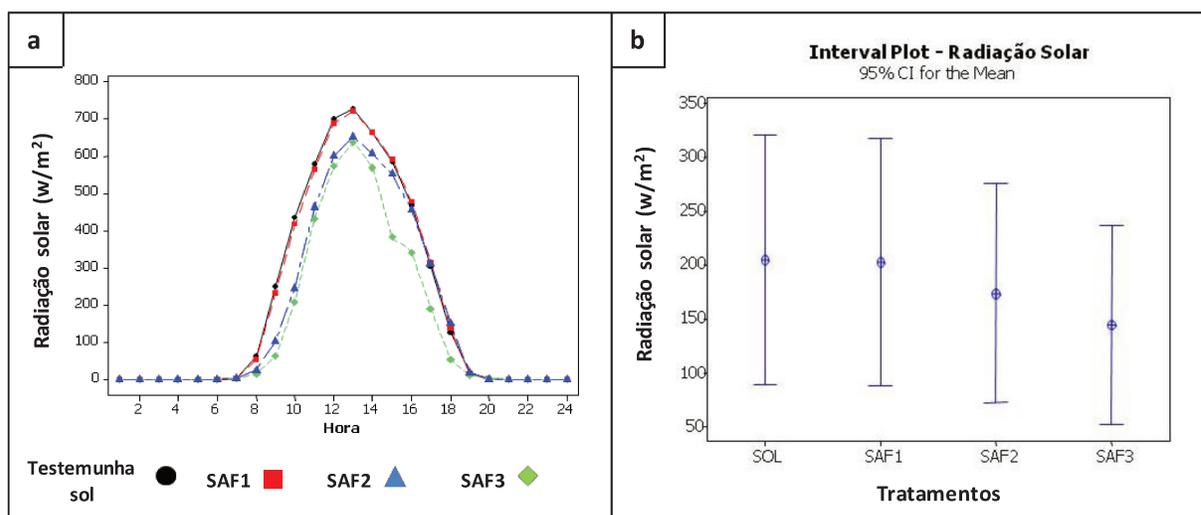


Figura 25 – Quantidade de radiação recebida (em W/m²) em cada tratamento e na testemunha (a pleno sol). Em **a**, média da radiação por hora, e em **b** média geral da radiação recebida. Em a: preto é a testemunha (sol); vermelho é SAF1; azul é SAF2 e verde SAF3.

Estudos da estrutura e dinâmica de sistemas agroflorestais têm mostrado a importância do sombreamento para melhorar as condições microclimáticas para as plantas de café, além de melhorarem as condições do solo, incrementando a quantidade de matéria orgânica, a fixação de nutrientes e mitigando as perdas de nitrogênio (BARRADAS e FANJUL, 1986; BABBAR e ZAK, 1995; CAMPANHA et al., 2004; MORAES et al., 2006). DAMATTA (2004) ressalta que o sombreamento em cultivos arborizados de café em regiões tropicais deve cobrir cerca de

20% da superfície, pois o excesso de sombreamento pode ser prejudicial à produção dos cafeeiros. MORAES et al. (2006) ressaltam que as plantas sombreadas produzem frutos maiores em virtude da maturação mais lenta, entretanto, emitem menos ramos plagiotrópicos, com número menor de nós por ramo e poucos nós com frutos, o que resulta na redução da produção de café. Nesse sentido, poderia-se esperar que os cafeeiros do sistema SAF3 apresentassem problemas em relação à produtividade de grãos, uma vez que ultrapassa os 20% indicados para arborização. Resultados semelhantes foram encontrados por PEZZOPANE (2010), que ao analisar o microclima de café arborizado com noqueira macadâmia, observou que as linhas de café situadas a 2 metros da cultura da macadâmia apresentaram radiação 20% menor, especialmente aquelas voltadas para o ponto cardinal sudoeste. PEZZOPANE et al. (2011) também verificaram redução de 20 a 29% nas linhas de cafeeiros mais próximas à plantação da essência arborizadora grevilia, no Paraná.

Estudo da sombra nos plantios

As Figuras 26 e 27 apresentam a simulação (realizada no software Envi-Met) da sombra ao longo do dia (nos horários de 9h, 12h, 15h e 17 horas – horário local) dos sistemas de plantio de café (pleno sol, SAF1, SAF2 e SAF3), para 21/06 e 23/09 (solstício de inverno e equinócio de primavera respectivamente). É possível observar que, tanto na época do solstício de inverno, quanto na época do equinócio de primavera, nos horários de 12h e 15h, os sistemas SAF1 e SAF2 não receberam sombra das árvores de arborização, havendo apenas um auto-sombreamento das árvores de café. Já no sistema de plantio SAF3, a maioria das linhas de café já recebe sombra às 12 horas (mais no inverno que na primavera), e, às 15h, as linhas de café ficam completamente sombreadas. Também às 17 horas, o SAF3 está completamente sombreado.

No sistema SAF1, no inverno, as duas primeiras linhas de café (logo na sequência do plantio de feijão guandú) tiveram a radiação direta atenuada às 9h da manhã, não chegando a serem sombreadas. Já na primavera, nesse mesmo horário, apenas a primeira linha de café apresentou essa mesma característica, embora a atenuação da radiação fosse mais expressiva nessa época do ano quando comparada ao inverno. Essa diferença se deve, principalmente, à inclinação solar, que é maior no inverno que na primavera. Resultados semelhantes foram encontrados por PEZZOPANE et al. (2002) ao medir a atenuação da radiação em café arábica

consorciado com coqueiro anão. Os autores verificaram que a atenuação foi maior durante a primavera e menor durante o inverno.

O tratamento SAF2 apresentou a mesma característica de sombras que o SAF1. Nesse caso, às 9h da manhã, as três primeiras linhas de café no solstício de inverno, e as duas primeiras linhas de café no equinócio de primavera, receberam menos radiação quando comparada às demais linhas de café. É importante notar que, no sistema SAF2, no inverno, a radiação atenuada chegou a fazer sombra nas linhas de café. Essa diferença entre os sistemas SAF1 e SAF2 deveu-se, essencialmente, à altura das plantas de arborização, que, no SAF2, eram maiores quando comparadas ao SAF1. Pela manhã, o sistema SAF1 recebeu sombra do feijão guandu, que tinha 2,2 metros de altura. Já o sistema SAF2, no mesmo horário, recebe sombra da leucena, que tinha 5,8 metros de altura.

A descontinuidade da cobertura vegetal em sistemas arborizados, causando diferenças na transmissão da radiação solar em diferentes pontos de cultivo de café arborizado, também foi constatada por FARFAN-VALENCIA et al. (2003) na Colômbia, e por PEZZOPANE et al. (2005) no Brasil, em um sistema consorciado de cafeeiro com banana Prata Anã, em que foram constatadas variações de 35 a 94% na transmissão da radiação solar global.

É interessante notar também que às 9h, 12h e 15h, de ambas as estações, o auto-sombreamento da testemunha foi mais expressivo que a atenuação da radiação dos sistemas SAF1 e SAF2. Nos horários de 12h e 15h, os tratamentos arborizados SAF1 e SAF2 estavam recebendo radiação solar direta, devido à inclinação do sol, fazendo com que nos horários mais quentes do dia, não houvesse sombra na cultura. Às 17 horas, a atenuação da radiação dos sistemas SAF1 e SAF2 foi igual ao do pleno sol, sendo o auto-sombreamento o principal fator atuante.

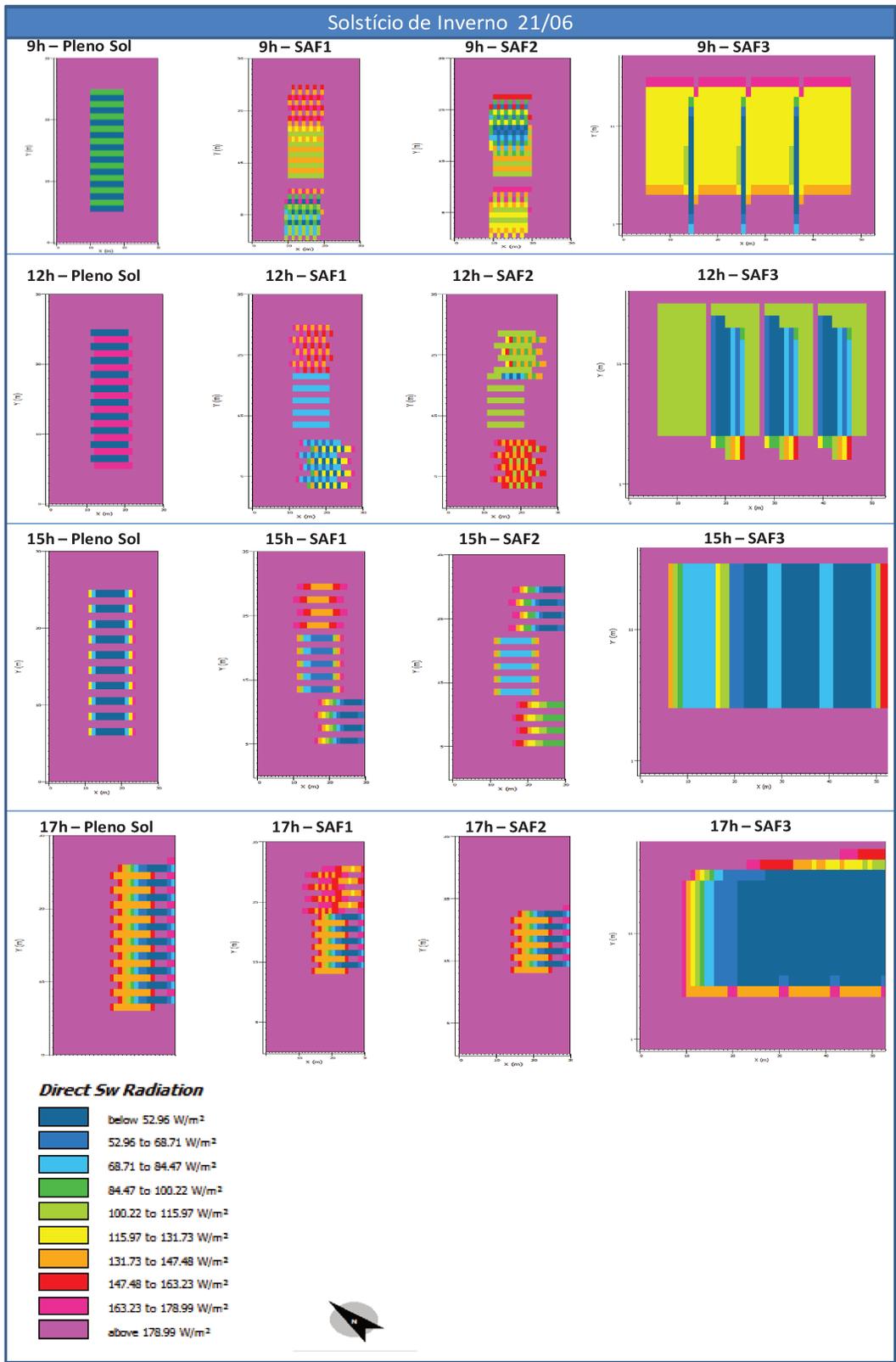


Figura 26- Simulação da sombra nos plantios de café no solstício de inverno

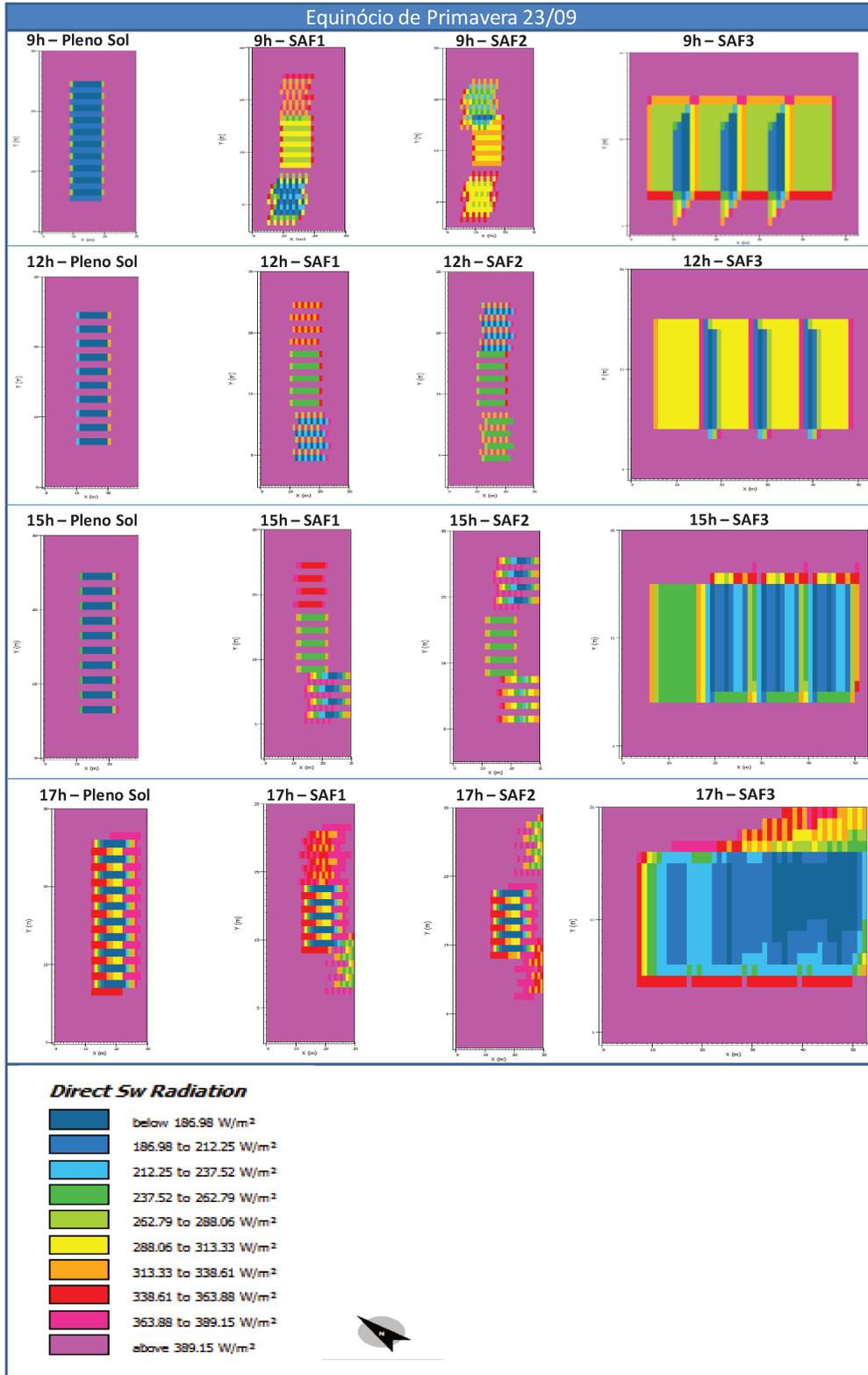


Figura 27- Simulação da sombra nos plantios de café no equinócio de primavera.

4.2.1.b) Vento

Os valores médios gerais e médios horários de velocidade do vento da testemunha (pleno sol) e dos tratamentos SAF1, SAF2 e SAF3 podem ser observados na Figura 28. Os valores de comparação das médias com o teste t de *Student* estão apresentados na Tabela 10. As diferenças estatísticas entre os valores médios de velocidade do vento foram significativas pelo teste t, e todos os tratamentos diferenciaram estatisticamente entre si. A testemunha (pleno sol) também é diferente estatisticamente dos tratamentos. Em comparação à testemunha (pleno sol), o tratamento SAF1 teve redução de 21% na velocidade do vento, o SAF2 teve redução de 65% e o SAF3 teve a velocidade do vento totalmente atenuada, com 99% de redução. Foi possível observar que, quanto maior a arborização, menor a velocidade do vento, e, no sistemas SAF2 e SAF3, a arborização serviu como um “quebra-vento”.

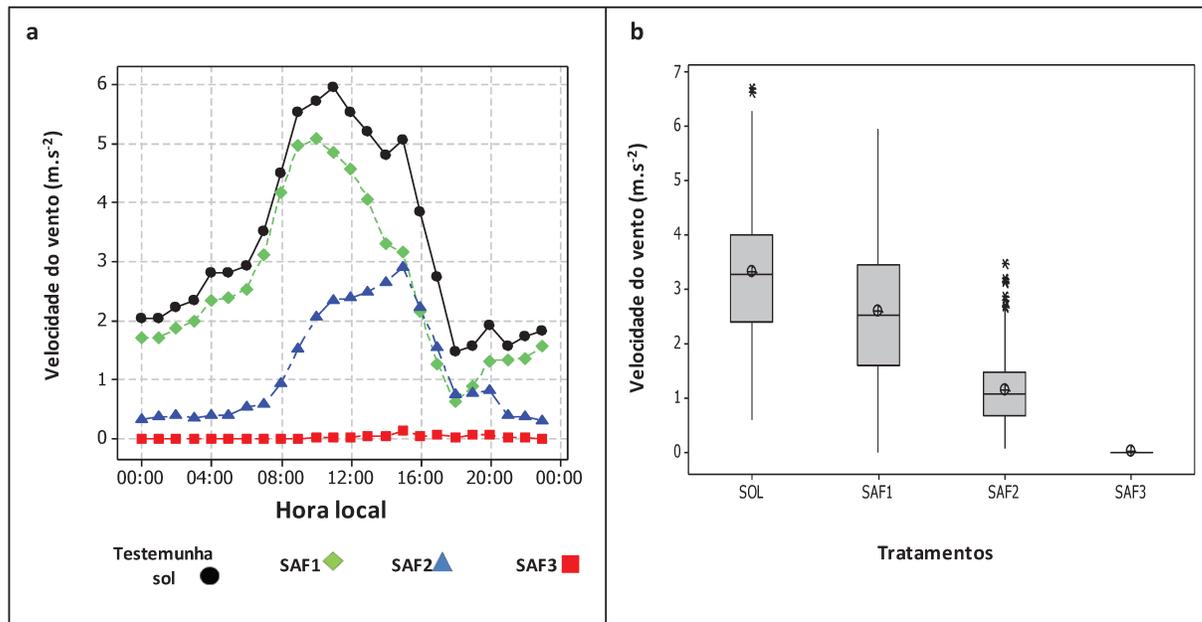


Figura 28 – Velocidade do vento (em m/s) horário (em a) e total (em b), dos tratamentos SAF1 (verde), SAF2 (azul), SAF3 (vermelho) e a testemunha (preto).

Tabela 10 – Comparação de médias com o teste t de *Student*. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.

Tratamento	Diferença Estatística	Média da velocidade do vento (m/s)
Testemunha	a	3,31
SAF1	b	2,59
SAF2	c	1,15
SAF3	d	0,02

Os resultados da velocidade do vento estão de acordo com o trabalho de PEZZOPANE et al. (2007), que observaram redução da velocidade do vento entre 21 e 70% em café consorciado com banana comparando com o cultivo a pleno sol. PEZZOPANE et al. (2003) constataram reduções superiores a 60% na incidência de vento em um sistema consorciado de café com coqueiro anão verde. PEZZOPANE et al. (2010) verificaram uma redução média de 72% da velocidade do vento em cultivo arborizado com macadâmia, em relação ao pleno sol. CAMARGO e PEREIRA (1994) relatam que um dos maiores benefícios do cultivo consorciado de café é a redução da incidência de ventos, que causa danos físicos às folhas e reduz seu crescimento (CARAMORI et al., 1986), além de promover a queda exacerbada de frutos e folhas (CAMARGO, 1985; MATIELLO et al., 2002). O estresse causado pelo vento pode levar à redução da área foliar e do comprimento do internódio dos ramos ortotrópicos e plagiotrópicos (DAMATTA et al., 2007; CARAMORI et al., 1986). Os ventos aumentam a evapotranspiração e, como consequência, há maior exigência de água (ou irrigação) pela cultura (DAMATTA et al., 2007). BRENNER (1996) ainda destaca que, para a cultura do café, a redução da velocidade do vento promovida pela utilização de arborização é um dos efeitos mais benéficos dessa prática. Além disso, a arborização também é recomendada para a redução da incidência de doenças.

4.2.1.c.) *Temperatura Máxima*

A temperatura máxima, na média geral dos dados, foi menor no tratamento SAF3 (19,8°C), seguida do SAF2 (19,9°C), SAF1 (20,0°C) e da testemunha (20,3°C). Ou seja, na média geral, a temperatura máxima foi menor no tratamento mais arborizado (Figura 29). Os valores de comparação de médias demonstram que há diferença estatística entre a testemunha e o tratamento SAF3 (Tabela 11). Já, os sistemas SAF1 e SAF2, não diferem estatisticamente entre si. É possível verificar na Figura 29 que todos os tratamentos, incluindo a testemunha, apresentam médias abaixo da mediana e a distribuição dos dados são semelhantes. A testemunha sol, no entanto, apresenta maior quantidade de *outliers* inferiores quando comparado aos demais tratamentos. O menor valor de temperatura máxima (9,7°C) foi encontrado no sistema pleno sol e no SAF2.

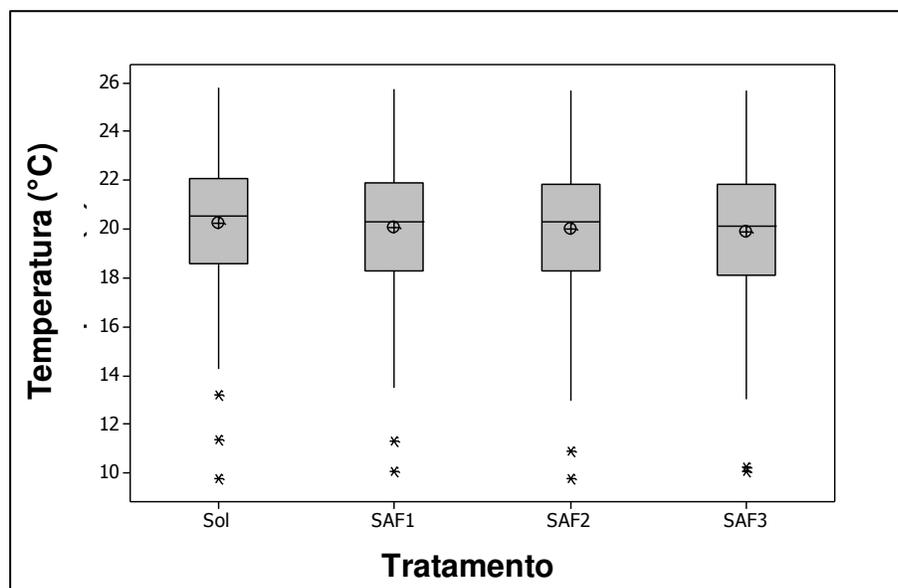


Figura 29 – Valores de temperatura máxima na testemunha e nos tratamentos SAF1, SAF2 e SAF3.

Tabela 11- Comparação de médias com o teste t de *Student*. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.

Tratamento	Diferença estatística	Média da Temperatura Máxima (°C)
Testemunha	a	20,3
SAF1	ab	20,0
SAF2	ab	19,9
SAF3	b	19,8

A comparação entre valores mensais de temperatura máxima da testemunha com os tratamentos SAF1, SAF2 e SAF3 é apresentada na Figura 30. É possível verificar que, nos meses estudados, a média mensal da temperatura máxima é superior na testemunha quando comparada aos demais tratamentos, demonstrando que, na média mensal, essa forma de arborização é capaz de atenuar a temperatura no microclima local de cultivo. Essa diferença foi maior nos meses de seca (maio, junho, julho, agosto e setembro) que nos meses mais chuvosos (outubro, novembro e dezembro) (Figura 31).

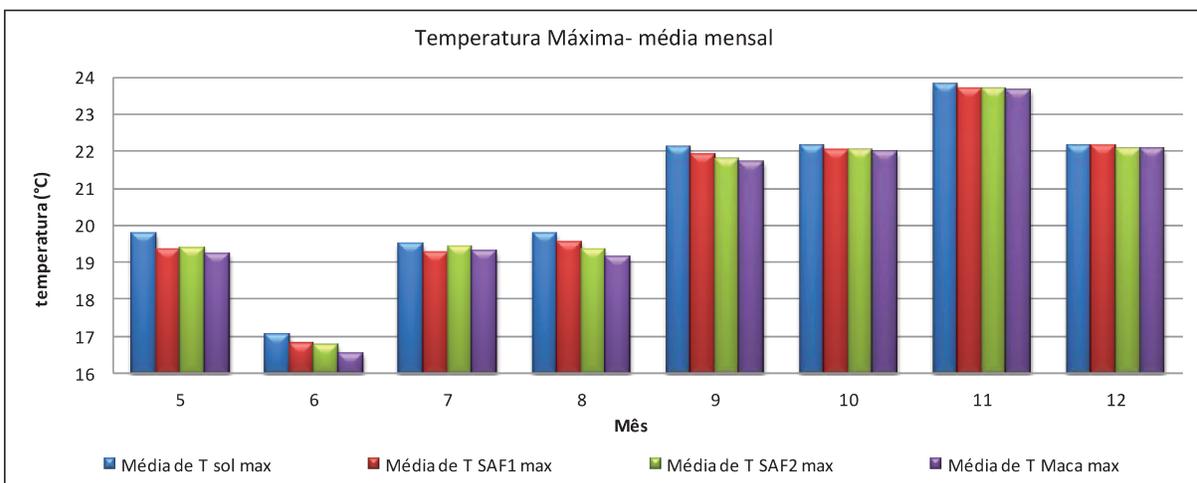


Figura 30 – Comparação dos valores médios mensais de temperatura máxima para a testemunha (azul) e os tratamentos SAF1 (vermelho), SAF2 (verde) e SAF3 (roxo).

