**Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas**

Bruno Paraluppi Cestaro

**Implementação do modelo da biosfera SiB2 para
agroecossistemas brasileiros**

São Paulo

2012

BRUNO PARALUPPI CESTARO

Implementação do modelo da biosfera SiB2 para agroecossistemas brasileiros

Dissertação apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas para obtenção do título de Mestre em Ciências Atmosféricas..

Área de Concentração: Meteorologia

Orientador: Prof. Dr. Humberto Ribeiro da Rocha

Versão corrigida. A versão original encontra-se disponível na unidade.

São Paulo

2012

Aos meus pais, José Roberto
Cestaro e Claudete Paraluppi
Cestaro pelo amor, exemplo e
dedicação.

Agradecimentos

A Deus

Ao meu orientador Prof. Dr. Humberto Ribeiro da Rocha, pela orientação, confiança em mim depositada, discussões e por provocar em mim a curiosidade científica. Sempre paciente, sereno, com conselhos pontuais e em algumas vezes engraçados.

A minha irmã, Paula Paraluppi Cestaro, pelo incentivo, carinho, apoio e torcida.

A minha querida amiga Aline Tochio Angelo que esteve presente de maneira integral nesse projeto e que com seu conhecimento, amizade e alegria, tornaram a execução dessa dissertação um processo mais prazeroso.

Ao amigo Jônatan Dupont Tastch, por acompanhar de maneira intensa o desenvolvimento desse trabalho e compartilhar seus conhecimentos, até mesmo os momentos de descontrações junto comigo. Sem jamais esquecer os ensinamentos na época de iniciação científica que foram as primeiras sementes desse trabalho.

Aos meus amigos que dividiram sala comigo, primeiramente: Wagner Galichio, Tatiane Martins, Bruce Pontes e Maria Custódio; e depois Angélica Ferreira e Luiz Felipe Gozzo, e aqueles que sempre estavam presentes ajudando como: Daniel Faria, Juarez Quesada, José Caparica, Jessé Américo, João “Jota” Zambrini e Raphael Zanon pelo companheirismo e momentos que vivemos juntos durante o curso.

Ao grupo do Laboratório de Clima e Biosfera, os amigos: Helber Freitas, Eduardo Lopes, Emília Brasília, Ana Elizabeth da Silva, Monica D’Amelio, Tomás Domingues, Jonathan Mota, Gabriel Costa, Monica Queiroz, Carlos Fagiolo, Cinthia Martins e Leonardo Domingues. Pelos ensinamentos, sugestões e discussões mensais que engrandeceram esse projeto.

A Marta Llopart por compartilhar seus conhecimentos comigo e paciência em demonstrar os primeiros passos necessários para realizar esse trabalho.

Ao Santiago Vianna Cuadra pela assistência essencial e constante para a formação desse trabalho.

A Simone Toni Ruiz Corrêa, pela sua fundamental ajuda, auxílios prestados e dados fornecidos.

Aos amigos de IAG, Ricardo Hallack e Jean Rafael pela ajuda e por terem sempre a mão esticada à minha amizade.

Aos funcionários do departamento de Ciências Atmosféricas do IAG, sem o suporte de vocês não seria possível a conclusão desse trabalho.

A CAPES

RESUMO

CESTARO, B.P. **Implementação do modelo da biosfera SiB2 para agrossistemas brasileiros.** 2012. 104 f. Dissertação – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Com o crescimento da população mundial aumenta a preocupação com a produção de alimentos. Hoje em dia aproximadamente 40 % da área de superfície do planeta livre de gelo é usada para a agricultura. O Brasil se destaca no cenário mundial como um dos grandes produtores e um dos países com maior potencial de crescimento em área para produção de alimentos. As culturas brasileiras que ocupam maior espaço territorial são a soja, cana-de-açúcar, milho e pastagem. Este trabalho tenta representar esses agrossistemas no modelo da biosfera SiB2 (Simple Biosphere Model) com a implementação de algumas rotinas para melhor representar as culturas agrícolas como: épocas de plantio e colheita, alocação de carbono nas diferentes partes da planta (raiz, folha, caule e grãos), acúmulo de biomassa, dinâmica da vegetação (crescimento da vegetação, emergência, crescimento e senescência das folhas), enchimento de grãos, cálculo do perfil de velocidade do vento dentro do dossel, decomposição da matéria orgânica e transformação em Nitrogênio. A validação do modelo se deu por meio da comparação com dados mensurados de biomassa e índice de área foliar (IAF). Comparando as observações da matéria seca dos ciclos da cana-de-açúcar, o ciclo 2005/2006 foi mais produtivo que o ciclo 2006/2007 ($48,1 \pm 10,9$ e $32,0 \pm 5,4$ Mg ha⁻¹). As simulações da cana-de-açúcar foram superestimadas ($52,3$ e $35,8$ Mg ha⁻¹) quando comparadas com as observações, devido ao fato da biomassa seca das folhas estar superestimada. A simulação da produtividade ($17,1$ Mg ha⁻¹) do milho ficou um pouco abaixo do valor observado porém dentro do intervalo de confiança das medidas de campo ($17,6 \pm 2,5$ Mg ha⁻¹). A simulação da soja ($3,9$ Mg ha⁻¹) foi aquela que mais se aproximou da observação ($3,7 \pm 0,5$ Mg ha⁻¹). A comparação entre os valores simulados e observados de IAF da pastagem mostrou a sazonalidade dessa variável, sendo que os meses de maiores e menores valores estão compatíveis com a observação. Outra análise feita neste trabalho, foi a análise de sensibilidade do modelo às variações do clima. Para tanto, foram simulados cenários de mudanças climáticas, alterando-se as variáveis precipitação e temperatura, considerando-se a cultura da soja. Os resultados que o modelo demonstrou uma maior sensibilidade ao déficit hídrico, pois diminuindo-se a precipitação houve menor acúmulo de biomassa durante o ciclo. Porém com mais precipitação não ocorre mudanças

significativas no acúmulo de biomassa. Há maior produção de biomassa quando o ambiente é mais frio e menor produção quando a temperatura é mais elevada, devido ao fato de tardar o florescimento o que faz com que aumente a biomassa acumulada nas folhas e com o IAF maior a planta acumula mais biomassa.

ABSTRACT

Cestaro, B.P. **Implementation of the biosphere model SiB2 to Brazilian agroecosystems.** 2012. 104 f. Dissertation - Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of Sao Paulo, Sao Paulo.

The constant increasing of world population raises the concern about food production. Nowadays approximately 40% of the planet surface that is free of ice is used for agriculture. Brazil stands out on the world stage as a major producer, and presents a potential to grow even more in food production. The Brazilian crops that occupy the largest territorial area are sugar cane, soybeans, corn and pasture. This work tries to represent these agrosystems in a biosphere model (Simple Biosphere Model, SiB2) with implementation of some routines for better representation of agricultural crops such as planting and harvesting times, allocation of carbon in different parts of the plant (root, leaf, stem and grains), accumulation of biomass, vegetation dynamics (vegetation growth, emergence, growth and senescence of leaves), grain filling, wind speed profile within the canopy, organic matter decomposition and transformation into Nitrogen. Model validation was carried out through comparison with measured data of biomass and leaf area index (LAI). Comparing the simulations of sugar cane cycles, the 2005/2006 was more productive than the 2006/2007 cycle (48.1 ± 10.9 and 32.0 ± 5.4 Mg ha⁻¹). Simulations of sugar cane yield overestimated (52.3 and 35.8 Mg. ha⁻¹) observed values when compared with the observations due to the fact that the biomass in leaves is overestimated. The simulation of corn productivity (17.1 Mg ha⁻¹) was a little lower than observed but within the range of error (17.6 ± 2.5 Mg ha⁻¹). Simulation of soybean (3.9 Mg ha⁻¹) is the one closest to observation (3.7 ± 0.5 Mg ha⁻¹). The comparison of pasture LAI showed the seasonality of the IAF and the months of highest and lowest values are compatible with observations. Another analysis in this study was the sensitivity of this model to climate change scenarios. Scenarios were simulated by changing the climatic variables precipitation and air temperature. Soybean crop was used as an example. The model showed sensitivity to water deficit, since decreasing rainfall the plants accumulated less biomass in the total cycle, and with more precipitation significant changes do not occur in biomass accumulation. There is a greater biomass production when the environment is cooler and less production when the temperature is higher, due to the fact that the latest flowering causes increase biomass accumulated in the leaves and the IAF greater plant biomass accumulates more.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Estádios de desenvolvimento da cultura da soja, com a Fase Vegetativa e a Fase Reprodutiva (adaptado de www.pioneersementes.com.br/ArtigosDetalhe.aspx?!=62).	21
Figura 1.2: Desenvolvimento da planta da soja (CORREA, 2008).	22
Figura 1.3: Estádios de desenvolvimento da cultura do milho, com a Fase Vegetativa e a Fase Reprodutiva (adaptado de www.ebah.com.br/content/ABAABFRQAC/fase-desenvolvimento-cultura-milho).	24
Figura 2.1: Fluxograma do modelo SiB2 com as rotinas implementadas para a adaptação dos agrossistemas.	36
Figura 2.2: Esquema das resistências no modelo SiB2 na transferência de calor sensível e na transferência de calor latente. Adaptado de Sellers et al. (1996)	43
Figura 2.3: Transferência turbulenta considerado no esquema de fechamento do vento de primeira ordem e perfil vertical triangular do índice de área foliar dentro do dossel utilizado no modelo SiB2. Adaptado de Sellers et al. (1999).	44
Figura 2.4: Fluxograma da rotina de decomposição da matéria orgânica. Onde: MDP, matéria decomponível da planta; MEP, matéria estrutural da planta; MRP, matéria resistente (lignina) da planta.	47
Figura 3.1: Desenvolvimento das culturas com o GD, graus dias, acumulados (linha sólida preta), GDF, florescimento ou início do acúmulo de sacarose (linha tracejada azul), e GDM, maturidade (linha tracejada vermelha), das culturas da cana-de-açúcar, soja e milho. Continua.	53
Figura 3.2: Partição de carbono para as diferentes partes da planta: raiz (linha sólida marrom), folha (linha sólida verde), caule (linha sólida vermelha) e sacarose ou grãos (linha sólida azul) nas culturas de cana-de-açúcar (a), soja (b) e milho (c), ao longo de um ciclo de plantio.	55
Figura 3.3: Cálculo do IAF total (linha sólida preta) e verde (linha sólida verde) da cana-de-açúcar comparando com os dados observados de IAF total (linha tracejada com ponto preto) e verde (linha tracejada com ponto verde) para os ciclos de 2005/2006 (a) e 2006/2007 (b). A reta laranja é a relação 1:1 e a reta tracejada é a regressão linear do calculado vs. observado.	57
Figura 3.4: Cálculo do IAF total do milho (linha sólida preta) comparando com o observado para três cultivares diferentes: BR-1010 (linha tracejada com ponto cinza), BR-1001 (linha	

tracejada com ponto azul) e BR-3003 (linha tracejada com ponto vermelho). A reta laranja é a relação 1:1 e as retas tracejadas são as regressões lineares do calculado vs. observado.58

Figura 3.5: Cálculo do IAF total da cultura da soja (linha sólida verde) comparando com o observado da média de dez cultivares diferentes (linha tracejada com ponto preto). A reta laranja é a relação 1:1 e a reta tracejada é a regressão linear do calculado vs. observado.59

Figura 3.6: Cálculo do IAF da pastagem (linha sólida verde) comparando com o observado (linha tracejada com ponto preto). A reta laranja é a relação 1:1 e a reta tracejada é a regressão linear do calculado vs. observado.....60

Figura 3.7: Cálculo da biomassa do caule da cana-de-açúcar (linha sólida vermelha) comparando com o observado (linha sólida verde) para os ciclos de 2005/2006 (a) e 2006/2007 (b). A reta laranja é a relação 1:1 e a reta tracejada é a regressão linear do calculado vs. observado.....61

Figura 3.8: Cálculo da biomassa da folha da cana-de-açúcar comparando (linha sólida verde) com o observado (linha tracejada com ponto preto) para os ciclos de 2005/2006 (a) e 2006/2007 (b). A reta laranja é a relação 1:1 e a reta tracejada é a regressão linear do calculado vs. observado. Continua.62

Figura 3.9: Cálculo do total de biomassa seca (linha sólida preta) do milho comparando com o observado para três cultivares diferentes: BR-1010 (linha tracejada com ponto cinza), BR-1001 (linha tracejada com ponto azul) e BR-3003 (linha tracejada com ponto vermelho). A reta laranja é a relação 1:1 e as retas tracejadas são as regressões lineares do calculado vs. observado.....64

Figura 3.10: Cálculo da biomassa seca da folha (a), da raiz (b), do caule (c) e dos órgãos reprodutores (d) de milho (linha sólida preta) comparando com o observado para três cultivares diferentes: BR-1010 (linha tracejada com ponto cinza), BR-1001 (linha tracejada com ponto azul) e BR-3003 (linha tracejada com ponto vermelho). A reta laranja é a relação 1:1 e as retas tracejadas são as regressões lineares do calculado vs. observado. Continua.....65

Figura 3.11: Cálculo da biomassa seca da soja (linha sólida verde) comparando com o observado da média de dez cultivares diferentes (linha tracejada com ponto preto). A reta laranja é a relação 1:1 e a reta tracejada é a regressão linear do calculado vs. observado.67

Figura 3.12: Cálculo da biomassa seca da raiz (linha sólida marrom), da folha (linha sólida verde), do caule (linha sólida vermelha) e dos grãos da soja (linha sólida azul).68

Figura 3.13: Cálculo da altura da cana-de-açúcar (linha sólida vermelha) comparando com o observado (linha tracejada com ponto preto) para os ciclos de 2005/2006 (a) e 2006/2007 (b). A reta laranja é a relação 1:1 e a reta tracejada é a regressão linear do calculado vs. observado.

..... 69

Figura 3.14: Carbono disponível no solo das folhas (linha sólida verde) e da raiz (linha sólida marrom) para as culturas da cana-de-açúcar (a), soja (b) e milho (c), que sofre decomposição de microorganismos referentes aos dias após a colheita. Continua..... 71

Figura 3.15: Produtividade final (Mg.ha^{-1}) da biomassa seca aérea da cultura da cana-de-açúcar nos ciclos 2005/2006 e 2006/2007, dos órgãos reprodutores da cultura do milho e da cultura da soja (colunas cinza claro) relacionadas com os dados observados (colunas cinza escuro) e os desvios padrão. 73

Figura 3.16: (a) Média mensal do cálculo (linha sólida com ponto verde) do Fluxo de calor latente (LE) da cana-de-açúcar comparando com o observado (linha sólida com ponto azul) para os ciclos de 2005/2006 e 2006/2007, com o IAF médio mensal calculado (linha tracejada preta), o saldo de radiação, R_n , (linha tracejada com ponto cinza) e a precipitação total mensal (barra verde). (b) Evapotranspiração média do mês em mm (linha sólida com ponto verde), IAF médio mensal calculado (linha tracejada preta), precipitação total mensal (barra verde) e as componentes da Evapotranspiração: Evaporação (linha sólida com ponto vermelho), Transpiração (linha sólida com ponto laranja) e Interceptação (linha sólida com ponto cinza). Continua..... 74

Figura 3.17: Evapotranspiração média por pântadas, para o milho (a) e soja (b) e mensal para a pastagem (c) em mm.dia^{-1} (linha sólida com ponto verde), IAF médio calculado (linha tracejada preta), precipitação total mensal (barra verde) e as componentes da Evapotranspiração: Evaporação (linha sólida com ponto vermelho), Transpiração (linha sólida com ponto laranja) e Interceptação (linha sólida com ponto cinza). Continua. 76

Figura 3.18: Comparação da Produção de Biomassa Seca Total da cultura da soja com o arranjo de diferentes cenários de precipitação: 75% mais úmido (linha tracejada com ponto rosa), 50% mais úmido (linha tracejada com ponto verde musgo), 25% mais úmido (linha tracejada com ponto verde claro), 75% mais seco (linha tracejada com ponto verde escuro), 50% mais seco (linha tracejada com ponto azul), 25% mais seco (linha tracejada com ponto vermelho), sem variação na precipitação (linha tracejada com ponto preto e temperatura (1°C , 2°C , 3°C) mais quente e (1°C , 2°C , 3°C) mais frio. 78

Figura 3.19: Comparação da Produção de Biomassa Seca Total para as partes: raiz (a), folhas (b), caule (c) e grãos(d) da planta de soja; com o arranjo de diferentes cenários de precipitação: 75% mais úmido (linha tracejada com ponto rosa), 50% mais úmido (linha tracejada com ponto verde musgo), 25% mais úmido (linha tracejada com ponto verde claro), 75% mais seco (linha tracejada com ponto verde escuro), 50% mais seco (linha tracejada com ponto azul), 25% mais seco (linha tracejada com ponto vermelho), sem variação na precipitação (linha tracejada com ponto preto e temperatura (1°C, 2°C, 3°C) mais quente e (1°C, 2°C, 3°C) mais frio. Continua..... 79