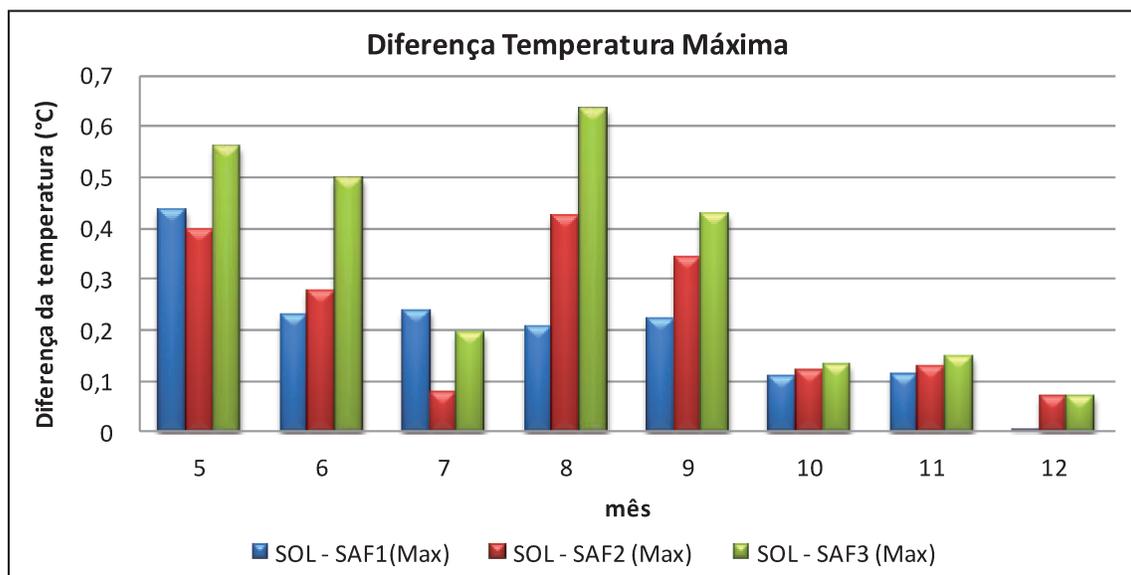


Figura 31 – Diferença entre a média mensal da temperatura máxima da testemunha com os tratamentos SAF1 (em azul), SAF2 (em vermelho) e SAF3 (em verde).

Nos meses de maio, junho e agosto, a atenuação da temperatura máxima ultrapassou 0,5°C no tratamento SAF3. Em maio e agosto, a arborização do tratamento SAF2 reduziu a temperatura máxima em 0,4°C. Resultados semelhantes de maior atenuação de temperatura nos sistemas sombreados na época seca foram encontrados em Minas Gerais por SOUZA et al.

(2012), no Espírito Santo por PEZZOPANNE et al. (2010), em Mococa (São Paulo) por PEZZOPANE et al. (2007) e no México por LIN (2006) e BARRADAS e FANJUL (1986).

É possível observar que as maiores reduções de temperatura ocorreram em maio e agosto, quando o sistema SAF3 registrou 0,56°C e 0,63°C a menos que a testemunha pleno sol, respectivamente. Esses resultados de redução de temperatura são inferiores quando comparados aos de MORAIS et al. (2006), BARRADAS e FANJUL (1986) e VALENTINI et al. (2010). MORAIS et al. (2006), avaliando a temperatura do café sombreado com Feijão-Guandú no Paraná, encontraram 4°C de redução de temperatura do ar no período mais quente do ano. VALENTINI et al. (2010) avaliaram café arábica arborizado com seringueira em Mococa, São Paulo, e encontrou redução de até 3°C nos dias quentes com céu sem nebulosidade da primavera e verão. BARRADAS e FANJUL avaliando café com *Inga jinucuil* na região central de Vera Cruz, México, encontraram que a temperatura máxima foi, em média, 5,4°C menor durante o ano no sistema arborizado quando comparado ao pleno sol. Os mesmos autores encontraram que no mês mais quente do local de estudo (maio), a temperatura máxima do sistema arborizado com Ingá foi 4,2°C inferior que o pleno sol.

Quando os dados horários são analisados, é possível observar que, no período noturno (sem radiação de 19h até 8h da manhã) a tendência mensal é mantida, e os tratamentos de maior quantidade de arborização (SAF2 e SAF3) apresentam temperaturas máximas menores quando comparados aos tratamentos de menor quantidade de arborização (SAF1 e testemunha). No entanto, esse mesmo padrão não se verifica nas médias horárias do período diurno (com radiação de 9h da manhã até 18h). Nessa fase, há uma inversão, e os tratamentos mais arborizados (SAF3 e SAF2) apresentaram temperaturas máximas superiores em relação ao SAF1 e à testemunha (pleno sol). A inversão se iniciou às 8h da manhã e terminou por volta de 16 horas (Figura 32). Às 17h e 18h, os tratamentos e a testemunha apresentaram a temperaturas semelhantes.

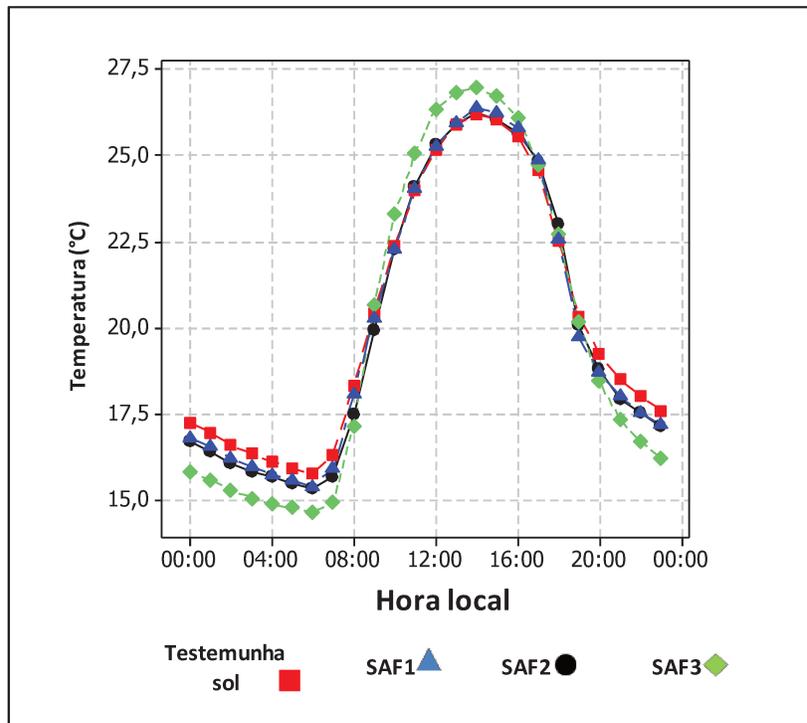


Figura 32 – Média da temperatura máxima horária na testemunha (em vermelho) e nos tratamentos SAF1 (em azul), SAF2 (em preto) e SAF3 (em verde).

Uma das explicações para temperaturas horárias mais elevadas na fase diurna dos sistemas mais arborizados é o fator aerodinâmico, ou seja, a menor velocidade de vento que esses sistemas têm em relação à testemunha (pleno sol), conforme pode ser observado na Figura 28 (item 4.2.1.b). BRENNER (1996) observou que, em condições de cultivos protegidos por renques ou quebra-ventos, em que a incidência de radiação é semelhante a cultivos sem arborização, as temperaturas diurnas são superiores em virtude da menor movimentação do ar atmosférico, o que altera o balanço de energia, aumentando o fluxo de calor sensível. Temperaturas diurnas superiores em cultivos protegidos com quebra-ventos artificiais também foram obtidas por BROWN e ROSEMBERG (1972) e UJAH e ADEOYE (1984). Resultados semelhantes foram obtidos por PEZZOPANE et al. (2003), em um sistema de produção de café consorciado com coqueiro-anão verde, e PEZZOPANE et al. (2007), com café consorciado com banana.

Além disso, o local onde o sensor estava posicionado, no meio das fileiras, também pode ter contribuído para a temperatura mais alta nos tratamentos mais arborizados. PEZZOPANE et al. (2010), avaliando o microclima de cafezais consorciados com noqueira

macadâmia, colocou sensores em quatro posições do plantio. Os autores constataram um maior aquecimento do ar no ponto central do cultivo arborizado (que é a mesma localização dos sensores nos sistemas SAF1, SAF2 e SAF3 desta tese) em relação ao cultivo a pleno sol e atribuíram esse resultado à menor movimentação do ar por efeito de “quebra vento”. PEZZOPANE et al. (2010) encontraram que o sensor do meio do cultivo protegido apresentou 0,3°C a mais que o sensor localizado a pleno sol.

É importante ressaltar que esse mesmo comportamento de temperatura horária não foi encontrado quando se considerou apenas dias nublados. Analisaram-se os dias 01/06, 11/06, 09/09, 20/08 e 19/09, com alta cobertura nebulosa, e verificou-se que, nessas datas, a temperatura da testemunha foi sempre superior à dos demais, arborizados (Figura 33), embora nas horas mais quentes do dia, a temperatura máxima dos tratamentos e da testemunha sejam semelhantes.

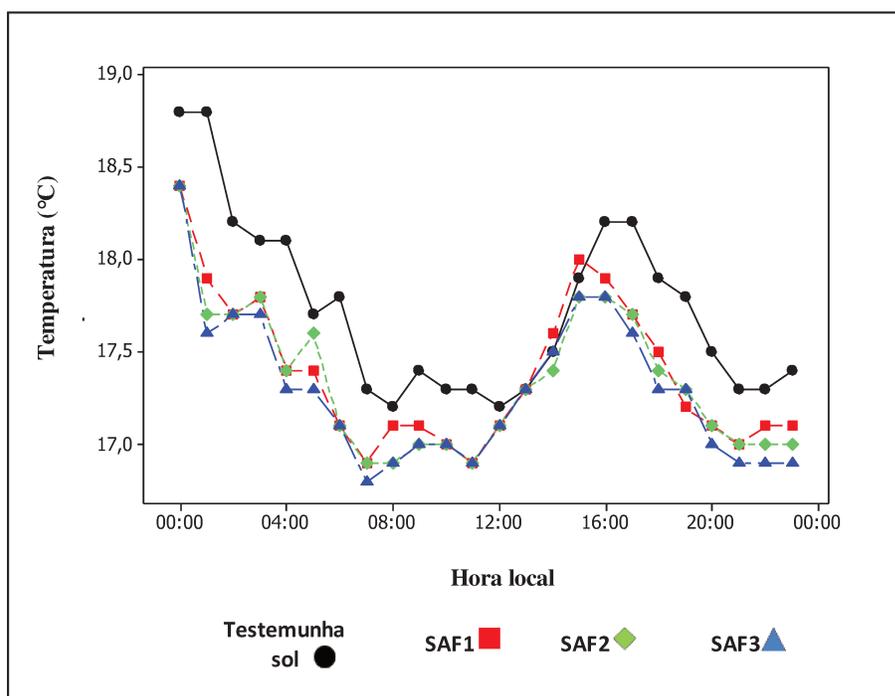


Figura 33 – Temperatura máxima em dias nublados, para a testemunha (em preto), SAF1 (em vermelho), SAF2 (em verde) e SAF3 (em azul).

4.2.1.d.) Temperatura Mínima

Ao analisar os valores médios da temperatura mínima, verificou-se que o tratamento SAF1 e a testemunha apresentaram temperatura mínima mais elevada que os

tratamentos SAF2 e SAF3 (Figura 34 e Tabela 12). No teste t de *Student* a testemunha diferiu estatisticamente dos tratamentos SAF2 e SAF3, mas não diferiu do SAF1 (Tabela 12).

Tabela 12- Comparação de média com o teste t de *Student*. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.

Tratamento	Diferença Estatística	Média da temperatura mínima (°C)
Testemunha	a	19,6
SAF1	a	19,4
SAF2	b	19,1
SAF3	b	18,9

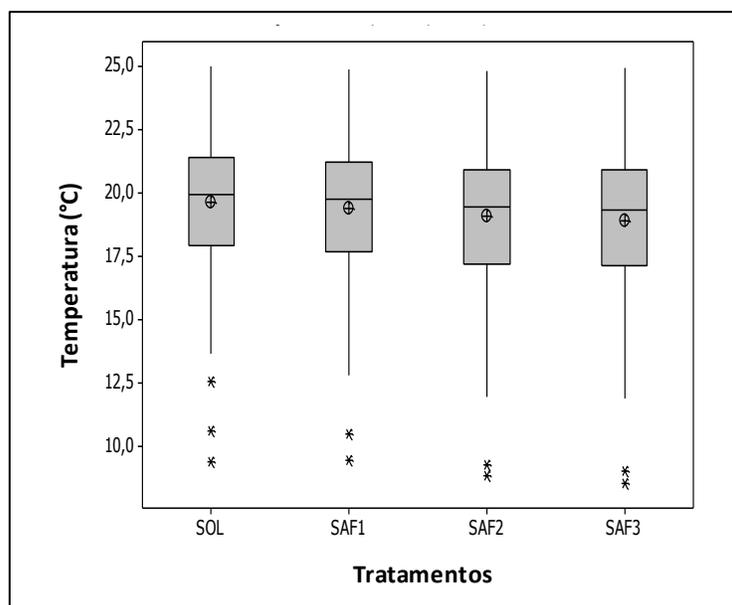


Figura 34 – Valores médios de temperatura mínima em graus centígrados (°C) na testemunha, e nos tratamentos SAF1, SAF2 e SAF3.

A análise mensal da temperatura mínima demonstrou que os meses de seca (maio, junho, julho e agosto) apresentaram valores inferiores nos sistemas mais arborizados, conforme a Figura 35. A testemunha apresentou temperatura mínima 0,8°C superior ao tratamento SAF3, e 0,6°C superior ao SAF2.

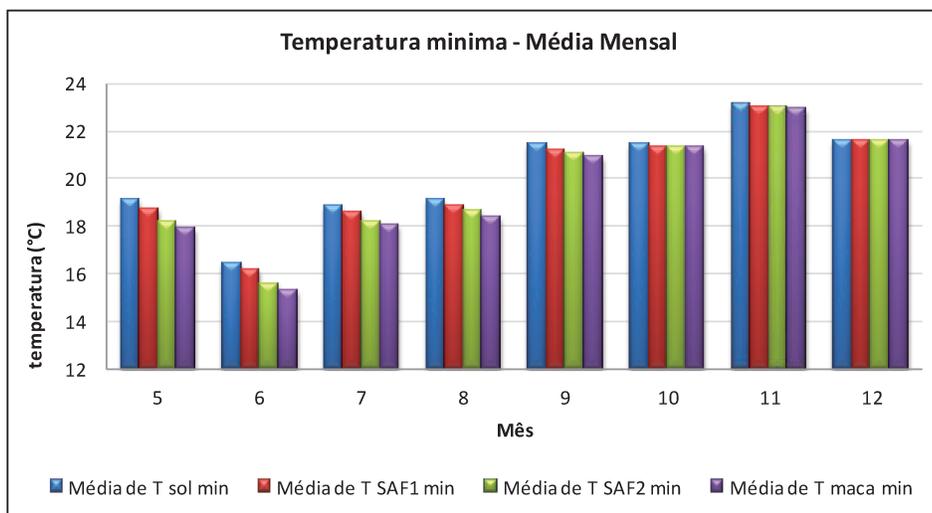


Figura 35- Média mensal da temperatura mínima da testemunha (em azul), e dos tratamentos SAF1 (em vermelho), SAF2 (em verde) e SAF3 (em roxo).

A Figura 36 apresenta a média da temperatura mínima horária registrada em cada tratamento e na testemunha. Foi possível observar que a temperatura mínima apresentou o mesmo comportamento horário que a temperatura máxima, ou seja, o plantio mais arborizado SAF3 apresentou valores maiores nos horários de maior incidência de radiação. PEZOPANNE et al. (2007) também encontraram valores de temperatura mínima maiores no plantio de café com banana em comparação ao pleno sol.

É importante notar que, nas horas mais frias do dia (entre 4 e 7h da manhã), o tratamento SAF3 apresentou temperaturas menores quando comparadas aos demais tratamentos e testemunha, demonstrando que esse tipo de arborização não é indicado para proteção contra geadas, uma vez que nos meses mais frios (e secos) e nas horas mais frias do dia, as temperaturas menores foram constatadas no sistema SAF3. No entanto, o mesmo comportamento horário não aconteceu com os tratamentos SAF2 e SAF1, que apresentaram temperaturas maiores em comparação à testemunha nas horas mais frias do dia. Assim, esses dois sistemas de arborização podem ser indicados para proteção contra geadas.

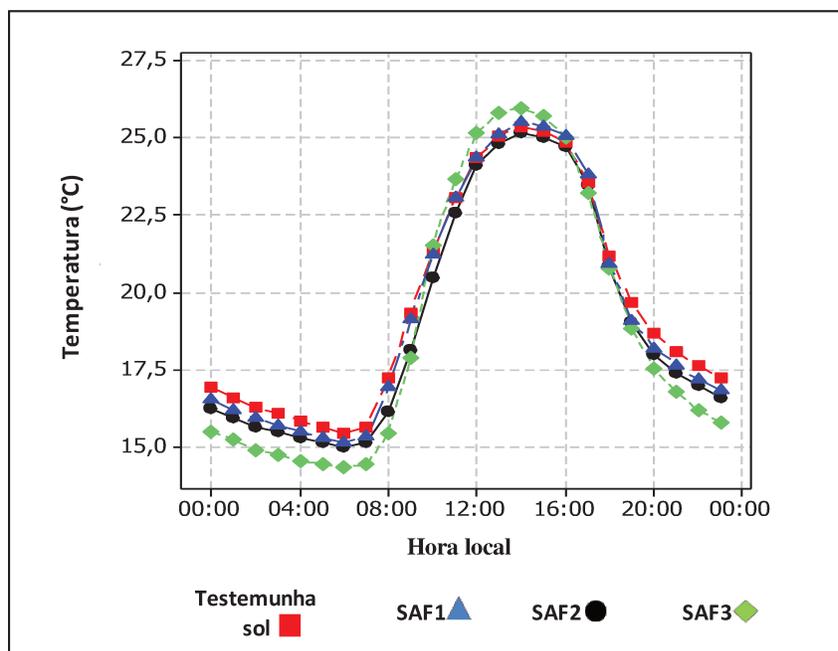


Figura 36 – Média horária da temperatura mínima registrada na testemunha (em vermelho) e nos tratamentos SAF1 (em azul), SAF 2 (em preto) e SAF3 (em verde).

4.1.e) Umidade Relativa

A variação da média mensal da umidade relativa (%) pode ser observada na Figura 37. Seguindo a tendência das temperaturas, as maiores diferenças entre as médias de umidade relativa aconteceram nos meses mais secos do ano, mais acentuadamente no mês de agosto. Nos meses úmidos (outubro e novembro), houve pouca diferença entre os tratamentos e a testemunha.

Nos meses mais secos (de maio a setembro), a umidade relativa foi maior nos tratamentos mais arborizados SAF3 e SAF2. Embora a diferença tenha sido 3%, é interessante ressaltar que esses sistemas de arborização podem contribuir para diminuir o estresse da planta em dias e meses muito secos. Resultados semelhantes foram encontrados em sistemas agroflorestais de café no México por LIN (2007), onde as medidas de umidade relativa não diferiram estatisticamente na época úmida, mas foi significativa na época seca. Nesse experimento, a autora encontrou que, na época seca, o local com pouco sombreamento teve umidade relativa menor, quando comparado aos locais mais sombreados.

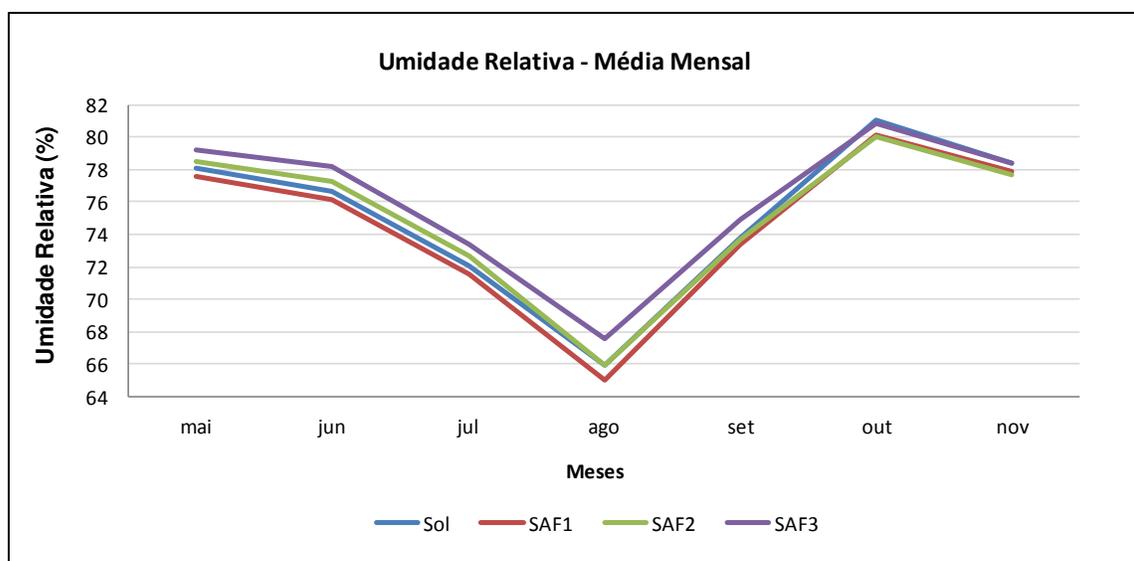


Figura 37 – Média mensal da umidade relativa (%) na testemunha sol (em azul) e dos tratamentos SAF 1 (em vermelho), SAF2 (em verde) e SAF3 (em roxo).

A média horária da umidade relativa (em %) está apresentada na Figura 38 e mostrou-se inversa à temperatura do ar (Figura 32). Na média geral dos dados, a umidade relativa foi maior no sistema SAF3, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos e da testemunha. Os tratamentos SAF1 e SAF2 e a testemunha não diferiram estatisticamente (Tabela 13).

Vale ressaltar que, entre julho e agosto, que é a época de colheita, quanto maior a umidade relativa, menor a qualidade do café. Nesse sentido, a diminuição da umidade relativa nos sistemas SAF1 e SAF2, tendem a proporcionar grãos de melhores qualidades.

Tabela 13- Comparação de médias da umidade relativa (%) com o teste t de *Student*. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.

Tratamento	Diferença Estatística	Média da Umidade Relativa (%)
SAF3	a	75,53
SAF2	b	74,50
Testemunha (sol)	b	74,47
SAF1	b	73,84

Também na média horária da umidade relativa, foi possível observar a inversão diurna, onde os sistemas mais arborizados apresentaram valores menores de umidade relativa.

Isso deveu-se, principalmente, à temperatura do tratamento, que é o inverso da umidade relativa.

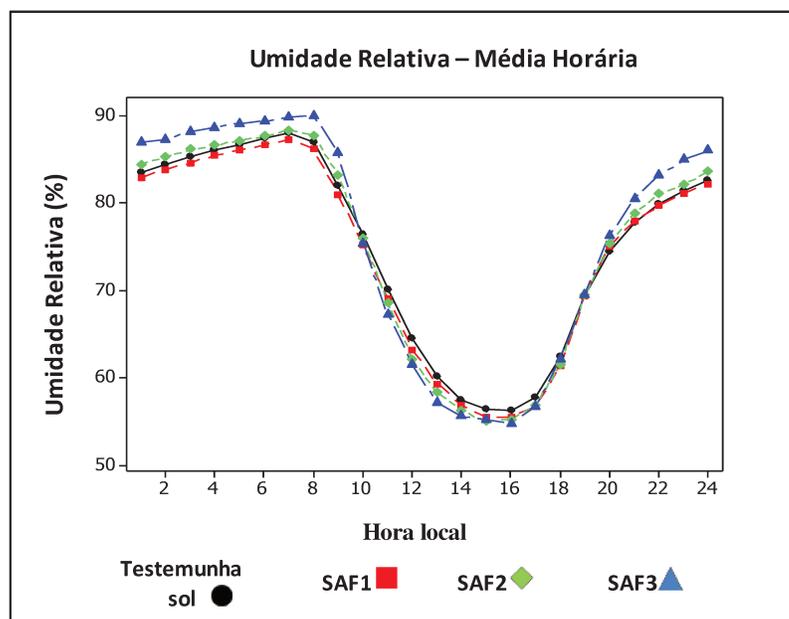


Figura 38- Média horária da umidade relativa (%) na testemunha (em preto), e nos tratamentos SAF1 (em vermelho), SAF2 (em verde) e SAF3 (em azul).