Figura 3.20: Comparação da Produção de Primária Bruta (a) e Total da Respiração (b) da planta de soja com o arranjo de diferentes cenários de precipitação: 75% mais úmido (linha tracejada com ponto rosa), 50% mais úmido (linha tracejada com ponto verde musgo), 25% mais úmido (linha tracejada com ponto verde claro), 75% mais seco (linha tracejada com ponto verde escuro), 50% mais seco (linha tracejada com ponto azul), 25% mais seco (linha tracejada com ponto vermelho), sem variação na precipitação (linha tracejada com ponto preto e temperatura (1°C, 2°C, 3°C) mais quente e (1°C, 2°C, 3°C) mais frio. Continua. 81

Figura 3.20: Conclusão..... 82

Figura 3.21: Comparação da Produção de Primária Líquida (a) e IAF (b) da planta de soja com o arranjo de diferentes cenários de temperatura: 3° mais quente (linha sólida rosa), 2° mais quente (linha sólida verde musgo), 1° mais quente (linha sólida verde claro), 3° mais frio (linha sólida verde escuro), 2° mais frio (linha sólida azul), 1° mais frio (linha sólida vermelha), sem variação na temperatura (linha sólida preta)..... 68

Figura 4.1: Dados de entrada do modelo SiB2 do sítio experimental para a cultura da cana-de-açúcar: irradiância de onda curta incidente observada, K_i (W m^{-2}); saldo de radiação, R_n (W m^{-2}); pressão de vapor, e_m (hPa); temperatura do ar, t_m (K); velocidade horizontal do vento, u_m (m s^{-1}); precipitação observada, $prec$ (mm). 111

Figura 4.2: Dados de entrada do modelo SiB2 do sítio experimental para a cultura da cana-de-açúcar: irradiância de onda curta incidente observada, K_i (W m^{-2}); saldo de radiação, R_n (W m^{-2}); pressão de vapor, e_m (hPa); temperatura do ar, t_m (K); velocidade horizontal do vento, u_m (m s^{-1}); precipitação observada, $prec$ (mm). 112

Figura 4.3: Dados de entrada do modelo SiB2 do sítio experimental para a cultura do milho: irradiância de onda curta incidente observada, K_i (W m^{-2}); saldo de radiação, R_n (W m^{-2});

pressão de vapor, em (hPa); temperatura do ar, tm (K); velocidade horizontal do vento, um (m s⁻¹); precipitação observada, $prec$ (mm). 113

Figura 4.4: Dados de entrada do modelo SiB2 do sítio experimental para a pastagem: irradiância de onda curta incidente observada, Ki (W m⁻²); saldo de radiação, Rn (W m⁻²); pressão de vapor, em (hPa); temperatura do ar, tm (K); velocidade horizontal do vento, um (m s⁻¹); precipitação observada, $prec$ (mm). 114

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Conjunto de parâmetros morfológicos, ópticos, fisiológicos e físicos do solo no modelo SiB2, para o ecossistema da pastagem.	34
Tabela 2.2: Conjunto de parâmetros específicos para sistemas agrícolas implementados e as referências: (1) KUCHARIK et al., 2003; (2) CUADRA et al., 2010; (3) GAIEWSKI , 2009; (4) CORREA, 2008; (5) Valor resultado da calibração; (6) INMAN-BAMBER & SMITH, 2005; (7) CABRAL et al., 2011; (8) WULLSCHLEGER, 1993. Continua.....	36
Tabela 2.3: Parâmetros da rotina processo de decomposição sendo que: MDP, matéria decomponível da planta; MEP, matéria estrutural da planta; MRP, matéria resistente da planta; Pbio, matéria orgânica na biomassa dos microorganismos protegidos; Pom, matéria orgânica protegida; Nbio, matéria orgânica na biomassa dos microorganismos não protegidos; Nom, matéria orgânica não protegidos; Som, carbono no solo.....	49

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
τ	Tensão de cisalhamento ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$)
ρ	Densidade do ar (kg m^{-3})
ρ_w	Densidade da água (kg m^{-3})
θ_i	Umidade volumétrica do solo na camada i ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)
a_{ar}	Fração da alocação de carbono na parte aérea da planta
a_{leaf}	Fração da alocação de carbono na Folha
a_{repr}	Fração da alocação de carbono nos Grãos
a_{root}	Fração da alocação de carbono na Raiz
a_{rootf}	Fração da alocação final de carbono na Raiz
a_{stem}	Fração da alocação de carbono no caule
AFE	Área foliar específica (kg m^{-1})
C:N	Relação entre Carbono e Nitrogênio disponível na biomassa
C_d	Coefficiente de arrasto da folha
C_{dgs}	Coefficiente de arrasto do solo
C_{root}	Biomassa acumulada na raiz (Mg ha^{-1});
C_{leaf}	Biomassa acumulada nas folhas (Mg ha^{-1});
C_{stem}	Biomassa acumulada no caule (Mg ha^{-1});
C_{repr}	Biomassa acumulada nos grãos (Mg ha^{-1}).
CO ₂	Dióxido de carbono
d	Altura de deslocamento do plano zero (m)
DAE	Dias após a emergência
DAP	Dias após o plantio
D_c	Taxa de drenagem no dossel (m s^{-1})
D_d	Taxa de escoamento pelo dossel (m s^{-1})
D_t	Espessura da camada do solo (m)
droot	Fator de declínio da raiz
E_c ,	Evapotranspiração do dossel
E_{ci}	Evaporação da água interceptada pelo dossel
E_{wc}	Transpiração das folhas

Effcon	Eficiência quântica
em	Pressão de vapor (hPa)
GD	Graus Dias ($^{\circ}\text{C dia}^{-1}$)
GDE	Graus Dias para Emergência ($^{\circ}\text{C dia}^{-1}$)
GDG	Graus Dias para o Florescimento ($^{\circ}\text{C dia}^{-1}$)
GDM	Graus Dias para Maturidade ($^{\circ}\text{C dia}^{-1}$)
G	Fração das folhas verde no dossel
h_a	Altura da fonte de calor dentro do dossel (m)
ha	Hectares
IAF	Índice de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
g_c	Condutância de superfície
k	Constante de Von Karman's
kg	Kilogramas
K_i	Irradiância de onda curta incidente (W m^{-2})
K_m	Coefficiente de transferência de momento
K_s	Coefficiente de transferência de calor
J	Joules
L_d	Densidade da área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$)
MCGs	Modelo de Circulação Geral da Atmosfera
MDP	Material decomponível da planta
MEP	Material estrutural da planta
MRP	Material resistente da planta
M_{cw}	Armazenamento de água por interceptação do dossel
M_{gw}	Armazenamento superfície do solo
M_{cs}	Gelo e neve interceptados pelo dossel
M_{gs}	Gelo e neve interceptados na superfície do solo
Mg	Toneladas
MR	Maturidade Relativa
mm	Milímetros
NPP	Assimilação líquida da planta ($\text{micro mol} \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

P	Taxa de precipitação (m s^{-1})
Prec	Precipitação (mm)
ps	fator de abrigo
$Q_{i,i+1}$	Escoamento entre as camadas i e $i+1$ (m s^{-1})
Q_3	Drenagem gravitacional da umidade do solo (m s^{-1})
r_a	Resistência entre a folha e o ar dentro do dossel (s m^{-1})
r_{am}	Resistência aerodinâmica (s m^{-1})
r_b	Resistência da camada entre a atmosfera e o dossel (s m^{-1})
r_d	Resistência da camada entre o dossel e o solo (s m^{-1})
R_{Oi}	Infiltração excedente da taxa de runoff da superfície (m s^{-1})
Rn	Saldo de Radiação (W m^{-2})
SiB2	Simple Biosphere Model 2
SVATS	Esquema solo-planta-atmosfera
T_{base}	Temperatura basal inferior ($^{\circ}\text{C}$)
T_c	Temperatura do dossel (K)
T_d	Temperatura do solo profundo (K)
T_g	Temperatura da superfície do solo (K)
T_m	Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)
T_{media}	Temperatura média do dia (K)
VE	Estádio Vegetativo
VR	Estádio Reprodutivo
u	Velocidade do vento (m s^{-1})
u^*	Velocidade de fricção (m s^{-1})
um	Velocidade do vento horizontal (m s^{-1})
US\$	Dólares
W	Grau de saturação de umidade em cada camada do solo
z	Altura (m)
z_0	Comprimento de rugosidade (m)
z_1	Altura da base do dossel (m)
z_2	Altura do topo do dossel (m)
z_c	Altura do ponto de inflexão da densidade do dossel (m)
z_m	Altura dos dados meteorológicos medidos

zlw

Largura da folha da planta (m)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Revisão Bibliográficas	18
a) Modelos de Superfície Continental	18
b) Soja.....	20
c) Milho	23
d) Cana-de-açúcar.....	25
e) Pastagem.....	28
1.2. Objetivos	29
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	30
2.1. Descrição do modelo SiB2.....	30
2.1.1. Condição de Contorno e Variáveis Prognósticas	31
2.1.2. Módulo Agrícola	35
2.1.3. Estádios de Desenvolvimento e Alocação de Carbono.....	38
2.1.4. Transporte Turbulento.....	43
2.1.5. Decomposição de Matéria Orgânica	46
2.2. Sítios Experimentais	49
2.2.1. Cana-de-açúcar.....	49
2.2.2. Soja.....	50
2.2.3. Milho	50
2.2.4. Pastagem	51
3. RESULTADOS	52
3.1. Desenvolvimento e Alocação.....	52
3.2. Índice de Área Foliar (IAF).....	56
3.3. Biomassa	60

3.4. Altura da Cana-de-açúcar.....	68
3.5. Decomposição de Matéria Orgânica	70
3.6. Produtividade das culturas	72
3.7. Fluxos.....	73
3.8. Cenários de Mudanças do Clima.....	77
4. CONCLUSÃO.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
APÊNDICE A – Parâmetros aerodinâmicos calculados para as culturas	98
a) Perfil da velocidade do vento e do coeficiente de transferência de momento dentro do dossel	98
b) Modificação do perfil do vento acima do dossel.....	99
c) Solução das equações de transferência de momento no dossel.....	100
d) Condições apropriadas para a transferência dentro e acima do dossel.....	101
APÊNDICE B – Calibração do modelo e dos módulos implementados.....	103
APÊNDICE C – Parâmetros aerodinâmicos calculados para as culturas.....	106
APÊNDICE D – Forçantes das simulações	111

1. INTRODUÇÃO

A superfície vegetada do planeta tem sofrido diversas modificações causadas pelo homem, alterando a estrutura e o funcionamento dos ecossistemas. Essas mudanças diminuem a capacidade dos ecossistemas de providenciarem recursos naturais como alimentos e água potável, entre outros, servindo como regulador do clima, qualidade do ar e da água e recursos do solo. A expansão das áreas de atividade agropecuária é atualmente a grande responsável pelas preocupações ambientais sobre o desmatamento das florestas tropicais e a perda da biodiversidade, fragmentação e perda dos habitats, emissão de gases de efeito estufa, perda da qualidade do solo devido da erosão e salinidade, decréscimo da qualidade e quantidade de água, além de alterar o clima regional. No entanto, a expansão agrícola tem providenciado um crucial serviço para a humanidade suprir a demanda de alimentos em face do crescimento da população mundial, envolvendo uma questão econômica atual que engloba a produção de alimentos e a deterioração do meio ambiente.

Aproximadamente 40% da superfície do planeta livre de gelo está sendo usada para a agricultura e grande parte desta terra substituiu florestas, savanas e pastagens (FOLEY et al., 2005). O desmatamento de florestas tropicais para cultivo ou para pastagem é responsável por 12 a 26% de toda a emissão de dióxido de carbono para a atmosfera (DEFRIES; ACHARD, 2002; HOUGHTON, 2003). Mudanças no uso da terra podem modificar significativamente o clima regional e global devido a mudança no balanço de massa e energia da superfície continental (PITMAN et al., 1999; PIELKE et al., 2002). Além disso, de 20 a 30% da água total disponível na superfície do planeta é utilizada para a irrigação (CASSMAN e WOOD, 2005). A fixação de nitrogênio através da produção de fertilizantes e cultivo atualmente é superior à fixação realizada por sistemas naturais (GALLOWAY et.al., 1995; SIL, 1999).

De acordo com Ramankutty et al. (2008), no ano 2000 a superfície coberta por culturas agrícolas era de 15,1 milhões km² enquanto a área de pastagem cobria 28,3 milhões km², representando um total de 30% da superfície continental do globo. Essa significativa área de cobertura agrícola e seu provável aumento ao longo das próximas décadas, tendo em vista o aumento da população mundial associada à necessidade de aumentar a produção de alimentos e à crescente expansão da produção de biocombustível, é um dos atuais problemas ambientais da sociedade. Essa mudança no uso da terra tem um grande potencial de influência nos processos biogeoquímicos e biogeofísicos ao redor do mundo.

O ajuste dos preços dos alimentos pela inflação mostra a significativa tendência do último século de suprimir a alta demanda. Mais recentemente, o preço dos alimentos tem crescido rapidamente e muitos observadores têm atribuído isso, em parte, aos episódios meteorológicos de estiagem prolongada (LOBELL et al., 2011). Esforços para modelar o efeito do clima na produtividade dos alimentos, para cada local individualmente, devem considerar os efeitos em todo o mundo, dado que as commodities agrícolas são negociadas com os preços de mercado em todo o mundo e são determinadas pela oferta e a demanda global (ROSENZWEIG; PARRY, 1994; REILLY et al., 1996; HERTEL et al., 2010).

Muitos estudos têm destacado o papel das mudanças climáticas na agricultura e na produção de alimentos (CHANILLOR et al., 2007; HAIM et al., 2008; TUBIELLO et al., 2007). Segundo o IPCC (2007), as temperaturas médias globais aumentaram cerca de 0,13 °C por década desde 1950. Um ritmo ainda mais rápido de aproximadamente 0,2 °C por década é esperado nas próximas 2 a 3 décadas, com tendência de que ocorra com maior probabilidade em áreas de terra cultivada. Considerando esses prognósticos de aumento das temperaturas, admite-se que as regiões onde o zoneamento agrícola é adequado para alguns tipos de culturas agrícolas se tornarão desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal. Culturas tolerantes a altas temperaturas provavelmente serão beneficiadas com o aumento do nível térmico decorrente do aquecimento global e passarão a apresentar condições favoráveis ao desenvolvimento.

Estudos apresentam as perdas econômicas anuais provocadas pelo aumento de 1 °C na temperatura, chegando a valores de US\$ 375 milhões para o café, somando os estados de Minas Gerais, Paraná e São Paulo, e US\$ 61 milhões para o milho em São Paulo (SIQUEIRA et al., 2001; MARENGO et al., 2001; ASSAD, 2004; NOBRE et al. 2005). Além desses, outros estudos contemplam efeitos sobre pragas, doenças, solos e outros aspectos do sistema produtivo agrícola.

Ao serem projetados novos cenários pelos modelos climáticos, nos quais a temperatura média global deve se elevar ao longo de todo o ano, com mais intensidade no inverno, e a chuva deve se concentrar durante os meses de verão, na região sudeste do Brasil, acentuando e prolongando o período de seca no inverno, é razoável formular a hipótese de que a deficiência hídrica neste período aumentará em comparação ao que se observa atualmente e, conseqüentemente, as espécies perenes terão maior dificuldade em suportar o estresse por falta d'água durante o período mais seco do ano, sendo mais prejudicadas que as culturas anuais (PELLEGRINO, 2007).

Quanto à adaptação aos impactos das mudanças climáticas, podem ser propostos novos sistemas produtivos incluindo a introdução de novas culturas em regiões onde se tornem aptas, ou seja, uma revisão do zoneamento agrícola conhecido hoje e alteração dos períodos de plantio.

O desenvolvimento das culturas é afetado não apenas pelas condições médias da atmosférica mas também pela frequência de eventos extremos, como geadas, ondas de calor, enchentes e secas (BAIGORRIA et al., 2007; DUBROVSKY et al., 2000). Muitos estudos têm incluído o cenário de mudanças climáticas apenas na magnitude da temperatura e precipitação, porém esses eventos extremos são os que mais afetam a produção agrícola.

Uma ferramenta que vem sendo aprimorada ao longo das últimas décadas, para melhor entender a dinâmica da interação biosfera-atmosfera, é o desenvolvimento de modelos que representam a vegetação terrestre (DICKINSON et al., 1983; SELLERS et al., 1986; Xue et al., 1991). A evolução dos modelos que representam o sistema solo-planta-atmosfera começa com modelos simples que calculam apenas as trocas, entre a atmosfera e superfície, de momento, energia e de vapor d'água até versões mais complexas, que incluem o ciclo do carbono, nutrientes, vegetação dinâmica e dinâmica da vegetação (SELLERS et al., 1997).

As aplicações desses modelos estão relacionadas ao zoneamento agroecológico, previsão de produtividade regional e estudos de cenários para explorar o efeito das mudanças ambientais na agricultura (BOUMAN et al., 1996).