Ressalta-se que a umidade relativa tem impacto significativo no crescimento vegetativo do café (DAMATTA et al, 2007). O café arábica requer menor umidade relativa atmosférica quando comparado com o tipo *robusta* ou com as espécies da Etiópia (COSTE, 1992).

4.2) Modelagem dos sistemas de plantio no software Envi-Met

4.2.1. a.) Avaliação do desempenho do modelo

1º experimento: A Tabela 14 apresenta o índice de concordância “d” de Willmott entre os dados coletados em campo e os dados simulados, para os três tratamentos (SAF1, SAF2 e SAF3) e a testemunha. A Tabela apresenta o índice “d” dos três dias simulados do primeiro experimento (das 23 horas do dia 13/09/2009 às 0h do dia 17/09/2009).

Tabela 14 – Índice de concordância “d” de Willmott para temperatura e umidade relativa para os dias de simulação nos tratamentos SAF1, SAF2 e SAF3 e na testemunha.

Dia da Simulação	Tratamento	“d” temperatura	“d” UR	“d” Radiação
1° dia – 14/09/2009	Testemunha	0,83	0,67	0,90
2° dia – 15/09/2009	Testemunha	0,94	0,89	0,95
3° dia – 16/09/2009	Testemunha	0,96	0,92	0,97
1° dia – 14/09/2009	SAF 1	0,86	0,70	0,9
2° dia – 15/09/2009	SAF 1	0,95	0,90	0,95
3° dia – 16/09/2009	SAF 1	0,95	0,92	0,97
1° dia – 14/09/2009	SAF2	0,87	0,71	0,83
2° dia – 15/09/2009	SAF2	0,96	0,92	0,92
3° dia – 16/09/2009	SAF2	0,96	0,93	0,93
1° dia – 14/09/2009	SAF3	0,84	0,74	0,97
2° dia – 15/09/2009	SAF3	0,96	0,96	0,97
3° dia – 16/09/2009	SAF3	0,97	0,94	0,97

É possível verificar que o primeiro dia da simulação apresentou um índice de concordância menor quando comparado aos demais, indicando que, nesse dia, houve diferença maior entre os dados reais e os simulados. No primeiro dia, o modelo ainda está se estabilizando, embora já apresente uma curva padrão de temperatura, umidade relativa e radiação, e apresente uma concordância alta entre os dados (0,83 para temperatura; 0,67 para umidade relativa e 0,90 para radiação). O terceiro dia de simulação foi o que apresentou o maior índice de concordância “d”, com resultados simulados mais próximos aos dados reais. A variável que tem maior ganho entre o primeiro e o terceiro dia de simulação é a umidade relativa.

Para a umidade relativa, ocorreu o mesmo, sendo menor o “d” do primeiro dia e um alto índice de concordância no terceiro dia (superior a 0,9). A radiação apresentou uma boa resposta desde o primeiro dia, com valores do índice de concordância acima de 0,8, aumentando no terceiro dia de simulação. Os dados de temperatura e umidade reais e simulados podem ser observados na Figura 39. Os dados de radiação podem ser visualizados na Figura 40.

Temperatura e Umidade Relativa 16/09/2009

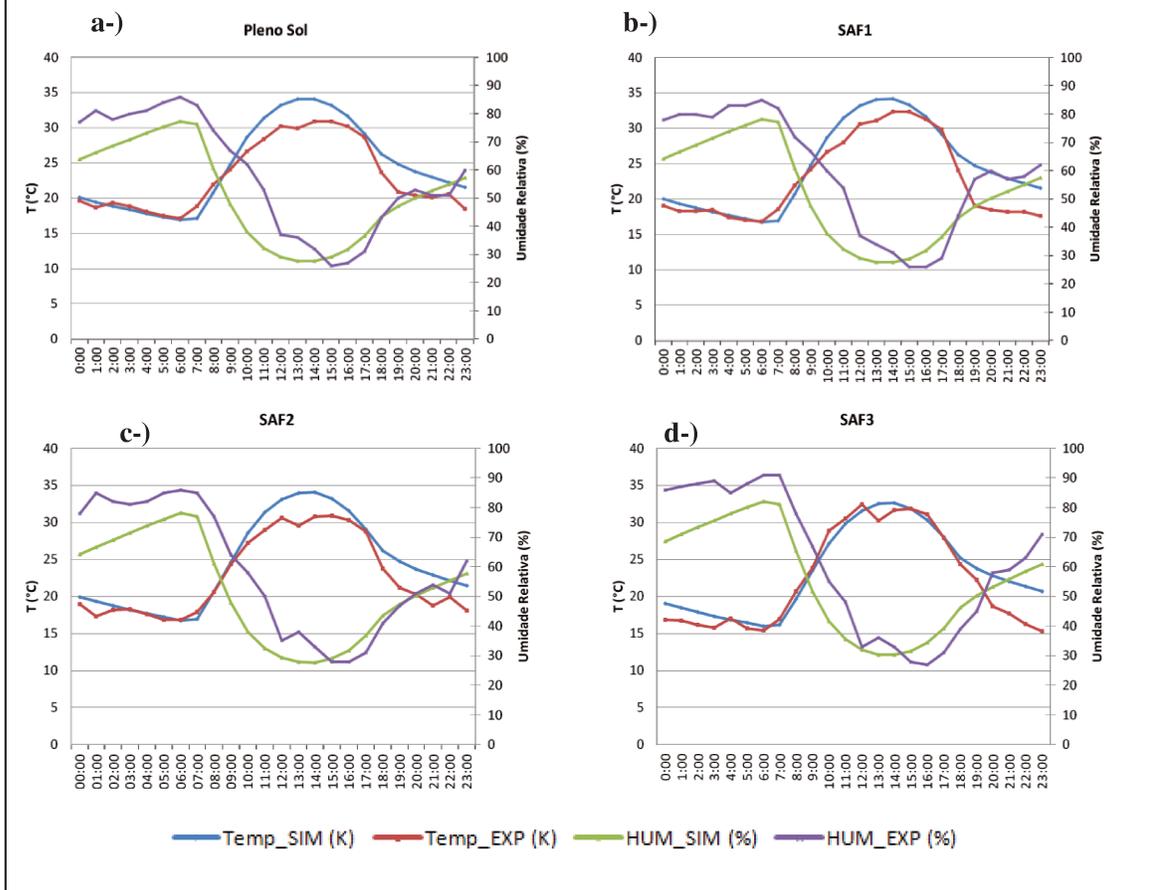


Figura 39- Dados do terceiro dia da simulação em comparação aos dados reais da testemunha (em a), SAF1 (em b), SAF 2(em c) e SAF 3 (em d). Em azul, a temperatura simulada, em vermelho, a temperatura experimental de campo; em verde, a umidade relativa (%) simulada e, em roxo, a umidade relativa (%) medida em campo. Horário, no eixo X, temperatura (°C), no eixo y esquerdo, e umidade relativa (%), no eixo y direito.

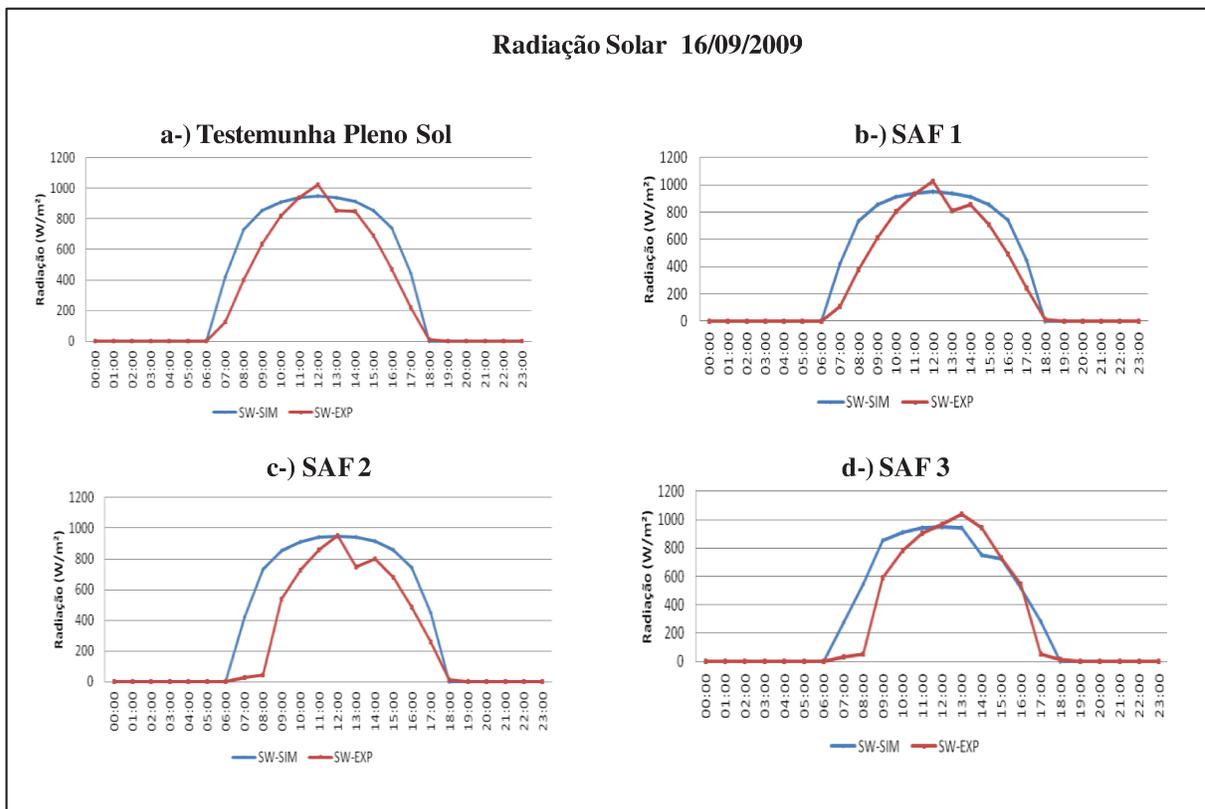


Figura 40- Dados do terceiro dia de simulação em comparação aos dados reais medidos em campo da testemunha (em a), dos tratamentos SAF1 (em b), SAF 2(em c) e SAF3 (em d). Em azul, radiação direta simulada e, em vermelho, radiação direta medida. Horário, no eixo X, e radiação (em W/m²) no eixo Y.

2º experimento: O segundo experimento, das 23 horas do dia 19/09/2009 até 0h do dia 22/09/2009, não apresentou bons resultados no segundo e no terceiro dias simulados, com índice de concordância “d” de Willmott iguais a zero. Esses resultados ocorreram, principalmente, devido às condições meteorológicas dos dados de entrada do modelo. Esses dias apresentaram alta nebulosidade e chuva, o que prejudicou o bom funcionamento da simulação. Uma das características do modelo é que a curva da temperatura é gerada a partir de um valor inicial, através de processos de interação (NAKATA, 2010) e, portanto, se o dado inicial não estiver coerente com uma curva padrão, os demais dados gerados ficam desconfigurados. O software não consegue processar dados que diferem de uma curva padrão como, por exemplo, baixa quantidade de radiação às 12 horas quando comparada com a radiação das 10h. Quando a radiação começa a oscilar (como dados de entrada) e não segue a

curva padrão, o modelo não consegue determinar as variáveis dependentes desta, como a temperatura, que, por sua vez, interfere diretamente na umidade relativa. Nesses casos, o software se desregula e os valores simulados passam a ser fora da normalidade. Como resposta, é possível obter dados de umidade relativa acima de 100% e dados de temperatura negativos, como o que ocorreu no segundo experimento. Essa característica é uma das limitações do software, onde o bom funcionamento ocorre apenas em dias com pouca nebulosidade e sem ocorrência de precipitação. NAKATA (2010) também encontrou bons resultados simulando dias sem nebulosidade e sem precipitação.

4.2.2.b.) 3º experimento: *Localização do sensores nas linhas de plantio*

4.2.2.b.1) *Temperatura nos diferentes sensores*

As Figuras 41, 42 e 43 apresentam as temperaturas nos diferentes sensores (A, B, C, D e E) dos sistemas de plantio SAF1, SAF2 e SAF3, respectivamente. O detalhe da diferença horária nos sensores A e D do sistema SAF3 podem ser visualizados na Figura 43. Os sensores A, B,C,D e E não apresentaram diferenças estatísticas significativas em nenhum horário do dia, em nenhum dos tratamentos nos três dias de simulação (tabelas com o teste de diferença de médias em anexo).

Embora não haja diferença estatística, é possível observar que, no sistema SAF3, das 11h às 14h, houve uma diferença entre os sensores A e D de até 0,62°C (às 12h). Às 13h e 14h, a diferença foi de 0,60°C e 0,52°C, respectivamente. Essa diferença pode ser observada no detalhe da Figura 43. As outras pequenas diferenças dos sistemas SAF1 e SAF2 se devem à passagem do sol no sistema.

É possível observar nas Figuras 26 e 27 (no item 2.1.a de estudo da sombra), que o sensor A do sistema SAF3 foi o que recebeu a maior quantidade de radiação e menor quantidade de sombras ao longo do dia, o que explica a temperatura maior nesse sensor. PEZOPANNE et al. (2010) também encontraram temperaturas diferentes em campo ao avaliar posições diferentes dos sensores no sistema de plantio de café com noqueira macadâmia e explicou que essas diferenças de temperatura nas linhas de plantio ocorre por alguns fatores

como o vento (fator aerodinâmico), sombreamento e passagem do sol ao longo do dia, que diferem de uma linha para a outra, interferindo, assim, na “temperatura da linha”.

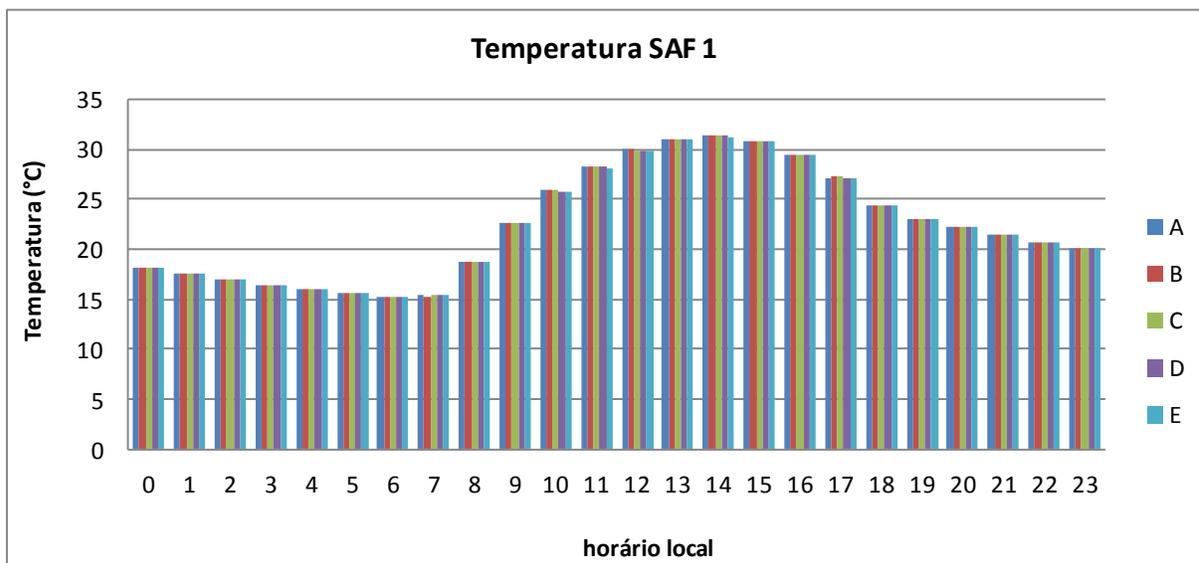


Figura 41 – Temperatura em graus centígrados (°C) nos sensores A, B, C, D e E do sistema de plantio SAF1

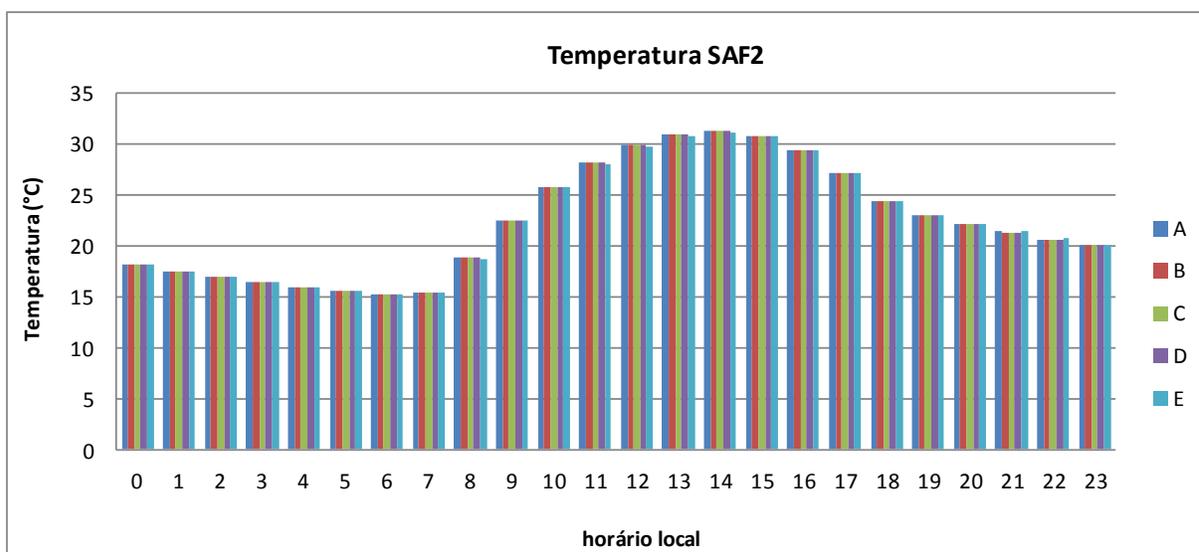


Figura 42 – Temperatura em graus centígrados (°C) nos sensores A, B, C, D e E do sistema de plantio SAF2

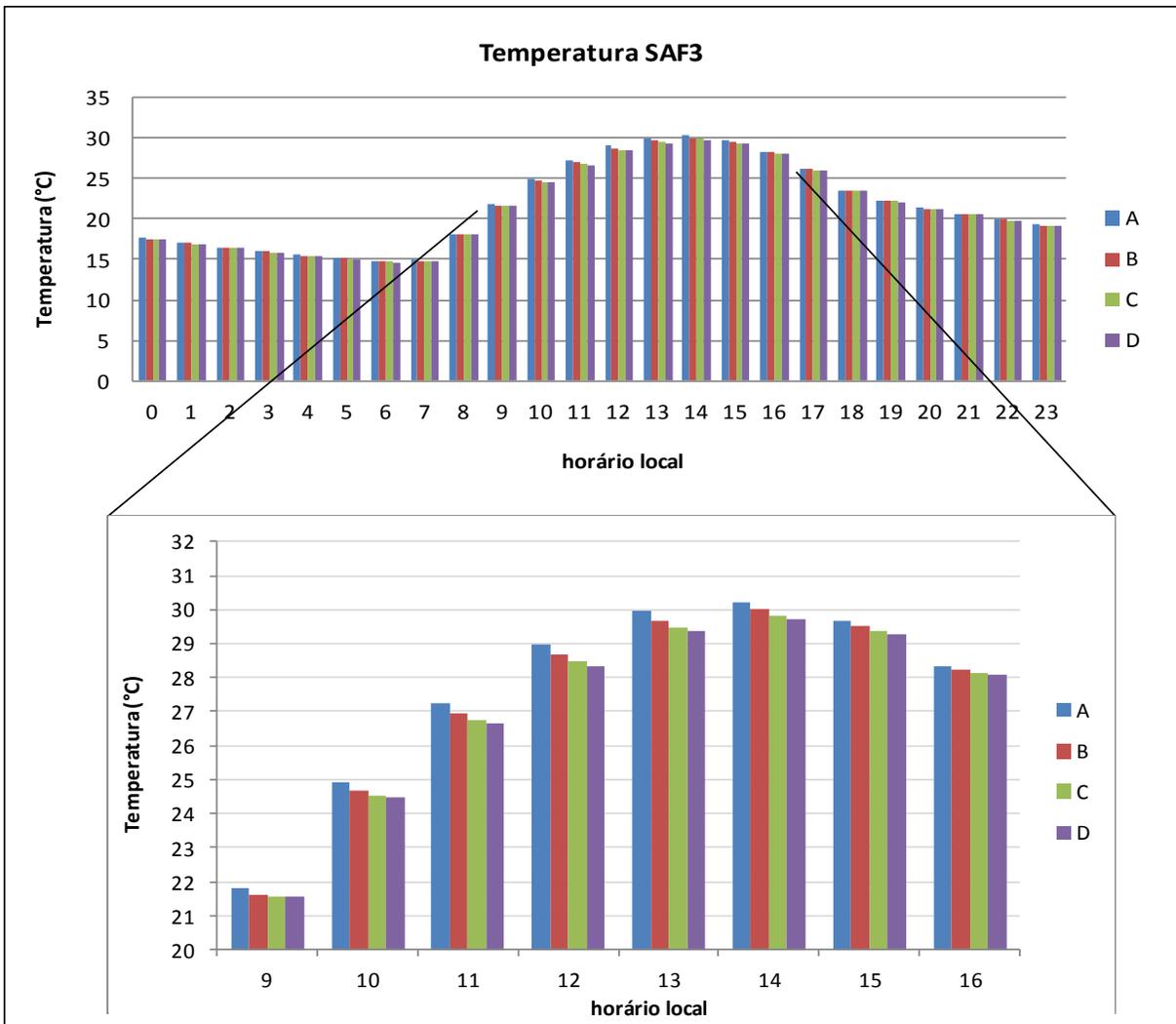


Figura 43 – Temperatura em graus celsius (°C) nos sensores A, B, C e D do sistema de plantio SAF3, com destaque para os dados de temperatura de 9 até 16 horas.

A Figura 44 apresenta a média horária da temperatura em todos os sensores nos três tratamentos. É possível observar que o tratamento SAF3 apresentou temperatura horária menor que os sistemas SAF1 e SAF2 em todas as horas do dia, divergindo dos dados obtidos em campo. As avaliações em campo mostraram uma inversão da temperatura nos dados horários, e os tratamentos mais arborizados, nas horas mais quentes do dia, passaram a ser mais quentes que os tratamentos a pleno sol. Tal resultado não foi encontrado na simulação. Uma possível explicação é que o software não levou em conta a situação aerodinâmica que os cafezais arborizados possuem, fazendo das árvores de arborização um quebra-vento. Além

disso, as equações de temperatura do modelo dependem diretamente da radiação, e, uma vez que a radiação é menor em sistemas arborizados, automaticamente, a temperatura deve baixar.

Uma segunda explicação pode ser que os sensores colocados em campo tenham sofrido alguma influência das folhas de café, alterando o microclima de onde o sensor estava localizado, culminando, assim, na diferença entre os dados simulados e os coletados.