1.1. Revisão Bibliográfica

a) Modelos de Superfície Continental

As trocas de energia, vapor d'água e CO₂ entre superfície e atmosfera desempenha a maior função nas mudanças de clima e consequências a longo prazo. Uma eficiente maneira para estimar essas mudanças são os modelos de superfície que simulam a troca dos fluxos da superfície com a atmosfera, enquanto são validados com dados de superfície (SELLERS et al., 1997).

O desenvolvimento dos modelos de superfície continental começaram na década de 1970, representando o balanço de água de maneira bastante simplificada, como se o solo fosse um recipiente (modelo bucket), em que, apenas a precipitação e a evaporação são levados em conta. Uma parametrização básica do balanço de água pois somente ocorre o escoamento

d'água, tanto superficial como sub-superficial, somente se o recipiente estiver completo. Os primeiros modelos também tinham uma forma simplificada para simular as transferências aerodinâmicas utilizando valores prescritos e invariantes dos parâmetros que descrevem as características da superfície, como albedo, rugosidade e umidade do solo (CUNHA, 2007).

Os modelos começaram a demonstrar significativas mudanças, em meados da década de 1980, quando começaram a incorporar descrições do processo de transpiração da vegetação, através do controle fisiológico da vegetação e o cálculo da evapotranspiração. Um novo esquema para representar o sistema solo-planta-atmosfera foi incorporado levando em consideração o tipo de vegetação, com conjuntos de parâmetros que descrevesse as variações espaciais dos principais biomas da superfície terrestre (NOIHAN e PLANTON, 1989). No balanço de água, a água é extraída do solo pelas raízes das plantas e transferida para a atmosfera pelos estômatos das folhas.

O avanço na representação da fisiologia vegetal proporcionou a implementação de modelos biogeoquímicos para representar de maneira realística a assimilação de CO_2 e assim auxiliar os estudos de mudanças climáticas e ciclo do carbono (SELLERS et al., 1997).

A evolução dos modelos da biosfera, continuou na década de 1990, quando implementaram a dinâmica de nutrientes, a competição ecológica entre os biomas, além da descrição mais elaborada dos processos de fotossíntese e melhorias na descrição das transferências de calor, vapor d'água e gás carbônico na interação com a atmosfera. A interferência do clima nos processos biofísicos e biogeoquímicos, nos modelos, deixa a alteração da vegetação mais dinâmica, respondendo às mudanças no clima (FOLEY et al., 1995).

Alguns modelos da biosfera criados mais recentemente trazem as características da superfície vegetada prescritas através de sensoriamento remoto. Outros trabalham a representação do dossel de maneira mais detalhada como controle da evapotranspiração e interceptação da precipitação nas folhas e no solo. O solo trabalha acoplado um modelo de hidrologia que considera as trocas de umidade e energia nas diversas camadas do solo (CHEN e DUDHIA, 2001).

Atualmente os modelos de superfície vem incorporando modelos que representam as culturas agrícolas visando a produtividade para prever ou explorar o potencial produtivo sob certas condições. Segundo Munakata (1995), os estudos de simulação de crescimento podem

ser divididos em duas linhas: aquela que considera a estrutura do dossel da planta (características para a interceptação da luz) e a dinâmica da produção de biomassa seca (crescimento).

b) Soja

A soja foi implementada no Brasil no início do século XX na região Sul onde encontrou um clima semelhante ao da região temperada, do sudeste asiático, de onde se origina. Até o final da década de 1940, sua pequena produção era destinada em sua maior parte para a alimentação de animais do que para a alimentação humana, como óleos e farelos. A partir da década de 60 sua produção foi impulsionada por um maior consumo devido à substituição do óleo de gordura animal pelo óleo vegetal mais saudável. Nesse período se estabeleceu como uma cultura de grande importância econômica, pois superou a marca de um milhão de toneladas (SANTOS, 2000).

Os incentivos fiscais que foram promovidos nos anos 60 no Rio Grande do Sul e a queda da produção na Rússia e China fizeram com que a produção brasileira saltasse para 15 milhões de toneladas no final da década de 70 e novas áreas foram ocupadas no sul do país. O aumento da produção de soja fez com que ela se expandisse para outras regiões, e nos anos 80, houve a expansão da cultura para a região Centro-Oeste devido a incentivos fiscais, desenvolvimento de um pacote tecnológico para a produção na região, topografia favorável para a mecanização e as condições físicas do solo e do clima que possibilitaram o cultivo de verão (CONTE, 2006).

A produção brasileira de grãos de soja [*Glycine Max (L.) Merr.*] mais do que dobrou na última década, subindo de 32,8 milhões de toneladas em 2000 para 68,5 milhões de toneladas em 2010. No mesmo período, a área plantada aumentou 70 %, passando de 13,6 milhões de hectares em 2000 para 23,2 milhões de hectares em 2010, enquanto a produtividade incrementou 23 % (de 2.411 kg ha⁻¹ para 2.952 kg ha⁻¹; IBGE, 2010). A soja é a cultura agrícola brasileira que mais cresceu nas últimas três décadas e corresponde a 49% da área plantada com grãos no país (BRASIL, 2011).

A descrição dos estádios de desenvolvimento da soja se baseia em Fehr e Caviness (1977), que dividem o desenvolvimento da cultura em estádios vegetativos (letra V) e estádios reprodutivos (letra R), com exceção dos dois primeiros. O estágio vegetativo (VE) ocorre quando os cotilédones encontram-se acima da superfície, e o VC, é o estágio em que os cotilédones estão completamente abertos. O número do estágio vegetativo é correspondente

ao número de folhas abertas, como mostra a Figura 1.1(uma folha aberta V1; duas folhas abertas V2, e assim por diante até que ocorra o florescimento). O estágio reprodutivo começa em R1 (uma flor aberta em qualquer nó do caule) e vai até a maturação plena quando cerca de 95% das vagens estão maduras. Os estádios intermediários nessa fase são observados pelo desenvolvimento da vagem e pelo preenchimento dos grãos.

Figura 1.1: Estádios de desenvolvimento da cultura da soja, com a Fase Vegetativa e a Fase Reprodutiva (adaptado de www.pioneersementes.com.br/ArtigosDetalhe.aspx?!=62).

A soja é uma cultura anual, herbácea e alguns cultivares são mais sensíveis ao efeito da atmosfera. De modo geral, a temperatura é uma das variáveis que mais afeta o desenvolvimento e o acúmulo de biomassa. O desenvolvimento e crescimento da soja (Figura 1.2) são adaptados para regiões onde a temperatura oscila entre 20 e 30°C, clima encontrado no cerrado. Regiões com temperatura abaixo de 10°C e ou acima de 40°C mostram desenvolvimento nulo (FARIAS et al., 2007). Temperaturas muito elevadas adiantam o florescimento, diminuem a altura da planta e aceleram a maturação, o que afeta negativamente a produção resultando na abscisão da vagem.

Figura 1.2: Desenvolvimento da planta da soja (CORREA, 2008).

A distribuição da precipitação pluviométrica é o fator que mais limita a produção de grãos, principalmente durante as fases da floração e enchimento de grãos, nos quais a demanda de água é maior, sendo, portanto, mais críticas à ocorrência de déficits hídricos. Para apresentar um bom desempenho, a cultura da soja necessita, além de um volume de água adequado, de uma boa distribuição das chuvas ao longo do ciclo, satisfazendo suas necessidades, principalmente, durante as fases mais críticas (CUNHA et al, 1998), .

A intensidade da radiação e a duração do espectro luminoso determinam algumas características morfológicas e fenotípicas marcantes na soja, como a estrutura da planta, indução ao florescimento durante toda fase de desenvolvimento (THOMAS, 1994). A fotossíntese está ligada à radiação solar e, segundo Camara (1991), pode afetar a elongação da haste principal e ramificações, expansão foliar, pegamento de vagens e grãos e a fixação biológica. A soja é uma planta de “dia curto”, ou seja, a duração do dia afeta as taxas de emergência até a indução floral, principalmente o tempo para o florescimento (RODRIGUES et al, 2001).

c) Milho

O milho (*Zea mays*) é um dos cereais mais consumidos no mundo e tem grande importância não apenas para o consumo humano, mas também na alimentação de animais sendo utilizado como matéria prima de ração. No Brasil, o milho é tradicionalmente plantado na estação chuvosa, porém nas últimas décadas, com o avanço da avicultura, o milho passou a ser uma alternativa para os produtores de soja nos meses após a colheita, de março a junho, denominado milho safrinha. Essa segunda época de colheita é conhecida como safrinha. Embora em condições desfavoráveis o milho safrinha (milho sequeiro) tem ganhado importância para os produtores que, apesar de terem a produtividade afetada pelo regime de chuvas, conseguem uma produção, em época ociosa, que gera lucro pelo fato de que o preço do cereal é geralmente maior nessa época (CHIODI, 2006).

A duração do ciclo da cultura do milho no Brasil tem períodos variáveis entre 110 e 150 dias. Porém, esse ciclo é variável e dependendo do genótipo, pode ser classificada de superprecoce, precoce e tardio. O desenvolvimento se dá por três etapas: semeadura, fase vegetativa e fase reprodutiva.

Quando ocorre a emergência da plântula, inicia-se a fase de desenvolvimento vegetativo. Essa fase se caracteriza pelo aumento na biomassa das partes aéreas e raízes. Os estádios fenológicos são marcados por diferenças na morfologia da planta, foi desenvolvida por Ritchie et al. (1993) e é marcada pelo número de folhas desenvolvidas, sendo o estágio V1 correspondente a uma folha desenvolvida, o V2 quando existem 2 folhas desenvolvidas e assim por diante. Não há um número máximo de folhas desenvolvidas. O fim da fase vegetativa é dado quando ocorre o pendramento, ou seja, a emergência da inflorescência masculina (VT), também conhecida como pendão (Figura 1.3).

Figura 1.3: Estádios de desenvolvimento da cultura do milho, com a Fase Vegetativa e a Fase Reprodutiva (adaptado de www.ebah.com.br/content/ABAABFRQAC/fase-desenvolvimento-cultura-milho).

Inicia-se assim o desenvolvimento reprodutivo que tem como primeira etapa o aparecimento da espiga, a emergência dos estigmas (abertura por onde entra o pólen) e a liberação do pólen. Os próximos estádios são marcados pelo crescimento dos grãos, secamento das folhas e decréscimo da porcentagem de umidade que estava contida nos grãos, até que o mesmo atinja a maturidade fisiológica. Esta última é marcada pelo peso máximo da matéria seca do grão, quando sua umidade chega aproximadamente a 30%. Para fazer a colheita é necessário que os grãos estejam bem secos, com umidade em torno de 14% (EMBRAPA, 2011). Nessa época as folhas são quase que na totalidade secas.

O processo de germinação pode ser influenciado pela temperatura, pela profundidade da semente e pela temperatura do solo. A fenologia pode ser regulada basicamente pelo regime térmico, o que permite o conhecimento dos estádios fenológicos da cultura por meio da temperatura da localidade do plantio e da soma calórica requerida para atingir o ponto de maturidade fisiológica. Gadioli et al. (2000) dizem que há uma temperatura média do ar correspondente ao máximo rendimento de grãos. Elevadas temperaturas fazem com que as plantas do tipo C4 tenham maior taxa fotossintética, pois não apresentam fotorespiração.

Situações em que as temperaturas noturnas são elevadas podem comprometer o rendimento de grãos (BRUNINI et al., 2001). A ocorrência de geadas também é um risco provável que afeta a produtividade da cultura, principalmente na safrinha.

A redução no rendimento dos grãos pode ser causada por fatores climáticos como o estresse hídrico que afeta negativamente o índice de área foliar, diminuindo a captura da radiação solar incidente que, por sua vez, diminui a fotossíntese e também afeta o acúmulo de matéria seca nas plantas de milho (FRANÇA et al., 1999). Não somente a quantidade de água é importante, mas o período em que ocorre a estiagem, Bermaschi et al. (2006) mostram que o déficit hídrico tem maior impacto sobre a produtividade de grãos quando ocorre no florescimento.

A radiação solar é a fonte de energia utilizada pelas plantas para transformarem o dióxido de carbono da atmosfera em energia metabólica. A cultura do milho possui alta eficiência no uso da radiação, atingindo $3,8 \text{ Mg J}^{-1}$, segundo Lindquist et al. (2005). O fotoperíodo também tem influência sobre o cultivo já que o aumento do fotoperíodo pode prolongar o crescimento vegetativo e assim aumentar o número de folhas.

A produção de milho no mundo cresceu nos últimos anos devido ao aumento do consumo do etanol produzido principalmente nos EUA. A produção brasileira tem acompanhado o crescimento das produções de frango e suíno, mas o aumento do preço do milho nos últimos anos tem acompanhado o consumo mundial de alimentos que teve um considerável aumento do consumo de países populosos como China e Índia, que aumentaram o poder de compra devido à ascensão de uma nova classe consumidora em seus países.

A produção brasileira de grãos de milho na última década aumentou cerca de 73%, subindo de 32,3 milhões de toneladas em 2000 para 56,1 milhões de toneladas em 2010. Porém para o mesmo período, a área plantada não teve alteração significativa, passando de 12,6 milhões de hectares em 2000 para 12,8 milhões de hectares em 2010, o que indica que houve aumento da produtividade da ordem de 72%, de 2.536 kg ha^{-1} para 4.382 kg ha^{-1} (IBGE, 2010).

d) Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar pertence à família Poaceae e ao gênero *Saccharum*, é uma planta perene e própria de climas tropicais e subtropicais. Acredita-se que a cana-de-açúcar seja nativa do sudeste da Ásia, embora o exato local de origem seja incerto. As primeiras mudas

chegaram ao Brasil na época do descobrimento e encontrando características climáticas favoráveis e solos férteis, a cultura expandiu-se rapidamente pelo Nordeste do país, de tal maneira que antes do final do século XVI o Brasil já havia conquistado o monopólio mundial de produção de açúcar. Com o início do cultivo da cana-de-açúcar no Caribe e nas Antilhas, em meados do século XVII, houve o fim do monopólio do açúcar brasileiro no mercado europeu (CANABRAVA, 2005).

No final do século XIX, a expansão mundial dos pólos produtores de açúcar reduziu a importância do Brasil no mercado mundial, comprometendo o cultivo no país. Com a produção de açúcar na Europa e o início da cultura do café no Brasil, a cultura brasileira teve momentos de apogeu e declínio. Em meados da década de 70, por ocasião do primeiro choque do petróleo, o Brasil importava cerca de 80% do petróleo consumido internamente. A expressiva elevação dos preços desse produto levou o governo brasileiro a lançar um projeto para aumentar a oferta de álcool (Proálcool), a partir de uma biomassa renovável para substituir o petróleo importado (DIEESE, 2007).

A cana-de-açúcar é uma planta que perfilha e desenvolve-se sob a forma de touceiras, cuja parte aérea é formada por colmos, folhas, inflorescência e sementes (MOZAMBINI et al., 2006). Cada perfilho comporta-se como uma planta separada, mas têm ligações entre si dentro de uma mesma touceira, permitindo a troca de nutrientes e água. A parte subterrânea é formada por raízes e rizomas sendo o sistema radicular ramificado, do tipo fasciculado, com maior quantidade de raízes nas camadas superiores do solo. O colmo é uma haste sem ramificações em formato de cilindro, composto de nós e entrenós, e as folhas são compostas de bainha (folha que envolve o colmo) e lamina foliar (de estrutura alongada e plana), sendo conectadas ao colmo na base dos nós, de modo alternado em duas linhas opostas no caule (JAMES, 2004).

Os processos fisiológicos variam temporalmente com os estágios de desenvolvimento da cana-de-açúcar e podem ser classificados como: brotação, perfilhamento, crescimento, maturação e florescimento. A brotação é feita por toletes contendo uma ou mais gemas (colmo em miniatura contendo nós e entrenós) que se desenvolvem para produzir outros colmos. O perfilhamento ocorre na parte subterrânea e é um processo fisiológico de ramificação e formação das raízes. O crescimento é o desenvolvimento da planta com o aumento da biomassa, ou seja, crescimento da parte estrutural sem acumular sacarose. A fase de maturação é a fase em que a planta não cresce estruturalmente, porém aumenta a biomassa

com o acúmulo de sacarose, proveniente da fotossíntese. A inflorescência é o período em que o meristema apical deixa de produzir folhas e colmo e passa a formar a flor, indesejável para o produtor (CASAGRANDE, 1991).

Como o ciclo da cana-de-açúcar dura de um ano a um ano e meio, a planta sofre a influência de variáveis climáticas ao longo de todo o ciclo vegetativo. A planta precisa encontrar condições de temperatura do ar e umidade do solo que permitam o desenvolvimento suficiente durante a fase vegetativa seguido de um período com restrição hídrica e térmica para o enriquecimento da sacarose na época próxima da colheita (CARLIN, 2005).