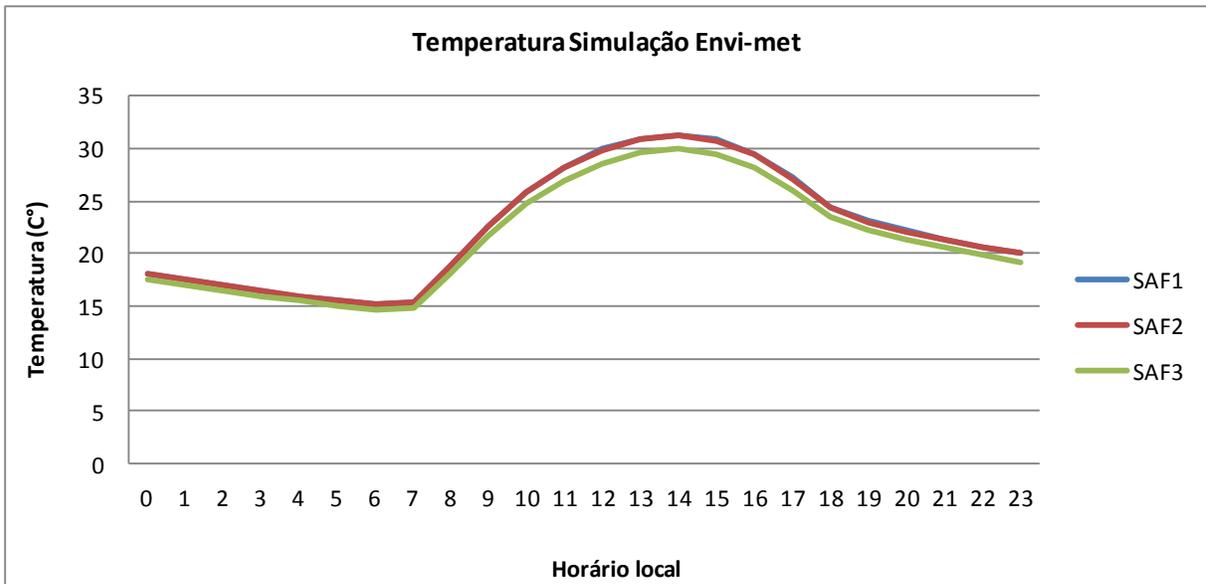


Figura 44 – Diferença da temperatura horária entre os sistemas SAF1, SAF2 e SAF3 (média dos sensores).

4.2.2.b.2.) Radiação nos diferentes sensores

A quantidade de radiação (em W/m^2), em cada um dos sensores dos tratamentos, pode ser observada na Figura 45. As Tabelas 15, 16 e 17 apresentam a comparação das médias da radiação com o teste t de *Student*, nos diferentes sensores dos sistemas SAF1, SAF2 e SAF3, respectivamente.

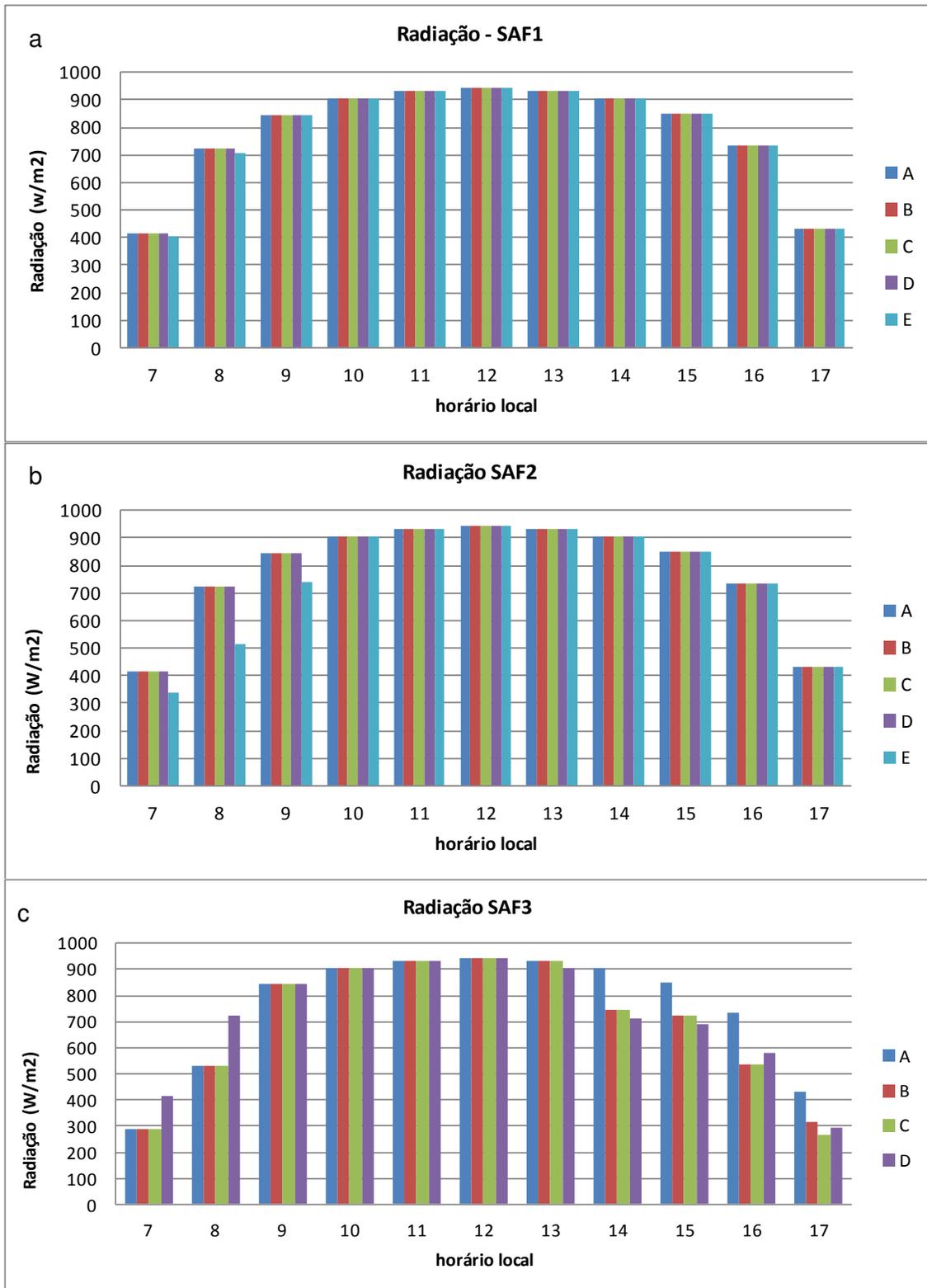


Figura 45- Radiação (W/m^2) nos sensores dos sistemas SAF1 (em a), SAF2 (em b) e SAF3 (em c).

Tabela 15 - Comparação das médias da radiação com o teste t de *Student* da radiação nos diferentes sensores do sistema SAF1. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.

Radiação SAF1											
7h			8h			9h			10h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
A	a	412,02	A	a	724,7	A	a	845,7	A	a	904,7
B	a	412,02	B	a	724,7	B	a	845,7	B	a	904,7
C	a	412,02	C	a	724,7	C	a	845,7	C	a	904,7
D	a	412,02	D	a	724,7	D	a	845,7	D	a	904,7
E	a	406,45	E	b	708,7	E	a	845,7	E	a	904,7
11h			12h			13h			14h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
A	a	933,4	A	a	942,4	A	a	934,5	A	a	907,2
B	a	933,4	B	a	942,4	B	a	934,5	B	a	907,2
C	a	933,4	C	a	942,4	C	a	934,5	C	a	907,2
D	a	933,4	D	a	942,4	D	a	934,5	D	a	907,2
E	a	933,4	E	a	942,4	E	a	934,5	E	a	907,2
15h			16h			17h					
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media			
A	a	850,05	A	a	732,6	A	a	433,9			
B	a	850,05	B	a	732,6	B	a	433,9			
C	a	850,05	C	a	732,6	C	a	433,9			
D	a	850,05	D	a	732,6	D	a	433,9			
E	a	850,05	E	a	732,6	E	a	433,9			

Tabela 16 - Comparação das médias da radiação com o teste t de *Student* nos diferentes sensores do sistema SAF2. Letras diferentes significam diferenças estatísticas

Radiação SAF2											
7h			8h			9h			10h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
A	a	412,00	A	a	724,7	A	a	845,77	A	a	904,78
B	a	412,00	B	a	724,7	B	a	845,77	B	a	904,78
C	a	412,00	C	a	724,7	C	a	845,77	C	a	904,78
D	a	412,00	D	a	724,7	D	a	845,77	D	a	904,78
E	b	334,99	E	b	515,7	E	b	738,19	E	a	904,78
11h			12h			13h			14h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
A	a	933,44	A	a	942,43	A	a	934,53	A	a	907,20
B	a	933,44	B	a	942,43	B	a	934,53	B	a	907,20
C	a	933,44	C	a	942,43	C	a	934,53	C	a	907,20
D	a	933,44	D	a	942,43	D	a	934,53	D	a	907,20
E	a	933,44	E	a	942,43	E	a	934,53	E	a	907,20
15h			16h			17h					
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media			
A	a	850,03	A	a	732,57	A	a	433,90			
B	a	850,03	B	a	732,57	B	a	433,90			
C	a	850,03	C	a	732,57	C	a	433,90			
D	a	850,03	D	a	732,57	D	a	433,90			
E	a	850,03	E	a	732,57	E	a	433,90			

Tabela 17 - Comparação das médias da radiação com o teste t de *Student* nos diferentes sensores do sistema SAF3. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.

Radiação SAF3											
7h			8h			9h			10h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
D	a	412,25	D	a	724,92	A	a	845,77	A	a	904,75
A	b	287,87	A	b	532,89	B	a	845,77	B	a	904,75
C	b	287,87	C	b	532,89	C	a	845,77	C	a	904,75
B	b	287,87	B	b	532,89	D	a	845,77	D	a	904,75
11h			12h			13h			14h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
A	a	933,40	A	a	942,39	A	a	934,46	A	a	906,99
B	a	933,40	B	a	942,39	B	a	934,46	B	b	743,50
C	a	933,40	C	a	942,39	C	a	934,46	C	b	743,50
D	a	933,40	D	a	942,39	D	a	907,01	D	b	711,81
15h			16h			17h					
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media			
A	a	849,66	A	a	732,03	A	a	433,04			
B	b	722,12	D	b	577,88	B	b	313,01			
C	b	722,12	C	c	534,56	D	bc	291,09			
D	c	687,67	B	c	534,56	C	c	267,75			

Na Figura 45, é possível observar que o sistema SAF1 recebeu, ao longo do dia, praticamente, a mesma quantidade de radiação em todos os sensores. Apenas o sensor E, às 7h e 8h da manhã, recebeu quantidade menor de radiação, quando comparado com os demais. Às 7h, o sensor E recebeu, em média, 6W/m^2 a menos que os demais, e, às 8h, 16W/m^2 a menos. O teste de comparação de médias demonstra que houve diferença estatística entre o sensor E e os demais, às 8h da manhã. Os demais sensores, nos demais horários, não apresentaram diferenças estatísticas (Tabela 15). Essa diferença deveu-se, principalmente, à baixa quantidade de arborização no sistema. Logo que o sol nasce, havia uma pequena quantidade de sombras na linha onde estava o sensor E, por isso, a menor quantidade de radiação recebida. A quantidade de radiação recebida a menos na linha do sensor E pode ser observada nas Figuras 25 e 26 (no item 2.1.a de estudo da sombra). Conforme o ângulo zenital solar diminuía e as linhas de plantio recebiam a mesma quantidade de radiação, essa diferença desaparecia. Nas demais horas do dia, a simulação demonstra que esse tipo de arborização não interferiu na quantidade de radiação recebida pelas linhas de café.

No sistema SAF2, também o sensor E recebeu menos radiação que os demais nos primeiros horários de incidência de radiação (7h, 8h e 9h da manhã), igualando-se aos demais sensores no resto do dia. Pelo fato da arborização do sistema SAF2 apresentar um porte maior, a sombra na linha E se prolongou até 9h da manhã. Depois, as linhas passaram a receber a mesma quantidade de radiação ao longo do dia (nessa época do ano). O teste de comparação de médias na Tabela 16 demonstra que, nesses horários (7h, 8h e 9h da manhã), o sensor E diferiu estatisticamente dos demais. No restante do dia, não houve diferença estatística entre os sensores.

No sistema SAF3, o sensor D recebeu mais radiação que os demais no início do dia (7h e 8h da manhã), diferindo estatisticamente dos demais. Às 7h e 8h, o sensor D recebeu 125W/m^2 e 192W/m^2 a mais de radiação, respectivamente, que os demais. Às 9h, 10h, 11h e 12h, todos os sensores receberam a mesma quantidade de radiação, fato esse que só se modificou às 13h, onde o sensor A passou a receber mais radiação. Das 14h às 17h, o sensor A recebeu mais radiação, e diferiu estatisticamente dos demais sensores. Às 14h e 15h, o sensor D passou a receber menor quantidade de radiação, embora a diferença estatística só tenha aparecido às 15h. Às 16 horas, os sensores A e D passaram a receber maior quantidade de radiação, quando comparados aos sensores B e C. No teste de comparação de médias, os

sensores A e D se diferenciaram dos demais nesse horário. Às 17 horas, o sensor A recebeu maior quantidade de radiação, seguidos dos D, B e C.

Os sistemas SAF1 e SAF2 apresentaram arborização com características bem semelhantes, mudando apenas o porte das essências de arborização, o que fez com que a quantidade de radiação recebida por hora em cada sensor fosse semelhante estatisticamente. A única diferença foi no início da manhã, quando o sistema SAF2 recebeu menos radiação no sensor E justamente por conta do porte da arborização (visto que no sistema SAF1, o sensor E também recebeu menos radiação).

O sistema SAF3 apresentou arborização com características diferentes, onde as árvores estavam no meio do plantio de café. Nesse sistema, a simulação demonstrou uma atenuação maior da radiação em mais de um sensor.

A Figura 46 apresenta a quantidade média horária de radiação solar recebida em cada sistema de plantio, corroborando com os dados encontrados em campo, onde o sistema SAF3 recebeu menor quantidade de radiação, seguido de SAF2 e SAF1. Nos dados da simulação com o Envi-Met, as diferenças entre os tratamentos foram menores do que as observadas em campo.

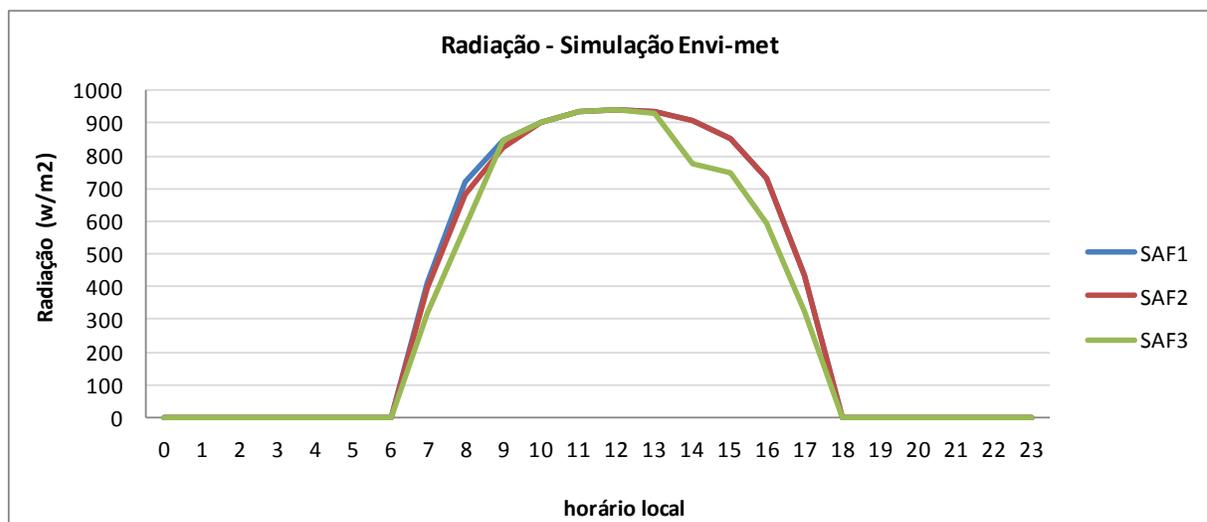


Figura 46 - Diferença de radiação solar horária entre os sistemas SAF1, SAF2 e SAF3 (média dos sensores).

4.2.2.b.3) Umidade Relativa

As Figuras 47, 48 e 49 apresentam a umidade relativa (%) de cada um dos sensores nos sistemas SAF1, SAF2 e SAF3, respectivamente. A umidade relativa apresenta o mesmo padrão horário nos três tratamentos, sendo inverso à temperatura. Não houve diferença estatística entre os sensores nos tratamentos SAF1, SAF2 e SAF3. Entre eles, foi possível observar que o sistema SAF3 apresentou umidade relativa maior que os demais sistemas em todos os horários do dia (Figura 50).

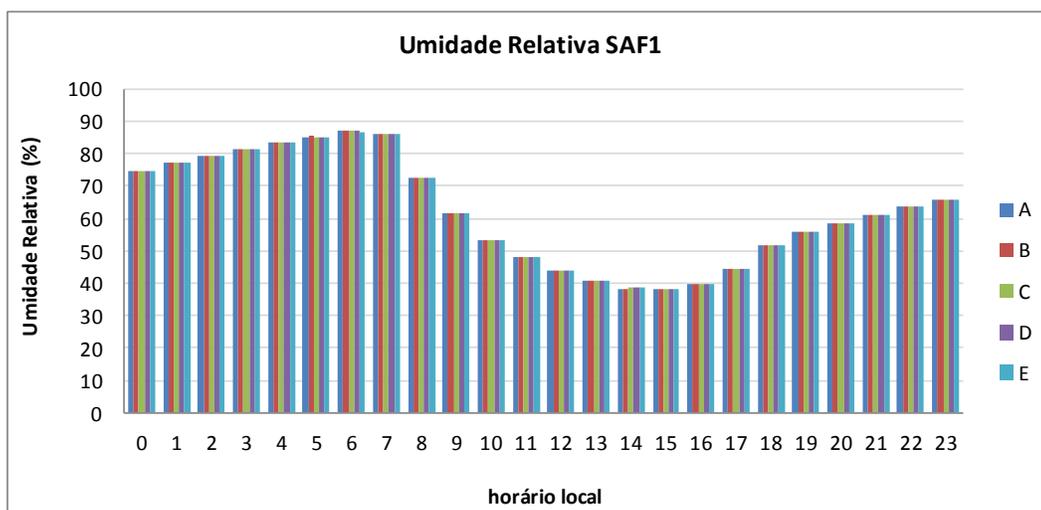


Figura 47 – Umidade Relativa nos sensores do sistema SAF1.

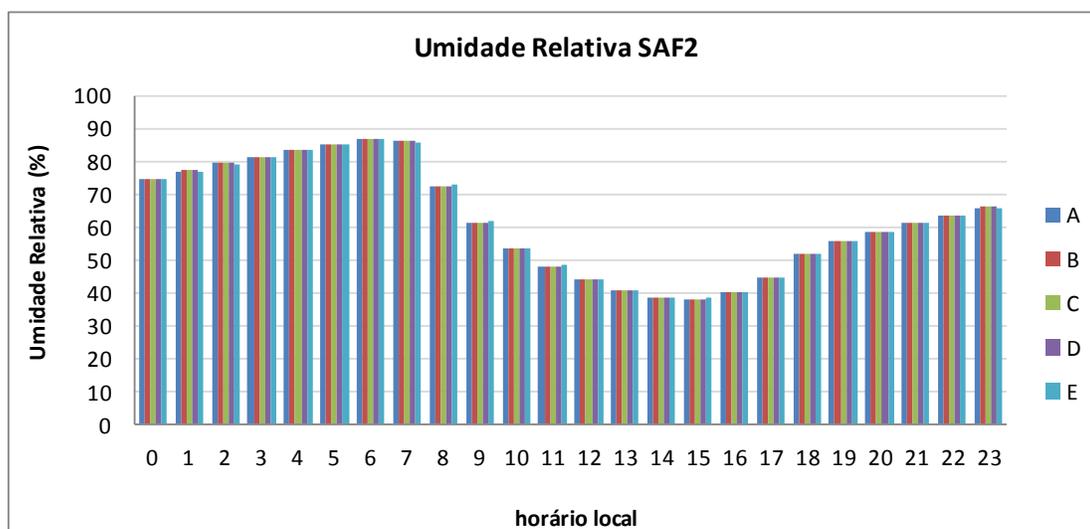


Figura 48 – Umidade Relativa nos sensores dos sistemas SAF2.

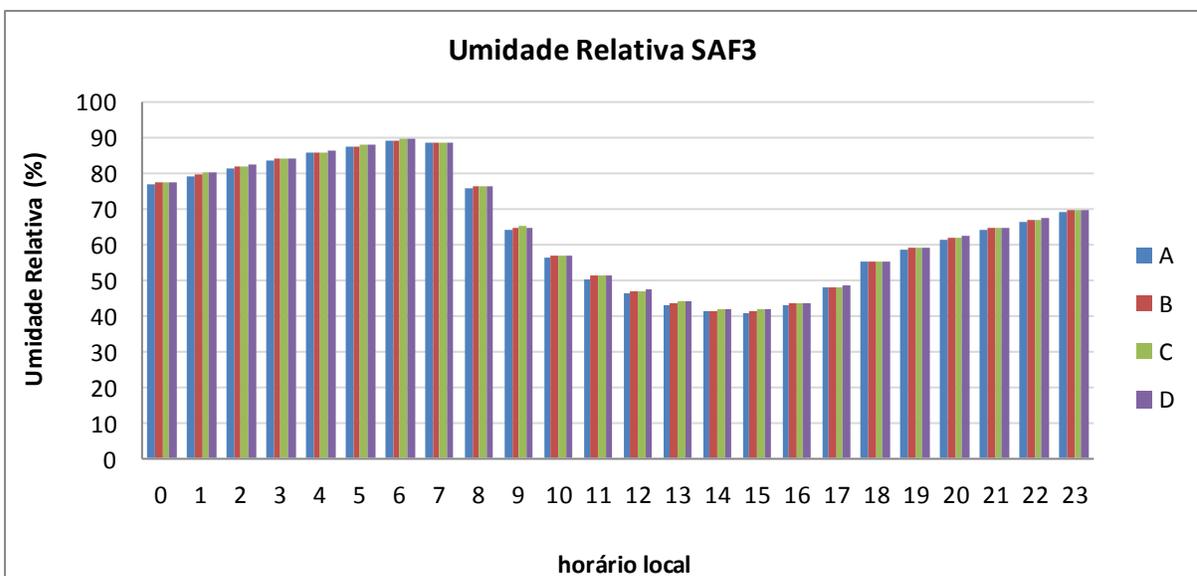


Figura 49 – Umidade Relativa nos sensores dos sistemas SAF3.

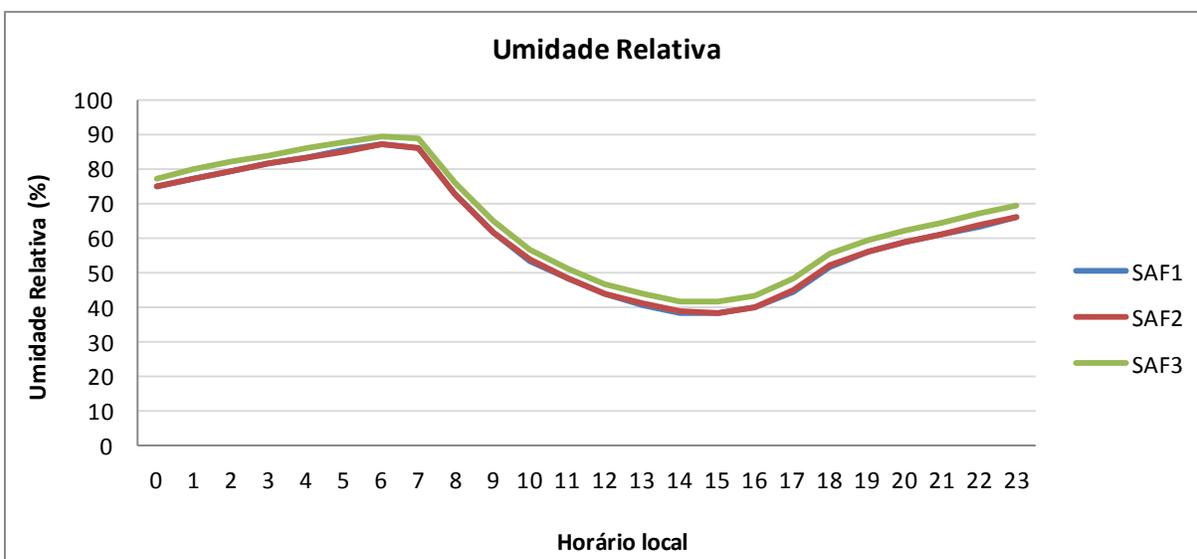


Figura 50 - Diferença da umidade relativa horária entre os sistemas SAF1, SAF2 e SAF3 (média dos sensores).

4.2.2.c.) Avaliação das variáveis meteorológicas simuladas pelo Envi-Met nos tratamentos SAF1, SAF2 e SAF3, e na testemunha (pleno sol)

As Figuras 51, 52, 53 e 54 apresentaram o comportamento da radiação solar, temperatura e umidade relativa a 1,60 metros, na testemunha e nos sistemas SAF1, SAF2 e SAF3, respectivamente, no horário normalmente mais quente do dia (15 horas) de 16/09/2009.

É possível observar a interação entre as variáveis e a influência direta que a radiação e a posição do sol tiveram sobre a temperatura (e, por consequência, na umidade relativa).

Nesse horário, a arborização da leucena do sistema SAF 1 e da leucena e glirícidia do sistema SAF2 foram capazes de atenuar a temperatura da localidade em que as árvores estão, mas não atuaram, entretanto, no cultivo do café, corroborando com os dados horários obtidos em campo. É possível notar, então, que esse tipo de arborização não reduziu a temperatura no microclima de cultivo na hora mais quente do dia.

Essa análise pode ser uma das explicações dos dados horários de temperatura máxima obtidos no campo, onde sistemas mais arborizados apresentaram temperaturas máximas superiores que os sistemas menos arborizados nas horas mais quentes do dia (Figura 32). Conforme observado nas Figuras 52 e 53, e nos dados de campo, esse horário, além das essências arborizadoras não atuarem como redutoras de radiação nas linhas de café ainda proporcionaram considerável redução na velocidade do vento, resultando em temperaturas maiores.

No sistema SAF3, a localização do sol também influenciou mais nesse horário do que os efeitos da arborização. Vale ressaltar que, na Figura 54, é possível notar que a temperatura é menor que nos sistemas SAF1, SAF2 e na testemunha. Importante destacar, também, que os valores de umidade relativa, inversos à temperatura, corroboram os dados obtidos em campo.

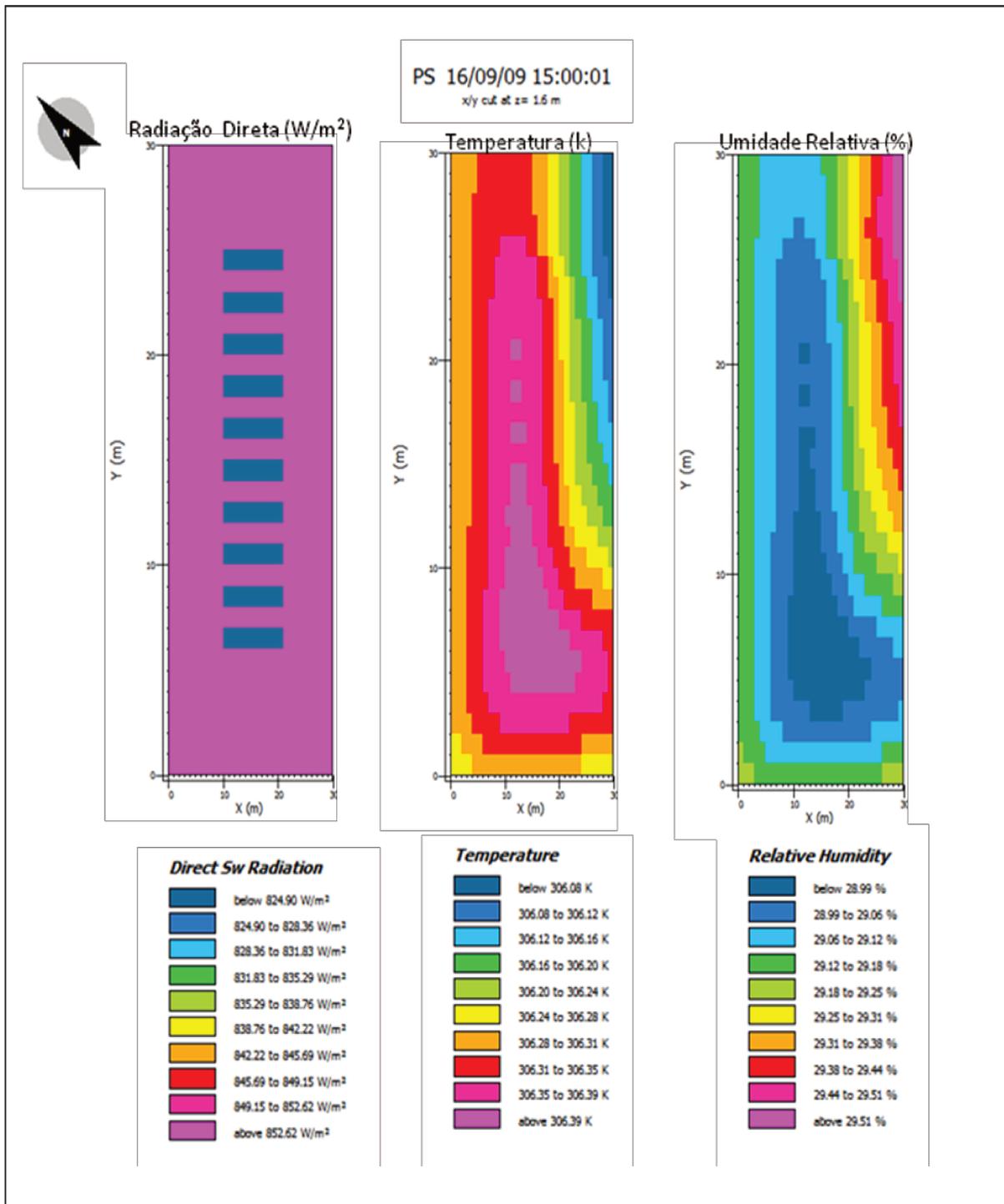


Figura 51 – Variáveis meteorológicas (radiação, temperatura e umidade relativa) na testemunha, às 15 horas do dia 16/09/2009.

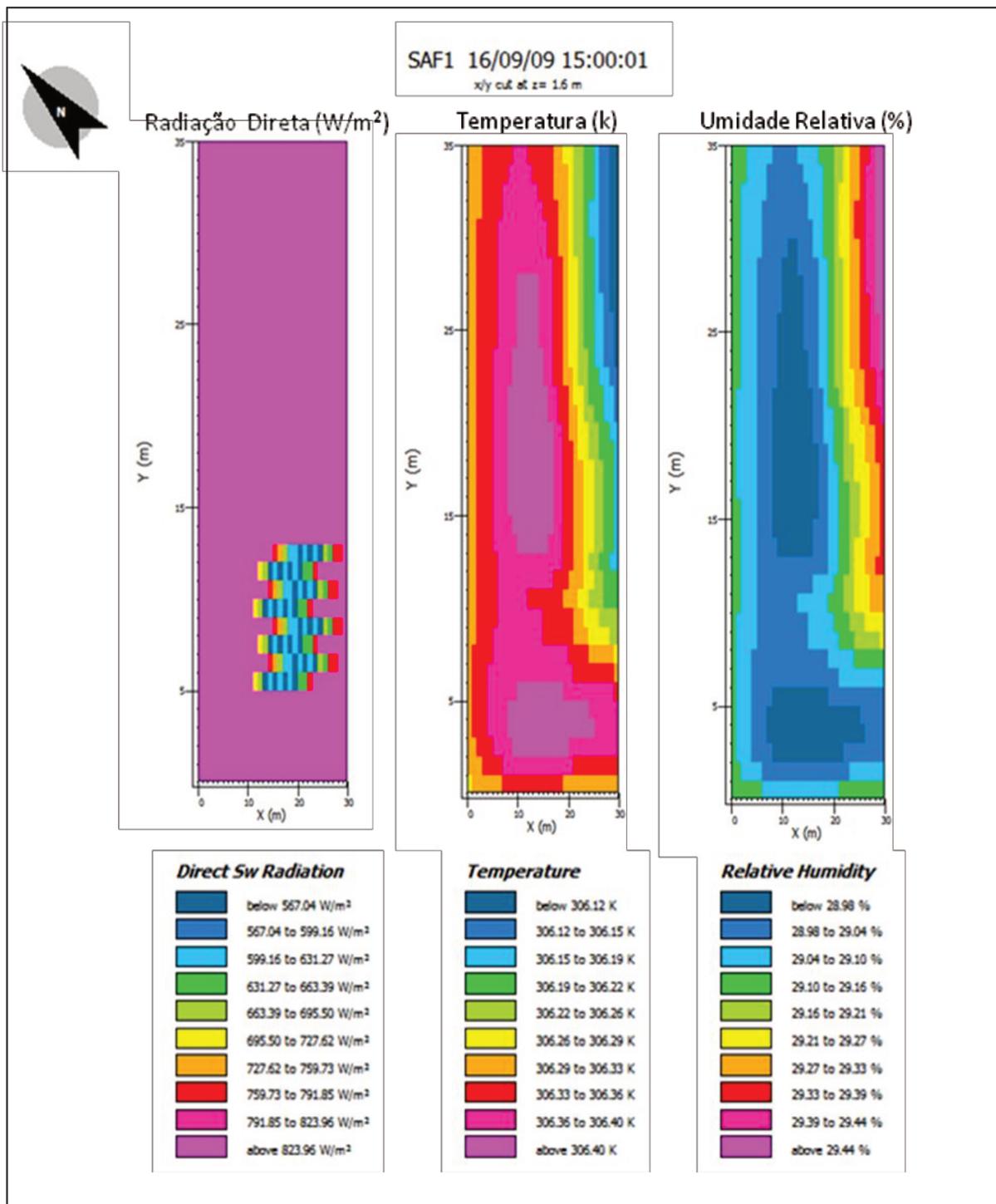


Figura 52 – Variáveis meteorológicas (radiação, temperatura e umidade relativa) no sistema SAF1, às 15 horas do dia 16/09/2009.

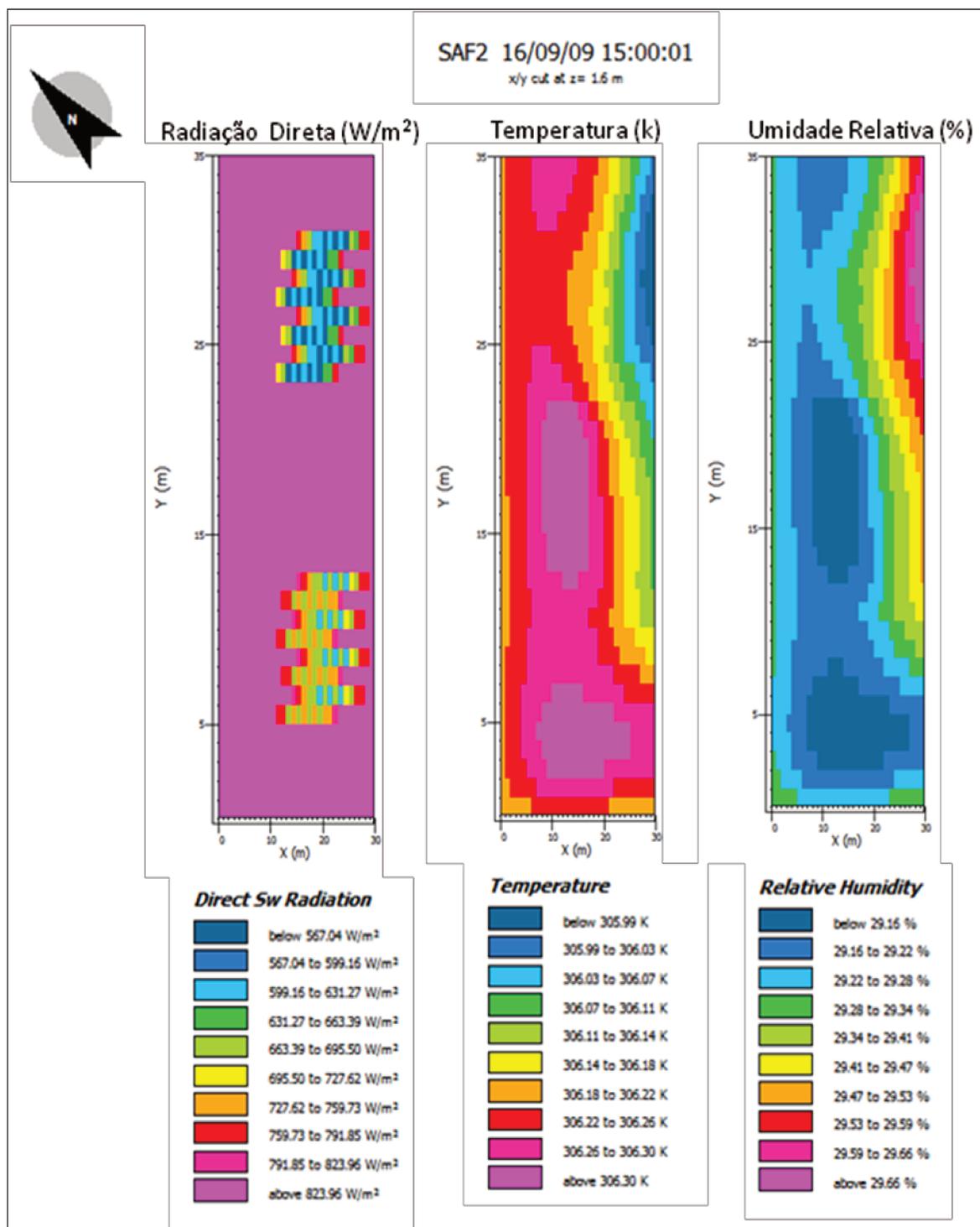


Figura 53 – Variáveis meteorológicas (radiação, temperatura e umidade relativa) no sistema SAF2, às 15 horas do dia 16/09/2009.

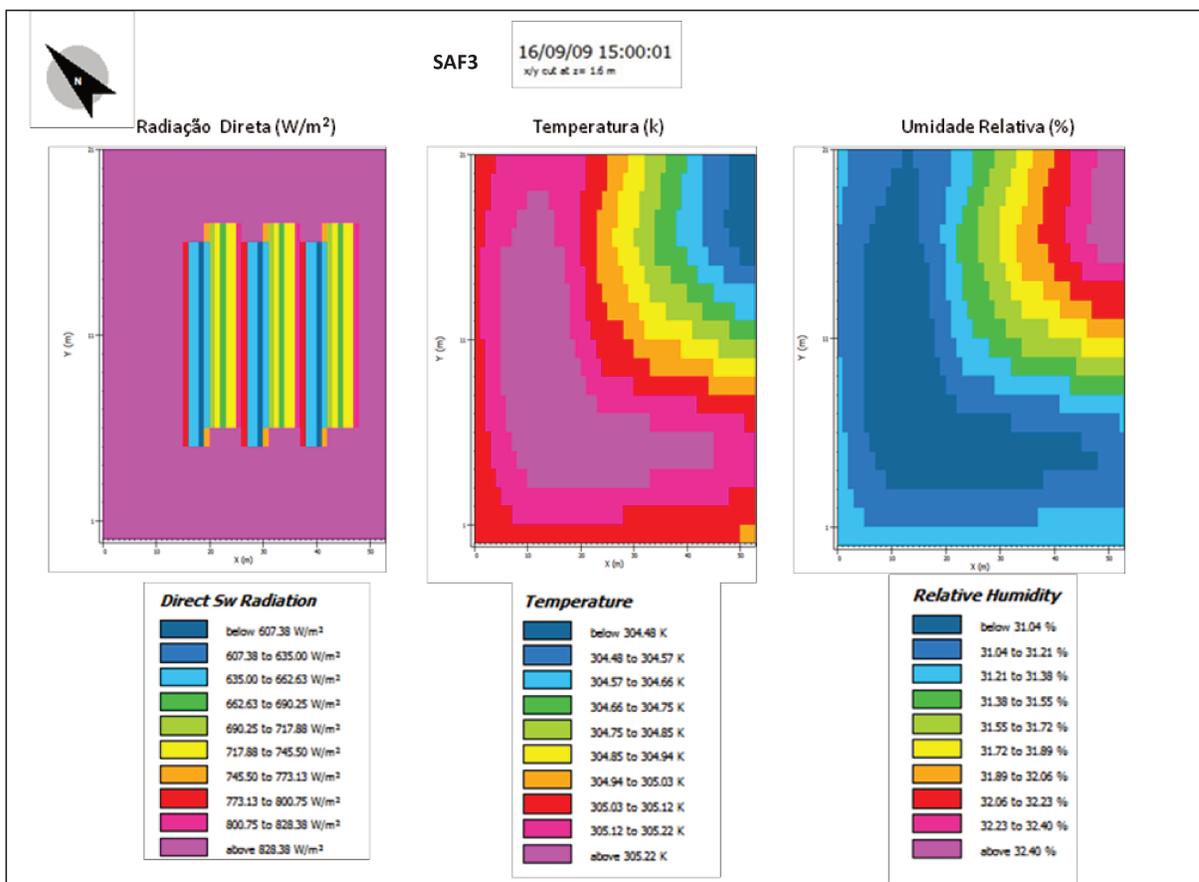


Figura 54 – Variáveis meteorológicas (radiação, temperatura e umidade relativa) no sistema SAF3, às 15 horas do dia 16/09/2009.

4.3. Quantificação do estoque de carbono atmosférico na biomassa das plantas de café como uma atividade de mitigação dos GEEs

4.3.1 Biomassa do café arábica cultivado em pleno sol e arborizado com macadâmia e a relação da biomassa com os parâmetros biofísicos do café

Através da análise destrutiva do café, verificou-se que as plantas de café da testemunha tinham, em média, 12,84kg de biomassa úmida por planta. Já, as plantas cultivadas no sistema arborizado, com macadâmia, apresentaram, em média, 14,061kg de biomassa úmida por planta.

O teste estatístico não-paramétrico de Mann–Withney demonstrou que as amostras foram diferentes ao nível de 5%, indicando que as plantas cultivadas no sistema arborizado com macadâmia (SAF3) apresentaram maior quantidade de biomassa úmida que as cultivadas

a pleno sol. Pode-se observar que essa diferença está relacionada, principalmente, à altura das plantas (h) e ao diâmetro da copa (dc). Vale ressaltar que os cafezais cultivados no sistema SAF3 apresentaram maior diâmetro da copa, mas não maior quantidade de folhas. As plantas de café do sistema SAF3, cultivado com macadâmia, apresentaram, em média, 0,7 metros a mais de altura, quando comparadas ao pleno sol. O diâmetro da copa das plantas arborizadas também foram, em média, 0,75 metros maiores que o pleno sol. As demais variáveis biofísicas (IAF e diâmetro do tronco) não diferiram estatisticamente.

Após a secagem em estufa com circulação forçada a 105°C foi possível observar que entre 56,7% e 62,0% da biomassa úmida do café arábica plantado com macadâmia (SAF3) era composta de água. Já para o café cultivado a pleno sol, essa porcentagem foi menor: 44% e 64%. Resultados semelhantes foram obtidos por COTTA et al. (2008) em seringueira, que encontraram que 52% da massa úmida da seringueira era composta de água.

O café plantado no sistema a pleno sol apresentou, em média, 5,09kg de biomassa seca por planta. Já as plantas de café cultivadas no sistema SAF3, com a cultura da macadâmia, apresentaram, em média, 5,65kg de biomassa seca, discordando da maioria dos dados de literatura. Embora DOSSA et al. (2008) exponha que a comparação de dados de biomassa medidos em campo, em diferentes sistemas de sombreamento, não permitem uma comparação adequada pela falta de semelhança entre os experimentos, a maioria dos estudos demonstra que plantas cultivadas em alto grau de sombreamento apresentam biomassa menor, quando comparadas a plantas cultivadas em pleno sol. DOSSA et al. (2008) encontraram biomassa de plantas de café menor em sistemas altamente sombreados (72% de sombreamento), indicando que o sombreamento elevado pode apresentar uma condição desfavorável para o crescimento do cafeeiro. LUNZ et al. (2007) observou a biomassa de cafeeiros 38 meses após o plantio com diferentes índices de radiação, e concluiu que a biomassa cresceu consideravelmente com o aumento da luminosidade. Os autores ainda ressaltam que cafeeiros cultivados com 30% de sombreamento apresentou quantidade de biomassa bem próxima à cultivada a pleno sol, sendo apenas 5% inferior. Resultados semelhantes de excesso de sombreamento foram encontrados por ARANGUREN et al. (1982); FASSBENDER et al. (1985); GLOVER e BEER (1986); BEER (1988).

Do peso total da biomassa das plantas de café cultivadas a pleno sol, em média, 24,06% foi composto por folhas, 21,16% de frutos; 26,80% de ramos e 27,98% de tronco. Já,

as plantas cultivadas no sistema SAF3 (com macadâmia) apresentaram menor quantidade de folhas e frutos, mas maior peso em tronco e ramos, quando comparados ao café cultivado a pleno sol. Do total da biomassa das plantas de café arborizadas, em média, 18,82% foi constituído de folhas, 17,93% de frutos, 27,11% de ramos e 36,13% de tronco. A porcentagem de biomassa em cada parte da planta pode ser observada na Figura 56. Dados semelhantes de proporção de folhas em plantas de café sombreadas foram encontrados por SEGURA et al. (2006).

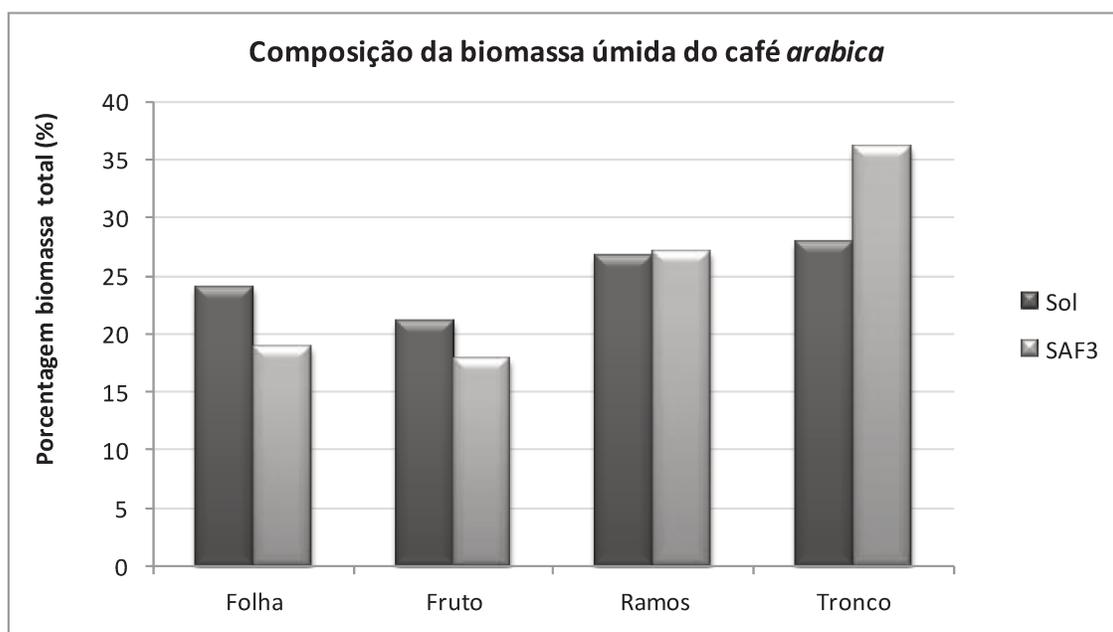


Figura 55- Composição da biomassa úmida, em porcentagem, das plantas de café cultivadas a pleno sol (cinza escuro) e no sistema SAF3 (cinza claro).

A porcentagem de folhas e frutos foi maior no café cultivado a pleno sol, concordando com os dados de LUNZ et al. (2007) e DOSSA et al. (2008), que também encontraram maior porcentagem de folhas e frutos nos cafezais cultivados com maior quantidade de radiação. Os autores explicam que essa diferença se deve à menor taxa de assimilação líquida das plantas com intenso sombreamento, uma vez que as plantas de café sombreadas ficam menos expostas a radiação, diminuindo a quantidade de produção de fotoassimilados. Nesse sentido, os dados da quantidade de folhas e frutos encontrados corroboram com DAMATTA et al. (2004) que expõe que cafezais com sombreamento superior a 20% podem apresentar queda na produção.

No presente experimento, o que mais pesou para a maior quantidade de biomassa seca das plantas arborizadas foi o tronco, uma vez que as plantas de café arborizadas eram mais altas que as cultivadas no sistema pleno sol. SEGURA et al. (2006) explica que, na maioria das vezes, os cafezais cultivados em sistemas agroflorestais, pela própria dificuldade de manejo, são submetidos a menor quantidade de tratos culturais, como poda, além de sofrerem menos com a queda de ramos e troncos, devido à menor quantidade de vento nesses sistemas. Nesse sentido, uma das explicações para o café cultivado com macadâmia apresentar maior quantidade de biomassa no tronco pode ser a quantidade de podas que esse sistema foi submetido, inferior ao sistema pleno sol, culminando na maior altura das plantas.

As análises químicas realizadas no LECO CR-412 demonstraram que, entre 47,5% e 50% da biomassa seca da planta de café (folha, ramos, tronco e fruto), era formada por carbono, corroborando com os dados da metodologia do IPCC (2006). As diferentes partes da planta não diferiram em relação a porcentagem, variando, também entre 47,5% e 50%. Assim, no trabalho, considerou-se que 50% da biomassa seca é formada de carbono.