A planta suporta razoavelmente temperaturas elevadas de 34 a 35 °C, porém valores acima de 38 °C podem afetar o seu desenvolvimento por prejudicar as atividades fisiológicas. A cana-de-açúcar não é tolerante ao frio, sendo que as partes não protegidas e mais jovens, como folhas jovens e a gema apical, congelam quando a temperatura é inferior a 0 °C. Os danos causados dependem tanto da temperatura mínima atingida como da duração do frio. A precipitação necessária varia de 1000 a 1500 mm, sendo mais importante a distribuição da chuva ao longo do ciclo do que o total acumulado (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). Durante o crescimento vegetativo, as chuvas devem ser abundantes, porém na maturação a estiagem favorece um maior acúmulo da sacarose (ALFONSI et al., 1987). Por ser uma planta do tipo C4, apresenta alta eficiência de conversão da radiação em energia química.

Os principais impactos ambientais envolvidos na produção de cana-de-açúcar, que envolvem o solo mal manejado, são a erosão e a compactação e perda da fertilidade, além da prática de queimadas que emitem gases do efeito estufa (CO_2 , CO , N_2O e CH_4). Por outro lado, a reciclagem dos resíduos produzidos pela agroindústria da cana reutilizados no campo promove a renovação de nutrientes, enquanto a adição de grandes quantidades de matéria orgânica promove a melhoria da fertilidade do solo, num impacto altamente positivo.

A produção brasileira de cana-de-açúcar mais do que dobrou na última década, subindo de 326,1 milhões de toneladas em 2000 para 719,1 milhões de toneladas em 2010. No mesmo período, a área plantada aumentou 83%, passando de 4,9 milhões de hectares em 2000 para 9,0 milhões de hectares em 2010, enquanto a produtividade aumentou 20%, de 66,5 t ha⁻¹ para 79,9 t ha⁻¹ (IBGE, 2010).

e) Pastagem

Na agricultura brasileira, atividade pecuária é um dos setores mais importantes, uma vez que ocupa cerca de 185 milhões de hectares, gera milhares de empregos diretos e indiretos e tem uma participação significativa na renda bruta da agricultura nacional (DA CUNHA, 2002). A pastagem é a fonte mais barata de alimento para a produção bovina, pois a colheita é feita pelo próprio animal e assim não gera gastos com máquinas, mão de obra e combustível para a sua colheita.

A pecuária bovina é importante por fornecer produtos de elevado valor nutricional como carne e leite para a alimentação humana. Estimativas apresentadas por Arruda (1997) mostraram que cerca de 90% da carne bovina produzida no país vem de rebanhos mantidos exclusivamente em pastagens, o que estabelece a importância do pasto como principal fonte nutricional para os bovinos de corte no Brasil, e o restante tendo utilizado áreas de pasto em alguma fase do processo de criação.

Grande parte da Floresta Amazônica brasileira é destinada à formação de pastagens e à agricultura de subsistência, sendo que a pecuária talvez seja a mais polêmica por apresentar um caráter avassalador, devido à exigência de grandes áreas de pastagens formadas por meio da derrubada e queima da mata. A atividade pecuária teve início nos anos 70, com apoio do governo federal para colonizar a região construindo estradas e dando incentivos fiscais. A pecuária era utilizada como uma forma de evitar a ocupação de áreas improdutivas por posseiros. Desde o início nota-se que a atividade é lucrativa devido ao baixo preço de aquisição da terra, porém tem caráter predatório e é a causa da intensificação do processo de desertificação na região. Algumas observações mostram que o crescimento da área de plantio da soja desloca a pecuária para novas áreas causando um desmatamento adicional (SALIMON, 2003).

A vida útil de produtividade dessas pastagens cultivadas na Amazônia é reduzida devido à implementação inadequada de espécies de gramíneas, à não fertilização do solo e aos problemas de manejo dessas pastagens, que degradam as propriedades físicas do solo (SERRAO; HOMMAN, 1991). A importância das pastagens também é evidenciada pela extensão de terras ocupadas pelas plantas forrageiras, 73% da área agrícola cultivada no país e 34% da área total do Estado de São Paulo.

A temperatura e a disponibilidade hídrica são os principais fatores climáticos que afetam o desenvolvimento vegetativo e o florescimento das espécies forrageiras.

Nas regiões tropicais e subtropicais, entre 30°S e 30°N, segundo Rolim (1994), 36% é a proporção da área onde o crescimento de plantas é limitado apenas pela temperatura; 31% é a proporção da área onde o crescimento de plantas é limitado apenas pela deficiência hídrica; 36% é a proporção da área onde o crescimento de plantas é limitado pela temperatura e deficiência hídrica.

Países de clima temperado têm como base de suas pastagens plantas forrageiras de ciclo C3, cujo potencial de produção gira em torno de 20 toneladas de matéria seca por hectares (DA SILVA, 1997). Plantas de ciclo C4, típicas de regiões tropicais e subtropicais, possuem potencial de produção muito superior, com produtividade de até 80 toneladas de MS/ha para capim elefante (DA SILVA, 1997).

1.2. Objetivos

O objetivo dessa dissertação é aperfeiçoar o modelo de fluxos de energia, água e CO₂ na superfície terrestre Simple Biosphere Model (SiB2), para representar os agroecossistemas de cana-de-açúcar, soja, milho e pastagem, em ambientes no Brasil, por meio da descrição matemática e computacional de novos processos, calibração e testes de sensibilidade.

Foram feitas as seguintes metas específicas para este fim:

- (i) Implementar rotinas de vegetação dinâmica;
- (ii) calibrar o modelo visando a produtividade das culturas;
- (ii) avaliar a produtividade primária calculada modelo às variações de temperatura e chuva, com simulação de cenários de variações climáticas que representem modificações destas forçantes.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição do modelo SiB2

O modelo SiB2 (*Simple Biosphere Model 2*) é uma representação da biosfera na camada da superfície continental, que se baseia em aspectos físicos e biológicos. O modelo foi desenvolvido para calcular a transferência de energia, massa e momentum entre ecossistemas naturais e a atmosfera. As equações completas usadas no modelo são documentadas em Sellers et al. (1996).

O balanço de radiação solar e infravermelha termal na superfície é resolvido usando a aproximação de "two-stream", (DICKINSON, 1983), que separadamente considera a radiação direta e difusa em duas bandas (visível e infra-vermelho). Outras hipóteses simplificadoras são: no dossel há uma fração verde (vegetação viva) e outra complementar de folha morta; uma fração de cobertura do dossel e outra complementar para a cobertura do solo. As frações de vegetação viva, morta e o solo tem, respectivamente, seus conjuntos particulares de propriedades óticas como a refletância e a transmitância.

Os processos hidrológicos simulados no modelo incluem: interceptação da precipitação (determinada por um modelo análogo ao de atenuação da radiação exponencial num fluxo vertical), infiltração, fluxo de água entre as camadas do solo, percolação profunda de perda para o aquífero, evaporação do solo, perda de água por evaporação da interceptação de água no dossel, e transpiração do dossel. A estrutura do solo é dividida em três zonas funcionais adjacentes: a primeira (camada superficial) é pouco espessa (2 cm) onde ocorre a evaporação direta do solo; a segunda (camada de raízes) é responsável pela fonte de umidade para transpiração da vegetação e onde é definido o sistema radicular; a terceira (camada de drenagem) promove o escoamento da água por drenagem gravitacional para o aquífero profundo. Neste trabalho a segunda camada é dividida em 8 subcamadas.

A fisiologia do dossel é caracterizada originalmente da seguinte forma: a fotossíntese e a condutância estomática são calculadas pelas equações de Farquhar-Ball-Collatz (BALL et al., 1987; COLLATZ et al., 1992; FARQUHAR et al., 1980). Esses conjuntos de equações diferenciam os diferentes metabolismo das plantas C_3 e C_4 . A taxa de fotossíntese é uma função da absorção da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), da eficiência quântica, da concentração intermolecular de CO_2 e da concentração de CO_2 atmosférica, condutância

foliar, capacidade máxima enzimática do Rubisco (V_{max}), e da temperatura do dossel (T_c). A produtividade líquida, ou assimilação de CO_2 , é a diferença da fotossíntese bruta menos a respiração da planta, que é função da temperatura e da própria taxa de fotossíntese. A assimilação na folha é descrita como a taxa mínima limitante de três fatores: a eficiência da enzima fotossintética RuBisCO, a quantidade de PAR (radiação fotossinteticamente ativa) capturada pela clorofila, e a capacidade da folha de exportar os produtos da fotossíntese, para plantas C_4 , refere-se à eficiência da enzima PEP-carboxilase.