As plantas de café no sistema a pleno sol sequestraram, em média, 2,55 kg de carbono por planta, o que significa um total de 10,38 MgC/ha (ou 10,38 tonC/ha). O tronco foi responsável pela maior parte do carbono (0,69kg de carbono/planta). Já, as plantas de café do tratamento SAF3 sequestraram, em média, 2,83kg de carbono por planta, o que significa um total de 10,65 MgC/ha. Também nesse sistema, o tronco foi responsável pela maior quantidade de carbono (1,02kg de carbono/planta). As plantas de macadâmia estocaram, em média, 1,9 tonC/ha. Assim, o tratamento SAF3 estocou, em média 12,55 MgC/ha, aproximadamente duas toneladas a mais que a testemunha (sol), por conta, principalmente das árvores de arborização, e não da diferença entre cafezais cultivados em pleno sol ou arborizados. A quantidade de carbono, por parte da planta de café, em cada tratamento, pode ser visualizada na Tabela 18.

Tabela 18 – Quantidade em kg de carbono estocado, em cada parte da planta de café, nos tratamentos a pleno sol e arborizado com macadâmia (SAF3).

Parte da Planta	Tratamento			
	Pleno Sol		SAF3	
	Peso Seco kg/planta	Carbono kg/planta	Peso Seco kg/planta	Carbono kg/planta
Folhas	1,21	0,60	1,07	0,54
Frutos	1,19	0,59	1,00	0,50
Ramos	1,32	0,66	1,54	0,77
Tronco	1,37	0,69	2,03	1,02
Total	5,09	2,55	5,65	2,83

A quantidade de carbono acima do solo em cafezais consorciados com macadâmia é superior, por exemplo, quando comparado a espécies como cacau plantado na Bahia (Cotta et al., 2008) que apresentaram, em média, 5,22Mg de carbono por hectare, e como uma área de regeneração de cinco anos em Rondônia (Rodrigues et al., 2000), que apresentaram, em média, 11,2Mg de carbono/ha. Por outro lado, é inferior quando comparado a seringueira, também na Bahia, (Cotta et al., 2008) de 34 anos de idade, que apresentaram, em média, 84,7Mg de carbono por hectare, e por uma floresta primária em Rondônia, que apresenta, em média, 148 MgC/ha (Rodrigues et al., 2000). Assim, é possível verificar que sistemas cafeeiros são capazes de reduzir o CO₂ da atmosfera, capturando e estocando-o em sua biomassa, corroborando com a hipótese de que cafezais são uma alternativa potencial para mitigação de gases de efeito estufa. Os sistemas arborizados, além de sequestrarem maior quantidade de carbono, podem representar uma oportunidade para o setor cafeeiro comercializar créditos de carbono florestal, principalmente pela adicionalidade das árvores ao sistema.

A partir dos dados biofísicos coletados em campo, foi possível fazer uma análise de regressão múltipla para estimar a biomassa úmida do cafeeiro plantado a pleno sol e arborizado, evitando, assim, o protocolo destrutivo. As equações ajustadas são apresentadas na Tabela 19. O teste estatístico de correlação entre os valores estimados e reais foi significativo para ambos os tratamentos: pleno sol ($r^2 = 0,77$) e SAF3 ($r^2 = 0,76$).

Tabela 19 – Equações de estimativa da biomassa em cafezais cultivados a pleno sol e arborizados com macadâmia obtidas a partir de dados biofísicos da cultura.

Equação (Modelo)	Parâmetros	R ²
Café Pleno sol $y = A0 + A1 * x1 + A2 * x2 + A3 * x3 + A4 * x4$	A0 = -30,33796; A1 = 35,84417; A2 = -2,90639; A3 = -24,71786 e A4 = 0,35797	0,77
Café Arborizado com macadâmia (SAF3) $y = A0 + A1 * x1 + A2 * x2 + A3 * x3 + A4 * x4$	A0 = 8,94415; A1 = 80,48169; A2 = 3,82467; A3 = -0,77203 e A4 = -6,79606	0,76

Para a equação Pleno Sol: **x1**- Altura da planta, em metros (h); **x2** – Índice de Área Foliar (IAF); **x3**- Diâmetro do tronco (dt), em metros e, **x4** – Diâmetro da copa (dc), em metros. Para a equação do café arborizado com macadâmia (SAF3): **x1**- Diâmetro do Tronco (dt), em metros; **x2** – Altura, em metros (h); **x3**- Índice de área Foliar (IAF); **x4** – Diâmetro da copa, em metros.

4.3.2. Equação para estimativa da biomassa do café por sensoriamento remoto (imagens de alta resolução)

A Tabela 20 apresenta a correlação entre os parâmetros biofísicos medidos nas plantas de café amostradas e os dados do NDVI. É possível verificar uma forte correlação entre os dados da biomassa (úmida e seca) e o NDVI (0,835, p-valor 0,000; e, 0,885, p-valor: < 0,0001, respectivamente). Por outro lado, os resultados mostram uma baixa correlação de Pearson entre altura (h), IAF, circunferência do tronco (ct) e circunferência da copa (cc) com NDVI. RAMIREZ (2010) também não encontrou correlação forte com as bandas e os índices de vegetação dos satélites de alta resolução Quickbird e Landsat.

Tabela 20 - Correlação de Pearson entre os parâmetros biofísicos dos exemplares de café e dados de NDVI. Valores em negrito são diferentes de 0 com um nível de significância alpha =0,05.

Parâmetro Biofísico	Correlação	p-valor	R ²
Biomassa Úmida	0,835	0,000	0,698
Biomassa Seca	0,885	< 0,0001	0,782
Altura (h)	0,033	0,915	0,001
IAF	0,123	0,688	0,015
Circunferência do tronco (ct)	0,049	0,875	0,002
Circunferência da copa (cc)	0,018	0,953	0,000

COUVRE (1989), analisando a relação entre a banda 4 do Landsat e as características biofísicas de citrus, encontrou correlação significativa fraca (-0,216). As características do plantio de citrus são muito próximas às de café e, nesse trabalho, o autor justificou a baixa correlação pelo aumento da proporção de sombras no talhão sendo que as sombras influenciaram significativamente no sinal registrado pelo sensor alterando, por consequência, a refletância do talhão, à medida que o porte das árvores aumenta. Assim, RAMIREZ (2010) explica que a diminuição da refletância causada pelo aumento das sombras é diretamente proporcional ao decréscimo da refletância causado pelo aumento de fitomassa, o que pode ter influenciado nos dados, resultando em uma baixa correlação.

A correlação da biomassa com o NDVI, no entanto, apresentou resultados superiores aos esperados. RAMIREZ e ZULLO JUNIOR (2010) encontraram correlação entre algumas bandas dos satélites Quickbird e Landsat com a biomassa estimada do café arábica, mas não encontraram correlação alta com o NDVI. BOX et al. (1989) encontrou correlação entre NDVI e IAF de 0,2, e de 0,34 entre NDVI e biomassa. Assim, é possível concluir que o NDVI do satélite Geoeye-1 é um bom estimador da biomassa do café arábica ao nível do solo. Resultados semelhantes também foram encontrados por SADER et al. (1990) em áreas de sucessão secundária, que tem característica espectral semelhante ao café. No entanto, os autores ressaltam que as melhores correlações aconteceram nas áreas de início de sucessão, onde havia valores mais baixos de biomassa.

Por meio da análise hierárquica de clusters, escolheram-se os parâmetros altura (h) e circunferência do tronco (ct) para compor a fórmula de estimativa de biomassa com o NDVI. Normalmente, quanto maior a quantidade de variáveis empregada em um modelo, melhores tendem a ser as estimativas encontradas (SEGURA et al., 2006). No entanto, aumenta-se os problemas de co-linearidade (SALDARRIAGA et al. 1994). Para SEGURA et al. (2006), em termos práticos, quanto menor a quantidade de variáveis necessárias e quanto mais fácil sua coleta, maior a probabilidade de sucesso do modelo.

A análise hierárquica de clusters corrobora com os dados de SEGURA et al. (2006) que encontrou que, em plantas de café, a altura (h) e o diâmetro do tronco (d) explicaram 82% e 94%, respectivamente, da biomassa total acima do solo. Os modelos que utilizam esses parâmetros, segundo os autores, normalmente apresentam alta acurácia para estimar a biomassa. Muitos autores (BARTELINK 1996; CLOUGH e SCOTT 1989; KANNINEN e

PEREZ 2002; SEGURA e KANNINEN 2005) vêm utilizando a altura (h) e o diâmetro (dap) para desenvolverem equações de estimativa de biomassa em diversos ecossistemas.

SEGURA et al. (2006) ainda ressaltam que modelos com essas variáveis biofísicas tendem a ter bons resultados pela facilidade de coleta de dados que as variáveis exigem. No entanto, vale ressaltar que o uso desses modelos em diferentes condições edafo-climáticas e com uma variação muito grande de altura (h) e diâmetro (dap) exigem, ainda segundo os autores, validação local. Além disso, os autores ainda ressaltam a importância do conhecimento prévio dos tratos culturais no café antes da aplicação de qualquer equação de estimativa de biomassa. Normalmente, cafezais com alta quantidade de podas, ou que tenham recebido podas drásticas, apresentam correlação baixa entre as variáveis biofísicas, altura (h) e diâmetro, com biomassa.

A equação de estimativa de biomassa é apresentada na Equação 9. A biomassa é expressa em kg/planta, a altura (h) e a circunferência do tronco (ct) em metros. O NDVI é um valor adimensional.

$$\text{Biomassa seca} = - 6,52069 + (0,66677*h) + (0,18813*ct) + (11,67495*NDVI) \quad (9)$$

Os dados da biomassa seca estimada e da medida pelo método destrutivo são apresentados na Tabela 21. A Figura 57 apresenta o gráfico de biomassa estimada por biomassa seca. A correlação entre os dados da biomassa estimada com a biomassa seca medida foi de 0,9 (com p-valor < 0,0001 e $R^2 = 0,810$), demonstrando que a equação desenvolvida é um ótimo estimador para a biomassa do café na região de estudo. Além disso, o modelo é muito prático, uma vez que as variáveis são de coleta possível. Dado que a imagem é de alta resolução espacial, um cafeeiro ocupa mais de um pixel. Assim, o NDVI do modelo de estimativa de biomassa (Equação 9) é uma média do NDVI dos pixels que a árvore ocupa. Vale ressaltar, ainda, o cuidado com esse modelo em épocas de alta quantidade de chuva, onde as plantas de café apresentam pleno crescimento. Nessa fase, o NDVI tende a saturar, e, portanto, invalidar o modelo. A correlação de Pearson entre os dados de carbono (50% da biomassa seca) e NDVI foi de 0,88 ($p = < 0,0001$ and $R^2 = 0,782$), mostrando que é viável estimar o estoque de carbono nas plantas de café arábica utilizando a equação de estimativa de biomassa descrita acima.

Tabela 21 – Biomassa seca medida por método destrutivo (kg/planta) e biomassa estimada pela equação 9 (em kg/planta).

Biomassa (em kg/planta)	
Seca	Estimada
5,21	5,82
4,60	4,46
7,36	6,44
5,02	5,74
4,50	3,93
3,75	4,07
5,77	6,21
4,82	5,10
4,65	4,89
6,51	6,20
5,53	5,51
6,58	6,09
3,45	3,30

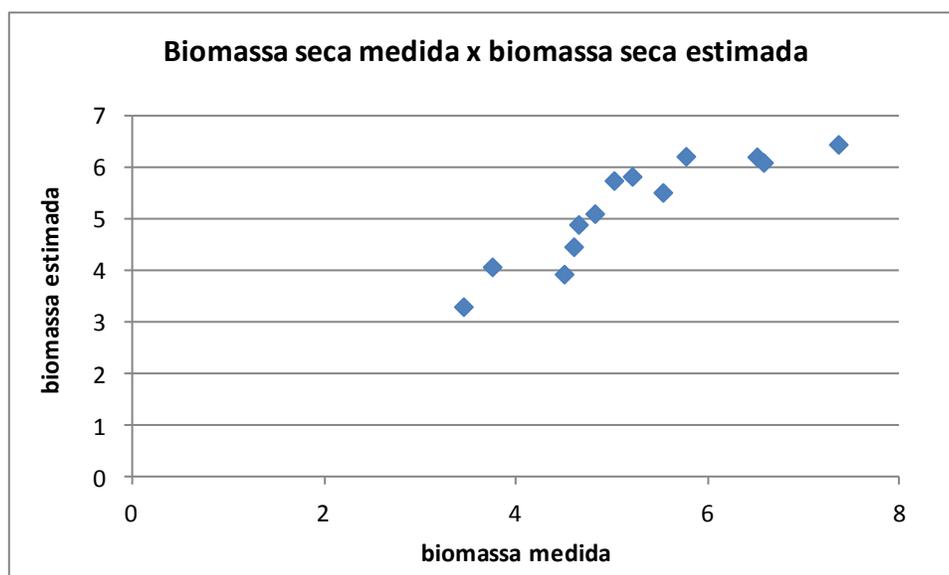


Figura 56 – Biomassa seca por método destrutivo (eixo X) e biomassa estimada pela equação 4 (eixo Y).

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho conclui-se que:

1. Para a região de estudo, os dados do *baseline* do modelo ETA/CPTEC subestimaram os dados reais de temperaturas máximas e superestimaram os valores reais de temperaturas mínimas, médias e a precipitação. No entanto, o modelo representa com fidelidade a sazonalidade da temperatura média e da precipitação, mostrando-se viável para utilizações em trabalhos agrometeorológicos;
2. A maioria dos municípios estudadas se tornarão de alto risco climático para o cultivo do café arábica, já na primeira metade do presente século, nos cenários climáticos futuros de maior emissão de gases de efeito estufa (*medi* e *high*), indicando que a cultura necessitará de atividades de adaptação e mitigação para continuar produzindo economicamente nessa região;
3. Cafezais arborizados com macadâmia, leucena, gliricidia e feijão guandú, nesses esquemas e arranjos de plantio (em renque), apresentam temperaturas mensais inferiores que os cultivados a pleno sol, mas temperaturas horárias superiores no período mais quente do dia, além de apresentarem menor quantidade de vento. Embora as temperaturas mensais do café com maior quantidade de sombras tenham sido inferiores, a magnitude da diferença (0,6°C) aliada a menor velocidade dos ventos não faz dessa prática uma medida de adaptação aos cenários climáticos mais quentes projetados pelo modelo ETA/CPTEC;
4. O software Envi-Met pode ser utilizado para simular o microclima de cultivo de café em dias secos e sem nebulosidade;
5. A interação entre dados micrometeorológicos do cultivo de café coletados em campo e dados de modelagem/simulação no software Envi-Met apresentou resultados melhores e permitiu análises mais completas em comparação ao uso de dados apenas de campo ou apenas de modelagem e simulação;
6. A cultura do café sequestra carbono atmosférico e tem um alto potencial como atividade de mitigação de GEEs;

7. O sistema de cafezais arborizados com macadâmia sequestraram, em média, duas toneladas a mais de carbono que os cafezais a pleno sol. O estoque adicional ocorreu por conta das árvores de macadâmia. Esse sistema apresenta um potencial maior de mitigação de GEEs do que o pleno sol, além da possibilidade de gerar renda adicional ao produtor;
8. Índice de vegetação NDVI em imagens de satélite de alta resolução e parâmetros biofísicos da cultura do café arábica podem ser utilizados na estimativa de biomassa seca, úmida e estimativa de carbono, evitando, assim, a utilização do protocolo destrutivo;
9. Em uma situação climática diferente da atual, e possivelmente mais quente, conforme projetado pelos cenários futuros do modelo ETA/CPTEC, a continuidade da produção do café arábica na região do sul de Minas Gerais e norte de São Paulo necessitará de adaptação e de atividades que mitiguem o excesso de CO₂ atmosférico.

ANEXOS



Figura 58- Fotografias campo

Tabela 22 - Comparação da média da temperatura, com o teste t de Student, nos diferentes sensores do sistema SAF1. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.

Temperatura SAF1											
0h			1h			2h			3h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
E	a	18,11	E	a	17,50	E	a	16,94	E	a	16,43
D	a	18,10	D	a	17,49	D	a	16,93	D	a	16,42
A	a	18,10	A	a	17,49	A	a	16,92	A	a	16,41
C	a	18,10	C	a	17,48	C	a	16,92	C	a	16,41
B	a	18,09	B	a	17,47	B	a	16,91	B	a	16,40
4h			5h			6h			7h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
E	a	15,98	E	a	15,56	E	a	15,19	E	a	15,35
D	a	15,96	D	a	15,55	D	a	15,17	D	a	15,34
A	a	15,96	A	a	15,54	A	a	15,16	C	a	15,33
C	a	15,95	C	a	15,54	C	a	15,16	A	a	15,33
B	a	15,94	B	a	15,53	B	a	15,15	B	a	15,32
8h			9h			10h			11h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
D	a	18,82	C	a	22,59	B	a	25,84	A	a	28,22
E	a	18,82	B	a	22,58	A	a	25,83	B	a	28,22
C	a	18,82	D	a	22,58	C	a	25,83	C	a	28,20
B	a	18,81	E	a	22,57	D	a	25,81	D	a	28,18
A	a	18,79	A	a	22,56	E	a	25,79	E	a	28,16
12h			13h			14h			15h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
A	a	29,93	A	a	30,96	A	a	31,30	B	a	30,81
B	a	29,92	B	a	30,96	B	a	31,30	C	a	30,81
C	a	29,91	C	a	30,95	C	a	31,29	D	a	30,81
D	a	29,89	D	a	30,94	D	a	31,28	A	a	30,81
E	a	29,87	E	a	30,92	E	a	31,27	E	a	30,80
16h			17h			18h			19h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
B	a	29,49	C	a	27,19	A	a	24,45	A	a	23,08
C	a	29,49	B	a	27,19	B	a	24,43	B	a	23,07
D	a	29,49	D	a	27,19	C	a	24,43	C	a	23,06
A	a	29,48	A	a	27,19	D	a	24,42	D	a	23,06
E	a	29,48	E	a	27,18	E	a	24,42	E	a	23,06
20h			21h			22h			23h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
A	a	22,16	A	a	21,39	E	a	20,69	E	a	20,02
B	a	22,15	D	a	21,38	A	a	20,68	D	a	20,01
C	a	22,15	E	a	21,38	D	a	20,68	A	a	20,01
D	a	22,15	C	a	21,38	C	a	20,68	C	a	20,00
E	a	22,15	B	a	21,38	B	a	20,67	B	a	20,00

Tabela 23 - Comparação de média da temperatura, com o teste t de Student, nos diferentes sensores do sistema SAF2. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.

Temperatura SAF2											
0h			1h			2h			3h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
E	a	18,11	E	a	17,51	E	a	16,95	E	a	16,45
A	a	18,10	A	a	17,50	A	a	16,94	A	a	16,43
D	a	18,10	D	a	17,49	D	a	16,93	D	a	16,42
B	a	18,09	C	a	17,48	B	a	16,92	C	a	16,42
C	a	18,09	B	a	17,48	C	a	16,92	B	a	16,42
4h			5h			6h			7h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
E	a	16,00	E	a	15,59	E	a	15,22	E	a	15,38
A	a	15,98	A	a	15,57	A	a	15,19	D	a	15,36
D	a	15,97	D	a	15,56	D	a	15,19	A	a	15,36
B	a	15,96	C	a	15,55	B	a	15,18	B	a	15,35
C	a	15,96	B	a	15,55	C	a	15,18	C	a	15,35
8h			9h			10h			11h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
C	a	18,79	C	a	22,54	A	a	25,77	A	a	28,15
B	a	18,79	B	a	22,54	B	a	25,77	B	a	28,14
D	a	18,78	A	a	22,53	C	a	25,75	C	a	28,12
A	a	18,77	D	a	22,52	D	a	25,74	D	a	28,10
E	a	18,75	E	a	22,47	E	a	25,67	E	a	28,05
12h			13h			14h			15h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
A	a	29,85	A	a	30,88	A	a	31,21	C	a	30,72
B	a	29,84	B	a	30,87	B	a	31,20	B	a	30,72
C	a	29,83	C	a	30,86	C	a	31,20	A	a	30,71
D	a	29,81	D	a	30,85	D	a	31,19	D	a	30,71
E	a	29,77	E	a	30,81	E	a	31,16	E	a	30,68
16h			17h			18h			19h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
C	a	29,40	C	a	27,12	A	a	24,40	A	a	23,04
B	a	29,40	B	a	27,12	B	a	24,38	B	a	23,02
A	a	29,39	A	a	27,11	C	a	24,37	C	a	23,02
D	a	29,39	D	a	27,11	D	a	24,37	E	a	23,02
E	a	29,37	E	a	27,10	E	a	24,37	D	a	23,01
20h			21h			22h			23h		
Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media	Sensor	Dif. Estat	Media
A	a	22,13	A	a	21,37	E	a	20,66	E	a	20,00
B	a	22,12	E	a	21,36	A	a	20,66	A	a	19,99
E	a	22,11	B	a	21,35	B	a	20,65	D	a	19,99
D	a	22,11	D	a	21,35	D	a	20,65	B	a	19,98
C	a	22,11	C	a	21,35	C	a	20,64	C	a	19,98

Tabela 24 - Comparação de média da temperatura, com o teste t de Student, nos diferentes sensores do sistema SAF3. Letras diferentes significam diferenças estatísticas.

Temperatura SAF3											
0h			1h			2h			3h		
Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média
A	a	17,64	A	a	17,04	A	a	16,50	A	a	16,01
B	a	17,56	B	a	16,97	B	a	16,43	B	a	15,94
C	a	17,52	C	a	16,93	C	a	16,39	C	a	15,90
D	a	17,50	D	a	16,92	D	a	16,38	D	a	15,89
4h			5h			6h			7h		
Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média
A	a	15,55	A	a	15,14	A	a	14,76	A	a	14,88
B	a	15,49	B	a	15,08	B	a	14,72	B	a	14,85
C	a	15,46	C	a	15,05	C	a	14,68	D	a	14,84
D	a	15,45	D	a	15,04	D	a	14,67	C	a	14,83
8h			9h			10h			11h		
Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média
A	a	18,07	A	a	21,80	A	a	24,93	A	a	27,26
D	a	18,04	B	a	21,63	B	a	24,68	B	a	26,96
B	a	18,01	D	a	21,55	C	a	24,54	C	a	26,76
C	a	17,99	C	a	21,54	D	a	24,48	D	a	26,67
12h			13h			14h			15h		
Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média
A	a	28,98	A	a	29,97	A	a	30,22	A	a	29,66
B	a	28,68	B	a	29,68	B	a	29,99	B	a	29,51
C	a	28,47	C	a	29,48	C	a	29,80	C	a	29,35
D	a	28,36	D	a	29,37	D	a	29,70	D	a	29,28
16h			17h			18h			19h		
Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média
A	a	28,31	A	a	26,07	A	a	23,51	A	a	22,25
B	a	28,24	B	a	26,07	B	a	23,45	B	a	22,17
C	a	28,13	C	a	26,03	C	a	23,43	C	a	22,13
D	a	28,08	D	a	26,01	D	a	23,42	D	a	22,12
20h			21h			22h			23h		
Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média	Sensor	Dif. Estat	Média
A	a	21,38	A	a	20,65	A	a	19,95	A	a	19,30
B	a	21,29	B	a	20,55	B	a	19,87	B	a	19,22
C	a	21,25	C	a	20,51	C	a	19,82	C	a	19,17
D	a	21,24	D	a	20,50	D	a	19,81	D	a	19,17

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMI, M.; MOREIRA, M.A.; RUDORFF, B.F.T.; FREITAS, C. da C. Análise da eficiência dos estimadores de expansão direta e de regressão par a áreas cultivadas com café, milho e soja no município de Cornélio Procópio, estado do Paraná. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v.51, n.2, p.5-13, jul./dez., 2004.
- ADAMS, R.M.; HURD, B.H.; LENHART, S.; LEARY, N. Effects of global climate change on agriculture: an interpretative review. **Climate Research**, Germany, v.11, p.19-30, dez., 1998.
- ANDRADE, H.J.; IBRAHIM, M. ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?. **Agroforestería en las Américas**, vol.10, n. 39-40, 2003.
- ALEGRE C. Climates et caféiers d'Arabie. **Agronomie Tropicale**. v. 14, s/n., p. 23-58.1959.
- ARANGUREN J., ESCALANTE G., HERRERA R. Nitrogen cycle of tropical perennial crops under shade trees. I. Coffee. **Plant and Soil**, Netherlands, vol. 67, n., p.247-258, 1982.
- ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J.; ÁVILLA, A.M.H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n.11, p. 1057-1064, nov., 2004.
- BABBAR, L.; ZAK D. Nitrogen loss from coffee agroecosystems in Costa Rica. Leaching and denitrification in the presence and absence of shade trees. **Journal of Environmental Quality**, v.24, n. 2, p. 227-233, 1995.
- BACK, A. J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.5, p.717-726, mai., 2001.
- BAPTISTA, G.M.M. Mapeamento do sequestro de carbono e de domus urbanos de CO2 em ambientes tropicais, por meio de sensoriamento remoto Hiperespectral. **Geografia**, Rio Claro, v.29, n.2, p.189-202, mai/ago., 2004.
- BATISTA, G.T. ; DALLEMAND, J.F. ; TARDIN, A.T.; CHEN, S.C. Avaliação de Dados SPOT HRV e Landsat TM na Discriminação de Culturas Agrícolas. **Revista Agropecuaria Brasileira**, v. 25, n. 3, p. 379-386, 1990
- BARRADAS, V.L.; FANJUL, L. Microclimatic characterization of shaded and open-grow coffee (*Coffea Arábica* L.) plantations in Mexico. **Agricultural and Forest Meteorology**, Netherlands, v. 38, n.1-3, p.101-112, out.,1986.
- BARTELINK H.H. Allometric relationships on biomass and needle area of Douglasfir. **Forest Ecology and Management**, v.86, n1-3, p.193-203, out.,1996.
- BEER,J.; MUSCHLER, R.; KASS, D.; SOMARRIBA, E. Shade management in coffee and cacao plantations. **Agroforestry Systems**, Netherlands, v.38, n.1-3, p.139-164, jul., 1998.

BISON, M. **Simulazione del microclima urbano di Milano mediante Il software ENVI-met**. 104p. Tese (Doutorado Arquitetura), VI Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Milano, 2010.

BLAIN, G.C. Considerações estatísticas relativas a seis séries mensais de temperatura do ar da secretaria da agricultura e abastecimento do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.26, n.2, 279 - 296, jun., 2011.

BOUMAN, B.A.M., VAN KEULEN, H., VAN LAAR, H.H, RABBINGE R., The 'School of de Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. **Agric Systems**, United Kingdom, v. 52, n.2, p.171–198, jun., 1996.

BOX, E.O.; HOLBEN, E.N.; KALB,V. Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO2 flux. **Plant Ecology**, Netherlands, v.80, n.2, p.71-89, jun., 1989.

BRENNER, A.J. Microclimatic modifications in agroforestry. In: ONG, C.K.; HUXLEY, P. (Ed.). **Tree-crop interactions – A physiological approach**. Cambridge: University Press, Cap.5, p. 159-188, 1996.

BROCKHAUS, J.A., KHORRAM, S. A comparison of Spot and Landsat-TM data for use in conducting inventories of forest resources. **International Journal of Remote Sensing**, United Kingdom, v. 13, n.16, p.3035–3043, 1992.

BROW, K.V.; ROSENBERG, N.J. Shelter-effects on microclimate, growth and water use by irrigated sugar beets in the great plains. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v.9, p.241-263, 1972.

BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. **Environmental Modelling and Software**, Netherlands, v. 13, n.1-3, p.373–384, out.,1998.

CAMARGO, A.P. **Zoneamento de aptidão climática para a cafeicultura de arábica e robusta no Brasil**. In: Fundação IBGE, recursos, meio ambiente e poluição. 1977. p.68-76.

CAMARGO, A.P. O clima e a cafeicultura no Brasil. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 11, n. 126, p. 13- 26, jun. 1985a.

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

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

CAMARGO, A.P.; FRANCO, C.F. Clima e fenologia do Cafeeiro. In: **Cultura de café no Brasil: manual de recomendações**. 5ªed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, Ministério da Indústria e Comercio, 1985. P. 19-50.

CAMARGO, A.P.; PEREIRA, A.R. Agrometeorology of coffee crop. World Meteorological Organization. Geneva:WMO/TD, 1994. N.615, 43p.

CAMARGO, A.P.; SALATI, E. Determinação da temperatura letal de folhagem de cafeeiro em noite de geada. **Bragantia**, Campinas, v.25, s/n, p.61-63, 1966.

CAMPANHA, M.M.; SANTOS, R.H.S.; FREITAS, G.B.; MARTINEZ, H.E.P.; GARCIA, S.L.R.; FINGER, F.L. Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. **Agroforestry Systems**, Netherlands, v.63, n.1, p.75-82, jan., 2004.

CAMPOS, D.C. de. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para sequestro de carbono**. Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2003. Piracicaba, SP, 103p. 2003

CARAMORI, P. H.; OMETTO, J. C.; VILLA NOVA, N. A.; COSTA, J. D. Efeitos do vento sobre mudas de cafeeiro Mundo Novo e Catuaí Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 21, n. 11, p. 1113-1118, 1986.

CARAMORI, P.H.; ANDROCIO FILHO, A.; LEAL, A.C. Coffee shade with *Mimosa scabrella* Benth for frost protection in southern Brazil. **Agroforestry Systems**, Netherlands, v.33, n.3, p. 205-214, mar.,1996.

CARAMORI, P.H.; MANETTI FILHO, J. **Proteção dos cafeeiros contra geadas**. 27p. Circular Técnico n°79, IAPAR, 1993.

CAYA, D.; BINER, S. Internal variability of RCM simulations over an annual cycle. **Clim Dyn**, Germany, v.22, n.1, p.33-46, jan.,2004.

CERQUEIRA, D.B.; FRANCA-ROCHA, W. de J.S. Relação entre tipos de vegetação e fluxo de CO₂ no Bioma Caatinga: Estudo de caso em Rio Contas- BA. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007, Florianópolis. **Anais...**, Florianópolis: INPE, p. 2413-2419, 2007.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; CERRI, C.E.P.; FELLER, C. Carbon cycling and sequestration opportunities in South America: the case of Brazil. **Soil Use and Management**, United Kingdom, v.20, p.248-254, jun.,2004.

CERRI, C.E.P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W.E.; MELILLO, J.M.; CERRI C.C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.64, n.1, p.83-89, jan/fev.,2007.

CERRI, C. C.; MAIA, S. M. F. et al. Brazilian Greenhouse Gas Emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, n.6, p.831-843, Nov/dez., 2009.

CHAVES, A.R.M.; TEN-CATEN, A.; PINHEIRO, H.A.; RIBEIRO, A.; DAMATTA, F.M. Seasonal changes in photoprotective mechanisms of leaves from shaded and unshaded field-grown coffee (*Coffea arabica* L.) trees. **Trees - Structure and Function**, Germany, v.22, n.3, p. 351-361, jun., 2008.

CHOU, S.C.; NUNES A.M.B.; CAVALCANTI, I.F.A. Extended range forecasts over South America using the regional Eta model. **J Geophys Res.**, United States, v.105, n.D8, p.10147-10160, jan., 2000.

CHOU, S.C.; MARENGO, J.A.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J.F.; ALVES, L.M.; KAY, G.; BETTS, R. CHAGAS, D.J., GOMES, J.L. et al. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, Germany, vol.38, n 3-4, p.635-653, fev., 2011.

CLOUGH, B.F.; SCOTT, K. Allometric relationships for estimating above-ground biomass in six mangrove species. **Forest Ecology and Management**, Netherlands, v. 27, n.2, p.117-127, mai., 1989.

COLOMBO, R.; BELLINGERI, D.; FASOLINI, D.; MARINO, C.M. Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. **Remote Sensing of Environment**, Netherlands, v.86, n. 1, p.120-131, mar., 2003.

COLOZZI-FILHO, A.; BALOTA, E.L.; ANDRADE, D.S. Microorganismos e processos biológicos no sistema de plantio direto In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES.A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E. e CARVALHO, J.C., eds. Interrelação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas, Lavras, Viçosa:SBCS, Lavras, Universidade Federal de Lavras, 1999. p.487-508.

CORDERO, P.L.D.; KANNINEN, M. Wood specific gravity and aboveground biomass of *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v.165, n.1-3, p.1-9, jul.,2002.

CORDERO-SANCHO, S.; SADER, S.A. Spectral Analyses and Classification Accuracy of Coffee Crops using Landsat and a Topographic-Environmental Model, **International Journal of Remote Sensing**, United Kingdom, v. 28, n.7 p. 1577-1593, nov., 2005.

COSTE, R. **Coffee: The Plant and the Product**. London, MacMillan, 1992.

COTTA, M.K. et al. Quantificação de biomassa e geração de certificados de emissões reduzidas no consórcio seringueira-cacau. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 969-978, dec., 2008.

COUVRE, M. **Influência de parâmetros culturais de citros sobre os dados TM/LANDSAT**. 1989. 241p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 1989.

CUNHA, G.R.; ASSAD, E.D. Uma visão geral do número especial da RBA sobre zoneamento agrícola no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3, (Nº Especial: Zoneamento Agrícola), p.377-385, 2001.

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, pp.93-135. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

DAMATTA, F.M. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. **Field Crops Research**, Netherlands, v.86, n.1-2, p. 99–114, mar., 2004.

DAMATTA, F.M.; RONCHI, C.P.; MAESTRI, M.; BARROS, R. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal Plant Physiology**, Rio de Janeiro, v. 19, n.4, p. 485-510, dez., 2007.

DE JONG, H.J.; SOTO-PINTO, L.; MONTOYA-GOMEZ, G.; NELSON, K., TAYLOR, J.TIPPER. **Forestry and agroforestry landuse systems for carbon mitigation: an analysis in Chiapas, Mexico**. In: Adger WN, Pettenella D, Whitby M (eds), *Climate-change mitigation and European land-use policies*. CAB International, Wallingford, pp 269–284, 1997.

DEFRIES, R.S.; HOUGHTON, R.A.; HANSEN, M.C.; FIELD, C.B.; SKOLE, D. TOWNSHEND, J. Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for 1980s and 1990s. **PNAS**, United States, v.99, n.2, pp. 14256–14261, out., 2002.

DICKINSON, R.; ERRICO, R.; GIORGI, F.; BATES, G. A regional climate model for the western united states. **Climatic Change**, Netherlands, v.15, n.3, p.383–422, dez.,1989.

DIXON, R.K. Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases? **Agroforest System**, Netherlands, v.31, n.2, p. 99–116, ago.,1995.

DOSSA, E.L.; FERNANDES, E. C. M.; REID, W. S.; EZUI, K. Above- and belowground biomass, nutrient and carbon stocks contrasting an open-grown and a shaded coffee plantation. **Agroforest Syst.**, Netherlands, v.72, n.2, p.103–115, jun., 2008.

DRINNAN, J.E.; MENZEL, C.M. Temperature affects vegetative growth and flowering of coffee (*Coffea arabica* L.). **Journal of Horticultural Science**, United Kingdom, v.70, s/n, p.25-34, 1995.

DUARTE, D. H. S.; SPANGENBERG, J.; JOHANSSON, E. ; SHINZATO, Paula. Simulation of the influence of Vegetation on Microclimate and Thermal Comfort in The city of São Paulo. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v. 3, n.1, p.1-19, 2008.

EPIPHANIO, J.C.N.; LEONARDI, L.; FORMAGGIO, A.R. Relações entre parâmetros culturais e resposta espectral de cafezais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.3, p.379-386, 1994.

FAGNANI, M.A. **Características micrometeorológicas observadas em cafeeiros em noites sujeitas a geada de irradiação**. 113p. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1985.

FAGUNDES, J. D.; STRECK, N.A., BISOGNIN, D.A.; SCHWANTES, A.P.; ALBERTO, C.M. Produtividade simulada de tubérculos de batata em cenários de mudanças climáticas. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 45, n. 4, p.351-360, abr., 2010.

FAZAKAS, Z.; NILSSON, M.; OLSSON, H. Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data. **Agricult.Forest Meteorol.**, Netherlands, vol.98–99, n. 31, p.417–425, dez., 1999.

FARFAN-VALENCIA, F.; ARIAS-HERNANDEZ, J. J.; RIANO-HERRERA, N. M. Desarrollo de una metodología para medir sombrero en sistemas agroforestales con café. **Cenicafé**, Colombia, v. 54, n. 1, p. 24-34, 2003.

FASSBENDER, H.W.; ALPIZAR, L.; HEUVELDOP, J.; ENRIQUEZ, G.; FOLSTER, H. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y café con poró (*Erythrina poeppigiana*), **Turrialba**, Costa Rica, v.35, n.4, p. 403–413, jul/set.,1985.

FOODY, G. M.; CUTLER, M. E.; MCMORROW, J.; PELZ, D.; TANGKI, H.; BOYD, D. S.; DOUGLAS, I. Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data. **Global Ecology and Biogeography**, United Kingdom, v.10, n.4, p.379– 38, jul., 2001

FOODY, G. M.; BOYD, D. S.; CUTLER, M. E. J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. **Remote Sensing of Environment**, Netherlands, v.85, n.4, p.463-474, fev., 2003.

FRANKLIN, J.; HIERNAUX, P.Y.H. Estimating foliage and woody biomass in Sahelian and Sudanian woodlands using a remote sensing model. **International Journal of Remote Sensing**, United Kingdom, v.12, n.6, p. 1387–1404, 1991.

FREI, C. ; CHRISTENSEN, J.H. ; DEQUE, M. ; JACOB, D. ; JONES, R.G. ; VIDALE, P.L. Daily precipitation statistics in regional climate models: evaluation and intercomparison for the European Alps. **J Geophys Res**, United States, v.108, n.D3, p.4124-4142, set., 2003.

GAY, C.; ESTRADA, F.; CONDE, C.; EAKIN, H.; VILLERS, L. Potencial impacts of climate change on agriculture : a case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. **Climatic Change**, Netherlands, v.79, n.2-3, p.259–288, out., 2006.

GHINI, R. **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna, Embrapa Jaguariúna, 2011.

GIORGI, F. On the simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. **Journal of Climate**, United States, v.3, n.9, p.941–963, set., 1990.

GIORGI, F.; MEARNNS, L.O. Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM Simulations via the ‘‘Reliability Ensemble Averaging’’ (REA) Method. **Journal of Climate**, United States, v.15, n.10, p.1141-1158, mai., 2002.

GIORGI, F.; BI, X.; PAL, J. Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe I. Presentday climate (1961–1990). **Climate Dynamics**, Germany, v.22, n.6-7, p.733–756, jun.,2004.

GIORGI, F. Climate change prediction. **Climatic Change**, Netherlands, v.73, n.3, p.239–265, dez., 2005.

GLOVER N.; BEER J. Nutrient cycling in two traditional Central American agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, Netherlands, v.4, n.2, p.77–87, 1986.

GORNALL, J.; BETTS, R.; BURKE, E.; CLARK, R.; CAMP, J. Willett K, et al. Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences**, United Kingdom, v.365, n.1554, p. 2973-2989, 2010.

GOUVEIA, N.M. **Estudo da diferenciação e crescimento das gemas florais de Coffea arábica L: observação sobre antese e maturação dos frutos**. 237p. Dissertação (Mestrado em Biologia) - Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1984.

GORDON, C.; COOPER, C.; SENIOR, C.A.; BANKS, H.; GREGORY, J.M.; JOHNS, T.C.; MITCHELL, J.F.B.; WOOD, R.A. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transport in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. **Climate Dynamics**, Germany, v.16, n.2-3, p.147-168, fev.,2000.

GUTIERREZ, M.V.; MEINZER, F.C.; GRANTZ, D.A. Regulation of transpiration in coffee hedgerows: covariation of environmental variables and apparent responses of stomata to wind and humidity. **Plant Cell Environmental**, United Kingdom, v.17, n.12, p. 1305-1313, dez., 1994.

HERWITZ, S.R.; JOHNSON, L.F.; DUNAGAN, S.E.; HIGGINS, R.G. ; SULLIVAN, D.V.; ZHENG, J.; LOBITZ, B.M.; LEUNG, J.G.; GALLMEYER, B.A.; AOYAGI, M.; SLYE, R.E.; BRASS, J.A. Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. **Computers and Electronics in Agriculture**, Netherlands, v.44, n.1, p. 49–61, jul., 2004.

HESE, S.; LUCHT, W.; SCHMULLIUS, C.; BARNSLEY, M.; DUBAYAH, R.; KNORR, D.; NEUMANN, K.; RIEDEL, T. and SCHROTER, K. Global biomass mapping for an improved understanding of the CO₂ balance—the Earth observation mission Carbon-3D. **Remote Sensing of Environment**, Netherlands, v.94, n.1, p. 94–104, jan., 2005.

HOLZKÄMPER, A.; CALANCA, P.; FUHRER, J. Analyzing climate effects on agriculture in time and space. **Procedia Environmental Sciences**, v.3, n., p. 58–62, 2011.

HOLMGREN, P.; THURESSON, T. Satellite remote sensing for forestry planning—a review. **Scandinavian Journal of Forest Research**, United Kingdom, v.13, n.1, 90–110, 1998.

HOUGHTON, R.A.; LAWRENCE, K.T.; HACKLER, J.L.; BROWN, S. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. **Global Change Biology**, United Kingdom, v.7, n., p. 731–746, oct., 2001.

HOUGHTON, R.A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. **Global Change Biology**, United Kingdom, v.11, n., 7, p. 945–958, jul., 2005.

HOUSE, J.I.; RENTICE, I.C.; RAMANKUTTY, N.; HOUGHTON, R.A. and HEIMANN, M. Reconciling apparent inconsistencies in estimates of terrestrial CO₂ sources and sinks. **Tellus**, Series B: Chemical and Physical Meteorology, Dinamarca, seriesB, v.55, n.2, p. 345–363, abr., 2003.

HEUTE, A.R.; JUSTICE, C. **Modis vegetation Index (MOD13) algorithm theoretical basis document.**, 129p. Technical Document – NASA Goddard Space Flight Center, 1999.

HUTTNER, S.; BRUSE, M.; DOSTAL, P. **Using ENVI-met to simulate the impact of global warming on the microclimate in central European cities.** In: JAPANESE-GERMAN MEETING ON URBAN CLIMATOLOGY, 5, 2008, Japan, **Proceedings...**, Freiburg, Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, pp. 307-312, 2008.

[INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE](http://www.ipcc.ch) – IPCC 2003 [Online]. **Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry.** Homepage: <<http://www.ipcc.ch>>.

IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.htm>> Acesso em abril, 2008.

IPCC. **Climate change 2001: working group II: Impacts, adaptations and vulnerability.** Disponível em: <http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/index> Acesso em: abril, 2008.

IPCC, Relatório final do Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.

JENSEN, R.J. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em Recursos Terrestres.** Tradução da 2^a.ed. São José dos Campos: Parênteses, 2009.

JONES, P.G.; THORNTON, P.K. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. **Global Environmental Change**, Netherlands, v.13, n.1, p. 51-59, abr., 2003.

KANE, S.; REILLY, J.; TOBEY, J. An empirical study of the economic effects of climate change on world agriculture. **Climatic Change**, Netherlands, vol. 21, n.1, p.17-35, mai., 1992.

KASSAM A.H.; VAN VELTHUIZEN H.T.; FISCHER G.W.; SHAH M.M. **Agro-ecological land resources assessment for agricultural development planning - A case study of Kenya - Resources data base and land productivity** - Technical Annex 3, in World Soil Resources Reports, FAO. p. 78, 1991.

KATTO-SAME, J.; WOOMER, P. L.; MOUKAM, A.; ZAPFAK, L. Carbon dynamics in slash and burn agriculture and land use alternatives of the humid forest zone in Camaroon. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Netherlands, , v. 65, n.3, p.245-256, nov., 1997.

LAHME, E.; BRUSE, M. **Microclimatic effects of a small urban park in a densely build up área: measurements and model simulations.** 4p. **Technical Repport** University of Bochum, Bochum, Germany. 2003.

LEAL, A.C.; SOARES, R. V.; CARAMORI, P.H.; BATISTA, A.C. Arborização de Cafeeiros com Bracatinga (*Mimosa scrabella* Bentham). **Floresta**, Curitiba, v.35, n.1, p.23-32, jan/abr., 2005.

LEBLON, B.; GRANBERG, H.; ANSSEAU, C. and ROYER, A. A semi-empirical model to estimate the biomass production of forest canopies from spectral variables, part 1: relationship between spectral variables and light interception efficiency. **Remote Sensing Reviews**, v.7, n.2., p. 109–125, 1993.

LELONG, C., C., D., PINET, P., C., POILVE, H. Hyperspectral Imaging and Stress Mapping in Agriculture: A Case Study on Wheat in Beauce (France). **Remote Sensing of Environment**, Netherlands, v.66, n.2, p. 179-191, nov., 1998.

LIANG, X.Z.; LI, L.; KUNKEL, K. Regional climate model simulation of US precipitation during 1982–2002. Part I: annual cycle. **Journal of Climate**, United States, v.17, n.18, p.3510–3528, set., 2004.

LIN, B.B. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, Netherlands, v.144, n.1-4, p. 85–94, mai., 2007.

LIN, B.B. Microclimates effects on flowering success in coffee agroforestry systems. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sci**, Dubai, vol.3, n.2, p.148-152, 2008.

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

LU, D.; BATISTELLA, M. Exploring TM image texture and its relationships with biomass estimation in Rondônia, Brazilian Amazon. **Acta Amazonica**, Brasil, v. 35, n.2, p.261–268, jun., 2005

LU, D.; BATISTELLA, M.; MORAN, E. Satellite estimation of aboveground biomass and impacts of forest stand structure. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, United States, v. 71, n.8, p. 967–974, ago., 2005a.

LU, D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, United Kingdom, v. 27, n.7, p.1297–1328, abr., 2006.

LUNZ, A. M.P.; BERNARDES, M. S.; RIGHI, C. A.; FAVARIN, J. L. Acúmulo de biomassa acima do solo em cafeeiro sob diferentes regimes de radiação solar. In: SIMPÓSIO DE

PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 5, 2007, Águas de Lindóia, SP, **Anais...** Brasília, D.F.: Embrapa Café, 2007.

MAESTRI, R.; SANQUETTA, C.R.; MACHADO, S.A.; SCOLFORO, J.R.S.; CÔRTE, A.P.D. Viabilidade de um projeto florestal de *Eucalyptus grandis* considerando sequestro de carbono. **Floresta**, Curitiba, v.34, n.3. p. 347-370, set/dez., 2004.

MAESTRI, M.; BARROS, R.S. **Coffee**. In: Alvim, P.T., Kozłowski, T.T. (Eds.), *Ecophysiology of Tropical Crops*. Academic Press, New York, pp. 249–278, 1977.

MARENGO, J. A. Impactos das Condições Climáticas e da Variabilidade e Mudanças do Clima sobre a Produção e os Preços Agrícolas: Ondas de Frio e seu Impacto sobre a Cafeicultura nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil. In: Lima, M. A. de, Cabral, O. M. R., Miguez, J. D. G. (Eds.). **Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira**. Jaguariúna, Embrapa Meio Ambiente, 2001.

MARENGO, J.A.; JONES, R.; ALVES, L.M.; VALVERDE, M.C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, United States, v.29, n.15, p.2241–2255, 2009a.

MARENGO, J.A.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.P.; ALVES, L.M.; CUADRA, S.V.; VALVERDE, M.C.; FERRAZ, S.E.T.; TORRES, R.R.; SANTOS, D.C. Future change of climate in South America in the late XXI century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, Germany, vol.35, n.6., p.1073-1097, dez., 2009b.

MARENGO, J.A.; CHOU, S.C.; KAY, G.; ALVES, L.M.; PESQUERO, J.F.; SOARES, W.R.; SANTOS, D.C.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.J; GOMES, J.L.; BUSTAMENTE, J.F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, Germany, v.37, n.3/4, ago., on-line, 2011.

MARIN, F. R. **Evapotranspiração e Transpiração máxima em cafezal adensado**. 118p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2003.

MATIELLO, J.B.; SANTINATO, R.; GARCIA, A.W.R.; ALMEIDA, S.R.; FERNANDES, D.R. **Cultura de Café no Brasil**: Novo Manual de Recomendações. Rio de Janeiro: MAPA/ PROCAFE, 2002. 388p.

MATTHEWS, R.; VAN NOORDWIJK, M.; GIJSMAN, A.J.; CADISCH, G. **Models of below-ground interactions: their validity, applicability and beneficiaries**. In: Van Noordwijk M, Cadisch G, Ong CA (eds) *Below-ground interactions in tropical agroecosystems*. CAB International, Wallingford, pp 41–60, 2004.

MENÉNDEZ, C. G.; SAULO, A. C.; LI, Z. X. 2001: Simulation of South American wintertime climate with a nesting system. **Climate Dynamics**, Germany, v.17, n.4, p.219-231, fev., 2001.

MIGUEL, A.E.; MATIELLO, J.B.; CAMARGO, A.P.; ALMEIDA, S.R.; GUIMARAES, S.R. Efeitos da arborização em cafezal com *Grevillea robusta* nas temperaturas do ar e umidade do solo, Parte II. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 21, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ, Procafé, p 55-65, 1995.

MISRA, V., P. A.; DIRMEYER, B. P. KIRTMAN. 2003: Dynamic Downscaling of Seasonal Simulation over South American. **Journal of Climate**, United States, v.16, n.1, p. 103-117, jan., 2003.

MOBERG, A.; JONES, P. Regional climate model simulations of daily maximum and minimum near-surface temperatures across Europe compared with observed station data 1961–1990. **Climate Dynamic**, Germany, v.23, n7-8., p.695–715, dec.,2004.

MONTAGNINI, F.; NAIR, P.K.R. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, Netherlands, v.61, n.1-3, p.281–295, jun., 2004.

MONTEITH, J.L.; ONG, C.K.; CORLETT, J.E. Microclimatic interactions in agroforestry systems. **Forest Ecology and management**, Netherlands, v.45, n. 1-4, p. 31-44, nov., 1991.

MORAES, W.B.; JESUS JUNIOR, W.C.; MORAES, W.B.; CECÍLIO, R.A. Potenciais impactos das mudanças climáticas globais sobre a agricultura. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, Maranhão, v. 5, n. 2, fev., 2011.

MORAIS, H.; CARAMORI, P.H. Consorciação de café recepado com guandu (*Cajanus cajan*) durante o inverno para proteção de cafezais contra geadas. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DOS CAFÉS DO BRASIL, 2., Vitória. **Anais...** Embrapa Café, p.242-246, 2001.

MORAIS, H.; MARUR, C.J.; CARAMORI, P.H.; RIBEIRO, A.M.A.; GOMES, J.C. Características fisiológicas e de crescimento de cafeeiro sombreado com guandu e cultivado a pleno sol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1131-1137, 2003.

MOREIRA, M.A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.3, p.223-231, mar., 2004.

MOREIRA, M.A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T. Análise do comportamento espectral de café em imagens TM e ETM+ do Landsat 5 e 7. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Belo Horizonte, 2003. **Anais...**Belo Horizonte: INPE, p. 189-196, 2003.

MORTATTI, J.; BORTOLETTO, M. J.; MILDE, L.C.E.; PROSBST, J. Hidrologias dos rios Tietê e Piracicaba: Séries temporais de vazão e hidrogramas de cheia. **Revista de Ciência & Tecnologia**, Piracicaba, v.12, n.23, p.55-67, jan/jun., 2004.

MUETZELFELDT, R.I.; SINCLAIR, F.L. Ecological modelling of agroforestry systems. **Agroforestry Abstracts**, United Kingdom, v.6, n.3, p.207–247, 1993.

MYNENI, R.B.; DONG, J.; TUCKER, C.J.; KAUFMANN, R.K.; KAUPPI, P.E.; LISKI, J.; ZHOU, L.; ALEXEYEV, V. and HUGHES, M.K. A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests. **PNAS**, United States, v.98, n.26, pp. 14784–14789, dez., 2001.

NACHAR, N. The Mann-Whitney U: A Test for Assessing Whether Two Independent Samples Come from the Same Distribution. **Tutorials in Quantitative Methods for Psychology**, Canadá, v.4, n.1, p.13-20, mar., 2008.

NAKATA, C.M. **Comportamento do pedestre e ambiente térmico urbano**. 133p. Dissertação (Mestre em Design)- Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru. 2010.

NELSON, R., KRABILL, W., TONELLI, J. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. **Remote Sensing of Environment**, Netherlands, v.24, n.3, p. 247–267, dez., 1988.

NICOLINI, M.; SALIO, P.; KATZFEY, J.J.; MCGREGOR, J.L.; SAULO, A.C. January and July regional climate simulation over South American. **J. Geophys. Res.**, United States, v.107, n. D22, p. 4637, nov., 2002.

NIKOLAKOPOULOS, K.; TSOMBOS, P. Comparison of multispectral (EO-1 ALI, Landsat ETM) and hyperspectral (EO-1 Hyperion) remote sensing data for geological mapping. Session GTR-04 Hyperspectral remote sensing and image spectroscopy. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 6, 2008, Oslo, **Proceedings...** International Union of Geological Sciences, 2008.

NOBRE, P.; MALAGUTTI, M. 2004: Uma avaliação do modelo de circulação geral do CPTEC para estudos de modelagem acoplada oceano-atmosfera. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XIII, 2004, Fortaleza. **Anais...**, Sociedade Brasileira de Meteorologia, São Paulo, 2004.

NOBRE, C. A.; ASSAD, E. D. e OYAMA, M. D. Mudança Ambiental no Brasil – O impacto do aquecimento global nos ecossistemas da Amazônia e na agricultura. **Scientific American Brasil**, nº 12. set., 2005.

OIJEN, M.V.; DAUZAT, J.; HARMAND, J.M.; LAWSON, G.; VAAST, P. Coffee agroforestry systems in Central America: I. A review of quantitative information on physiological and ecological processes. **Agroforest System**, Netherlands, v. 80, n.3, p.341–359, nov., 2010.

OIJEN, M.V.; DAUZAT, J.; HARMAND, J.M.; LAWSON, G.; VAAST, P. Coffee agroforestry systems in Central America: II. Development of a simple process-based model and preliminary results. **Agroforest System**, Netherlands, v. 80, n.3, p.361–378, nov., 2010a.

OLESEN, J.E.; BINDI, M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. **European Journal of Agronomy**, Netherlands, v.16, n.4, p. 239-262, 2002.

PAIXÃO, F. A. et al. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.30, n.3, p.411-420, maio/jun., 2006.

PALM C.A. et al. **Carbon sequestration and trace gas emissions in slash-and-burn and alternative land-uses in the humid tropics**. Relatório Técnico: Final Report, Alternatives to Slash and Burn (ASB) Climate Change Working Group, Phase II. ICRAF, Nairobi, Kenya, 2000.

PANDEY, D.N. Carbon sequestration in agroforestry systems. **Climate Policy**, United Kingdom, v.2, n.4, p. 367–377, dez., 2002.

PANDEY, D.N. Multifunctional agroforestry systems in India. **Current Science**, India, vol. 92, n. 4, fev., 2007.

PERFECTO, I.; VANDERMEER, J. Microclimatic changes and the indirect loss of biodiversity in tropical agroecosystem. **Oecologia**, Germany, v.108, n.3, p.577-582, nov., 1996.

PEREIRA-COLTRI, P.; CORDEIRO, R.L.F.; SOUZA, T.T.; ROMANI, L.A.S.; ZULLO JR., J.; TRAINA, C.; TRAINA, A.M.J. Classificação de áreas de café em Minas Gerais por meio do novo algoritmo QMAS em imagem espectral Geoeye-1. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba, **Anais...** . São José dos Campos, INPE, p.539-546, 2011.

PATENAUDE, G. HILL, R.A., MILNE, R., ROWLAND, C.S. DAWSON, T.P. Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing, **Remote Sensing of Environment**, Netherlands, v. 93, n.3, p. 368-380, nov., 2004.

PATENAUDE, G. MILNE, R., DAWSON, T.P. Synthesis of remote sensing approaches for forest carbon estimation: reporting to the Kyoto Protocol. **Environmental Science and Policy**, Netherlands, v.8, n.2, p.161-178, abr., 2005.

PETTITT, A.N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Journal of Applied Statistics**, United Kingdom, v.28, n.2, p.126-135, 1979.

PEZZOPANE, J.R.M.; GALLO, P.B.; PEDRO JUNIOR, M.J.; ORTOLANI, A.A. Caracterização microclimática em cultivo consorciado café/coqueiro-anão verde. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.11, n.2, p.293-302, set., 2003.

PEZZOPANE, J.R.M. **Avaliações Microclimáticas, fenológicas e agronômicas em café arábica cultivado a pleno sol e consorciado com banana 'prata-anã'**. 136p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2004.

PEZZOPANE, J.R.M.; PEDRO JUNIOR, M.J.; GALLO, P.B. Radiação solar e saldo de radiação em cultivo de café a pleno sol e consorciado com banana 'Prata Anã'. **Bragantia**, Campinas, v.64, n.3, p.485-497, 2005.

PEZZOPANE, J.R.M.; PEDRO JUNIOR, M.J.; GALLO, P.B.; CARMARGO, M.B.P.; FAZUOLI, L.C. Avaliações fenológicas e agronômicas em café arábica cultivado a pleno sol e consorciado com banana 'Prata Anã'. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.4, p.701-709, 2007.

PEZZOPANE, J.R.M.; PEDRO JUNIOR, M.J.; CARMARGO, M.B.P.; FAZUOLI, L.C. Exigências térmicas do café arábica cv. Mundo Novo no subperíodo florescimento-colheita. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 32, n. 6, p. 1781-1786, nov/dez., 2008.

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 nogueira macadâmia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.6, p.1257-1263, jun.,2010.

PEZZOPANE, J.R.M. et al . Microclimate in coffee plantation grown under grevillea trees shading. **Acta Sci., Agron. (Online)**, Maringá, v. 33, n. 2, p.201-206, jun., 2011.

PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J.; ASSAD, E.D.; BRUNINI, O.; ALFONSI, R.R.; CORAL, G. Zoneamento de riscos climáticos para a cafeicultura do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3 (Número especial Zoneamento Agrícola), p.495-500, 2001.

PINTO, H.S.; ASSAD, E.D.; ZULLO JR, J.; BRUNINI, O. O aquecimento global e a agricultura. **Revista Com Ciência Unicamp**, Campinas, v.34 - Numero especial Mudanças Climáticas, 2002. Disponível em: <http://www.comciencia.br/reportagens/framereport.htm>.

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

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D.; ZULLO JUNIOR, J.; EVANGELISTA, S. R. de M.; OTAVIAN, A. F.; ÁVILA, A. M. H. de; EVANGELISTA, B. A.; MARIN, F.; MACEDO JUNIOR, C.; PELLEGRINO G.; COLTRI, P. P.; CORAL, G. **A nova geografia da produção agrícola no Brasil**. In: DECONTO, J. G. (Coord.). Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária: Unicamp, 2008. 82p. Disponível em: www.agritempo.gov.br/climaeagricultura.

PIRINGER, A.A.; BORTHWICK, H.A. Photoperiodic responses of coffee. **Turrialba**, San Jose, v.5, n.3, p.72-75, 1955.

RAHMAN, A.F.; GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. **Modeling CO2 flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery**. In: AVIRIS WORKSHOP, 2000, California, JPL/NASA, Califórnia, 2000, **Proceedings...** California, 2000.

RAISANEN, J.; HANSSON, U.; ULLERSTIG, A.; DOSCHER, R.; GRAHAM, L.P.; JONES, C.; MEIER, H.E.; SAMUELSSON, P.; WILLEN, U. European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. **Climate Dynamics**, Germany, v.22, n.1, p.13–31, jan., 2004.

RAMIREZ C. Agroforestry: a mechanistic approach. In: Buxton DR, Shibles R, Forsberg RA, Blad BL, Asay KH, Paulsen GM, Wilson RF (eds) **International crop science I. Crop Science Society of America**, Madison, USA, pp 43–48, 1993.

RAMIREZ, G.M.; ZULLO JÚNIOR, J.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S. Comparação de dados dos satélites Ikonos-II e Landsat/ETM+ no estudo de áreas cafeeiras. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.41, n.4, p.661-666, abr., 2006.

RAMIREZ, G. M. **Uso de imagens de alta e média resolução espacial no estudo de áreas cafeeiras**. 113p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2009.

RAMIREZ, G.M.; ZULLO JÚNIOR, J. Estimativa de parâmetros biofísicos de plantios de café a partir de imagens orbitais de alta resolução espacial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 468-479, jun., 2010.

RIAL, J. A.; PIELKE, R. A. Sr., BENISTON, M., CLAUSSEN, M., CANADELL, J., COX, P., HELD, H., De NOBLET- DUCOUDRE, N., PRINN, R., REYNOLDS, J. F., SALAS, J. D. ‘Nonlinearities, feedbacks, and critical thresholds within the Earth’s climate system’, **Climatic Change**, Netherlands, v. 65, n.1-2, p.11–38, jul., 2004.

RIBEIRO, S. C et al. Quantification of biomass and estimation of carbon stock in a capoeira in the Minas Gerais forest zone. **Rev. Árvore**, Viçosa, v.34, n.3, pp. 495-504, 2010.

RODRIGUES, V.G.S.; CASTILLA, C.; COSTA, R.C. da; PALM, C. **Estoque de carbono em sistema agroflorestal com café em Rondônia – Brasil**. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DO CAFÉ DO BRASIL, I, 2000, Poços de Caldas, MG, **Anais...** Brasília: Embrapa Café, p.38-41, 2000.

ROGAN, J.; FRANKLIN, J.; STOW, D.; MILLER, J.; WOODCOCK, C.; ROBERTS, D. Mapping land-cover modifications over large areas: A comparison of machine learning algorithms. **Remote Sensing of Environment**, Netherlands, v.112, n.5, p.2272-2283, maio, 2008.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, p.133-137, 1998.

ROSA, M.E.C.; OLSZEWSKI, N.; MENDONÇA, E.S.; COSTA, L.M.; CORREIRA, J.R. Formas de carbono em latossolo vermelho eutroférico sob plantio direto no sistema biogeográfico do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n.5, p. 911-923, set/out.,2003.

ROSENQVIST, A.; ANTHONY, M.; LUCAS, R., IMHOFF, M., DOBSONE, C. A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. **Environmental Science & Policy**, Netherlands, v.6, n.5, p. 441–455, out., 2003.

RUNNING, S.W.; JUSTICE, C.O.; SOLOMONSON, V.; HALL,D.; BARKER, J.; KAUFMANN, Y. J.; STRAHLER, A.H.; HEUTE, A.R.; MULLER, J.P.; VANDERBILT, V.; WAN, Z.M.; TEILLET, P.; CARNEGIE, D. Terrestrial remote sensing science and algorithms planned for EOS/MODIS. **International Journal of Remote Sensing**, v.15, n.17, p.3587-3620, 1994.

SADER, S.A.; WAIDE, R.B.; LAWRENCE, W.T. AND JOYCE, A.T. Tropical forest biomass and successional age class relationships to a vegetation index derived from Landsat TM data. **Remote Sensing of Environment**, Netherlands, v.28, n.1, p. 143–156, abr/jun., 1989.

SALDARRIAGA J.G.; MARIA O.J.P.; LOUIS W.H.J. Evaluation of regression models for aboveground biomass determination in Amazon rainforest. **J Trop Ecol**, United Kingdom, v.10, p. 207–218, 1994.

SAWAYA, K.E.; OLMANSON, L.G.; HEINERT, N.J.; BREZONIK, P.L.; BAUER, M.E. Extending satellite remote sensing to local scales: land and water resource monitoring using high-resolution imagery. **Remote Sensing of Environment**, Netherlands, v. 88, n.1-2, p. 144–156, nov.,2003.

SCHLERF, M.; ATZBERGER, C. Inversion of a forest reflectance model to estimate structural canopy variables from hyperspectral remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, Netherlands, v.100, n.3, p. 281-294, 2006.

SCHUMACHER, M. V. Ciclagem de nutrientes como base da produção sustentada em ecossistemas florestais. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMAS NATURAIS DO MERCOSUL: O AMBIENTE DA FLORESTA, 1., 1996, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM/CEPEF, p.65-77, 1996.

SCHROEDER P. Carbon storage benefits of agroforestry systems. **Agroforest Systems**, Netherlands, v. 27, n.1, p.89–97, jul.,1994.

SEDIYAMA, G.C.; MELO JUNIOR, J.C.F.; SANTOS, A.R, RIBEIRO, A.; COSTA, M.H., HAMAKAWA, P.J.; COSTA, J.M.N.; COSTA, L.C. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o estado de Minas Gerais). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3, (Nº Especial: Zoneamento Agrícola), p.501-509, dez.,2001.

SEGURA M.; KANNINEN M. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. **Biotropica**, United States, v.37, n.1, p.2–8, mar., 2005.

SEGURA, M.; KANNINEN, M.; SUÁREZ, D. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. **Agroforest System**, Netherlands, v 68, n.2, p. 143-150. out., 2006.

SENTELHAS, P.C.; FAZUOLI, L.C.; PEZZOPANE, J.R.M. Temperatura Letal de diferentes espécies e derivados híbridos interespecífico de café. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 21, 1995, Araxá, **Anais....** Rio de Janeiro: MARA. p. 156-157, 1995.

SHEPHERD D.; MONTAGNINI F. Carbon Sequestration Potential in mixed and pure tree plantations in the humid tropics. **Journal of Tropical Forest Science**, Malasia, v. 13, n.3, p.450–459, 2001.

SETH, A.; ROJAS, M. Simulation and sensitivity in a nested modeling system for South America. Part I. Reanalysis boundary forcing. **J Climate**, United States, v.16, n.15, p.2437–2453, ago.2003.

SILVA, V.P.; VIEIRA, A.R.R.; CARAMORI, P.H.; BAGGIO, A.J. A radiação fotossinteticamente ativa e a produção de pastagem em sistema pastoril. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11, 1999, Florianópolis, **Anais...** Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1999.

SILVA, C.F. **Caminhos bio-climáticos: desempenho ambiental de vias públicas em Teresina, PI.** 115p. Dissertação (Mestre em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SILVA, C. F.; ROMERO, M. A. B. O desempenho ambiental de vias arborizadas na cidade de Teresinha por meio de dados sensoriais, microclimáticos e simulações computacionais com o auxílio do ENVI-met. In: X ENCONTRO NACIONAL E ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6, 2009, Natal, **Anais...**, 2009.

SILVA, M. T.; SILVA, V. de P. R. da; AZEVEDO, P. V. de. O cultivo do algodão herbáceo no sistema de sequeiro no Nordeste do Brasil, no cenário de mudanças climática. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 80-91, Jan., 2012.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H.S.; SANQUETTA, C.R.; ARCE, J.E. O estado da Arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, v.38, n.1, jan/mar, 2008.

SILVESTRI, G.; VERA, C.; JACOB, D.; PFEIFER, S.; TEICHMANN, C. A high-resolution 43-year atmospheric hindcast for South America generated with the MPI regional model. **Climate Dynamics**, Germany, v.32, n.5, p. 693–709, abr., 2009.

SINGH, T.P.; VARALAKSHMI, V.; AHLUWALIA, S.K. Carbon sequestration through farm forestry: case from India. **Indian Forester**, India, v.126, n.1, p. 1257–1264, 2000.

SOLMAN, S.A.; NUÑEZ, M.N.; CABRÉ, M.F. Regional climate change experiments over southern South America. I: present climate. **Climate Dynamics**, n.30, v.5, p.533-552, set.,2008.

SOUZA, H.N.; GOEDEA, R.G.M.; BRUSSAARDA, L.; CARDOSO, I.M.; DUARTE, E. M.G.; FERNANDES, R.B.A.; GOMES, L.C.; PULLEMANA, M.M. Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Netherlands, v.146, n.1, p.179-196, jan., 2012.

SIQUEIRA, O. J. Efeitos Potenciais das Mudanças Climáticas na Agricultura Brasileira e Estratégias Adaptativas para Algumas Culturas. In: Lima, M. A. de, Cabral, O. M. R., Miguez, J. D. G. (Eds.). **Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira**. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP, pp. 65-96, 2001.

STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.3, p.730-740, mai/jun., 2005.

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

STEININGER, M.K. Satellite estimation of tropical secondary forest aboveground biomass data from Brazil and Bolivia. **International Journal of Remote Sensing**, United Kingdom, v.21, n.6-7, p. 1139–1157, 2000.

STINSON, G., FREEDMAN, B. Potential for carbon sequestration in Canadian forests and agroecosystems. **Mitigation Adaptation Strategies Global Change**, Netherlands, v.6, n.1, p.1–23, mar., 2001.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Redwood City: Benjamin/ Cummings Pub. Co., 559p., 1991.

TANRÉ, D.; DEROO, C.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J.J.; PERBOS, J.; DESCHAMPS, P.Y. Description of a Computer Code to Simulate the Satellite Signal in the Solar Spectrum: The 5S Code. **International Journal of Remote Sensing**, United Kingdom, v.11, n.4, p.659-668, abr.,1990.

TARDIN, A.T.; ASSUNÇÃO, G.V.; SOARES, J.V. Análise preliminar de imagens TM visando a discriminação de café, citrus e cana-de-açúcar na região de Furnas, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, n.9, p.1355-1361, set.,1992.

TOKOLA, T.; SARKEALA, J.; VAN DER LINDEN, M. Use of topographic correction in Landsat TM-based forest interpretation in Nepal. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n.4, p.551– 563, 2001.

TROTTER, C.M.; DYMOND, J.R.; GOULDING, C.J. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM. **International Journal of Remote Sensing**, United Kingdom, v.18, n.10, p. 2209–2223, jul.,1997.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Publications in Climatology**, New Jersey: Centerton, v.8, n.1, p.104, 1955.

UJAH, J.E.; ADEOYE, K.H. Effects of shelterbelts in the Sudan Savanna zone of Nigeria on microclimate and yield of millet. **Agricultural and Forest Meteorology**, Netherlands, v.33, n.1/3, p.99-107, 1984.

VANCUTSEM, C.; PEKEL, J.-F.; EVRARD, C.; MALAISSE, F.; DEFOURNY, P. Mapping and characterizing the vegetation types of the Democratic Republic of Congo using SPOT VEGETATION time series. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Netherlands, v. 11, n.1, p. 62-76, fev., 2009.

VICTORIA, R.L.; MARTINELLI, L.A.; MORAES, J.M.; BALLESTER, M.V.; KRUSCHE, A.V.; PELLEGRINO, G.; ALMEIDA, R.M.B.; RICHEY, J.E. Surface air temperature variations in the Amazon Region and its borders during this century. **Journal of Climate**, Zurich, v.11, n.5, p.1105-1110, mai., 1998.

VINCIKOVÁ, H.; HAIS, M.; BROM, J.; PROCHÁZKA, J.; PECHAROVÁ, E. Use of remote sensing methods in studying agricultural landscapes – a review. **Journal of Landscape Studies**, Czech Republic, v.3, n.1, p.53-63, abr., 2010.

WATSON R.T.; NOBLE I.R.; BOLIN B.; RAVINDRANATH N.H.; VERARDO D.J. and Dokken D.J. (eds). **Land Use, Land-Use Change, and Forestry**. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Special report. Cambridge Univ. Press. New York, 2000.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, United States, v. 90, n.c5, p.8995-9005, 1985.

WU, Y.; STRAHLER, A.H. Remote estimation of crown size, stand density, and biomass on the Oregon transect. **Ecological Applications**, United States, v. 42, n.3, p. 299–312, ago., 1994.

WU, J.; WANG, D.; BAUER, M.E. Assessing broadband vegetation indices and QuickBird data in estimating leaf area index of corn and potato canopies. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.102, n.1, abr., 2007

WULDER, M. Optical remote-sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters. **Prog. Phys. Geogr.**, United Kingdom, v.22, n.4, p.447–449, dez.,1998.

YANG, Ch.-Ch.; PRASHER, S., O., ENRIGHT, P., MADRAMOOTOO, Ch.,BURGESS, M., GOEL, P.K., CHLUM, I. Application of decision tree technology for image classification

using remote sensing data. **Agricultural Systems**, United Kingdom, v.76, n.3, p.1101-1117, jun.,2003.

YOUNG, A. **Agroforestry for soil management**, 2nd ed.CAB International, Wallingford, vii, 320 p., 1997.

ZERGER, A.; GIBBONS, P.; SEDDON, J.; BRIGGS, S.; FREUDENBERGER, D. A method for predicting native vegetation condition at regional scales. **Landscape and Urban Planning**, Netherlands, v. 91, n.2, p. 65-77, jun., 2009.

ZHENG, D.; RADEMACHER, J.; CHEN, J.; CROW, T.; BRESEE, M.; LE MOINE, J. and RYU, S. Estimating aboveground biomass using Landsat 7 ETM+ data across a Biomass estimation managed landscape in northern Wisconsin, USA. **Remote Sensing of Environment**, Netherlands, v.93, n3., p. 402–411, nov., 2004.

ZORITA, E.; VON STORCH, H. The analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated methods. **Journal of Climate**, United States, v.12, n.9, p. 2474-2489, set., 1999.

ZULLO JUNIOR., J. **Correção Atmosférica de Imagens de Satélite e Aplicações**. 190p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 1994.

ZULLO JUNIOR, J.; PINTO, H.S.; ASSAD, E.D. Impact assessment study of climate change on agricultural zoning. **Meteorological Applications**, United Kingdom, v.13,n.1S, p.69-80, dez., 2006.

ZULLO JUNIOR, J.; PINTO, H.S.; ASSAD, E.D., ÁVILA, A.H. Potential for growing Arábica coffee in the extreme south of Brazil in a warmer world. **Climatic Change**, Netherlands, v.109, n.3-4, p. 535-548, dez., 2011.