2.1.1. Condição de Contorno e Variáveis Prognósticas

O SiB2 foi utilizado na versão *off-line*, ou seja, desacoplado do MCG (modelo de circulação geral da atmosfera), onde as condições forçantes são provenientes de dados meteorológicos observados no campo, que representam no caso do MCG a variável do ponto de grade em uma altura de referência, e que devem ser fornecidas para cada passo de tempo (Δt), aqui prescrito como 3600 s. As forçantes são: irradiância de onda curta incidente, K_i ($W m^{-2}$); pressão de vapor d'água, e_m (hPa); temperatura do ar, t_m (K); velocidade horizontal do vento, u_m ($m s^{-1}$) e precipitação observada (mm).

As variáveis prognósticas são a temperatura do dossel (T_c), temperatura da superfície do solo (T_g), temperatura do solo profundo (T_d), armazenamento de água por interceptação do dossel (M_{cw}) e pela superfície do solo (M_{gw}), gelo e neve interceptados pelo dossel (M_{cs}) e na superfície do solo (M_{gs}), grau de saturação de umidade em cada camada do solo (W_1 , W_2 e W_3), e condutância de superfície (g_c). Os índices c , g , d referem-se ao dossel (*canopy*), superfície do solo (*ground*) e solo profundo (*deep ground*), respectivamente. As equações prognósticas de temperatura são dadas pelas relações:

$$C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = Rn_c - H_c - \lambda E_c - \xi_{cs} \quad (1)$$

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = Rn_g - H_g - \lambda E_g - \frac{2\pi C_d}{\tau_d} (T_g - T_d) - \xi_{gs} \quad (2)$$

$$C_d \frac{\partial T_d}{\partial t} = \frac{1}{2(365\pi)^{1/2}} (Rn_g - H_g - \lambda E_g) \quad (3)$$

em que:

R_{nc} , R_{ngs} : radiação disponível ($W m^{-2}$);

H_c, H_{gs} : fluxo de calor sensível (W m^{-2});

$\lambda E_c, \lambda E_{gs}$: fluxo de calor latente (W m^{-2});

C_c, C_{gs} : capacidade calorífica ($\text{J m}^{-2} \text{K}^{-1}$);

λ : calor latente de vaporização (J kg^{-1});

τ_d : 86400 (s);

ξ_{gs} : troca de energia nas mudanças de fase da água interceptada (W m^{-2}).

A evapotranspiração do dossel, E_c , é separada em duas componentes: (i) E_{ci} , evaporação da água interceptada pelo dossel e (ii) E_{wc} transpiração da parte seca das folhas proveniente da extração de água do sistema radicular. Similarmente, a evaporação da superfície do solo é a soma de E_{gi} e E_{gs} .

As equações prognósticas dos termos de armazenamento de água por interceptação da precipitação são:

$$\frac{\partial M_{cw,s}}{\partial t} = P - D_d - D_c - E_{ci} / \rho_w \quad (4)$$

$$\frac{\partial M_{gw,s}}{\partial t} = D_d + D_c - E_{gi} / \rho_w \quad (5)$$

Onde:

$M_{cw,s}, M_{gw,s}$: água ou neve estocada no dossel ou na superfície, (m);

$P = P_c + P_i$: taxa de precipitação (m s^{-1});

D_d : taxa de escoamento pelo dossel (m s^{-1});

D_c : taxa de drenagem no dossel (m s^{-1});

E_{ci}, E_{gi} : taxa de evaporação do estoque por interceptação ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

ρ_w : densidade da água (kg m^{-3}).

Para as equações prognósticas para a umidade do solo no esquema de 3 camadas, supõe-se o balanço hídrico de forma que:

$$\frac{\partial W_1}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_1} \left[P_{w1} - Q_{1,2} - \frac{1}{\rho_w} E_{gs} \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_2} \left[Q_{1,2} - Q_{2,3} - \frac{1}{\rho_w} E_{ct} \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial W_3}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_3} [Q_{2,3} - Q_3] \quad (8)$$

em que:

$W_1, W_2, W_3 = \theta_i/\theta_s$: grau de saturação do solo nas três camadas;

θ_i : umidade volumétrica do solo na camada i ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

θ_s : valor de θ na saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

D_i : espessura da camada do solo (m);

$Q_{i,i+1}$: escoamento entre as camadas i e $i+1$ (m s^{-1});

Q_3 : drenagem gravitacional para recarga do armazenamento da umidade do solo (ms^{-1});

$P_{WI} = D_c + D_d + R_{OI}$: infiltração da precipitação dentro do armazenamento superior da umidade do solo (m s^{-1});

R_{OI} : infiltração excedente da taxa de escoamento da superfície (m s^{-1}).

A equação prognóstica para a condutância estomática de superfície é

$$\frac{\partial g_c}{\partial t} = -k_g (g_c - g_{Cinf}) \quad (9)$$

em que:

g_c : condutância estomática de superfície (m s^{-1});

k_g : constante temporal (s^{-1});

g_{Cinf} : estimativa de g_c em $t \rightarrow \infty$ (m s^{-1}).

Se requer que sejam prescritos os parâmetros físicos, fisiológicos e morfológicos da superfície, que são uma representação da vegetação e do solo localmente. Alguns parâmetros podem variar mensalmente com o tempo para acompanhar a fenologia, e há parâmetros não variam no tempo (Tabela 2.1) (DA ROCHA et al. 1996; LLOPART, 2009). Para a representação das culturas agrícolas no SiB2 são utilizadas as mesmas equações físicas e biológicas usadas para simular o balanço de energia e biomassa para ecossistemas naturais.

Tabela 2.1: Conjunto de parâmetros morfológicos, ópticos, fisiológicos e físicos do solo no modelo SiB2, para o ecossistema da pastagem.

<i>Símbolo</i>	<i>Definição</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor</i>
(a) Parâmetros morfológicos			
Z_1	Altura da base do dossel	m	0,026
V_c	Fração de cobertura do dossel	—	0,95
χ_L	Fator de distribuição angular da folha	—	0,01
G_1 ;	Coeficientes de transferência de momentum	—	1,449;
G_4			11,785
D_l	Espessura da camada superficial do solo	m	0,02
D_r	Espessura da camada de raízes	m	3,60
D_T	Espessura da camada de drenagem	m	1,00
(b) Propriedades ópticas			
$\alpha_{v,l}$	refletância folha, VIS, viva	—	0,1
$\alpha_{v,d}$	refletância folha, VIS, morta	—	0,16
$\alpha_{N,l}$	refletância folha, NIR, viva	—	0,45
$\alpha_{N,d}$	refletância folha, NIR, morta	—	0,39
$\delta_{v,l}$	transmitância folha, VIS, viva	—	0,05
$\delta_{v,d}$	transmitância folha, VIS, morta	—	0,001
$\delta_{N,l}$	transmitância folha, NIR, viva	—	0,25
$\delta_{N,d}$	transmitância folha, NIR, morta	—	0,001
a_{sv}	refletância do solo, VIS	—	0,11
a_{sn}	refletância do solo, NIR	—	0,225
(c) Parâmetros fisiológicos			
β_{ce}	Coeficiente de acoplamento da fotossíntese	—	0,98
S_2	Fator de estresse, alta temperatura	K	313.16
S_4	Fator de estresse, baixa temperatura	K	288.16
ψ_c	Fator ½ inibição potencial água	m	-200
f_d	Fator de respiração da folha	—	0,015
(d) Parâmetros físicos do solo			
ψ_s	Potencial de umidade do solo saturado	m	-0,153
K_s	Condutividade hidráulica do solo saturado	$m\ s^{-1}$	5,00E-6
B	Parâmetro do potencial de umidade do solo	—	9,46
Θ_s	Porosidade do solo na saturação	$m^3\ m^{-3}$	0,480

2.1.2. Módulo Agrícola

O modelo SiB2 originalmente descrito no capítulo anterior, tem limitações para representar os sistemas agrícolas, pois não há crescimento da vegetação (os estádios da vegetação poderiam apenas ser prescritos fixos no tempo, por exemplo em escala mensal, e desconectados da produtividade primária) sem cálculo da fenologia da planta; não há colheita, que é a mudança mais considerável na superfície, com a substituição de uma superfície vegetada por uma superfície de solo nu. Para atender estes processos, algumas equações e rotinas computacionais foram implementadas no modelo, e serão demonstradas neste e nos próximos capítulos, visando uma melhor representação dos sistemas agrícolas e da sua física como a decomposição da matéria orgânica, a fenologia da vegetação (emergência e crescimento das folhas, florescência e senescência), o balanço de solutos (transformação de nitrogênio inorgânico), e nas opções de manejo especificadas as datas de plantio e colheita, seleção das culturas (graus dias GD) para atingir o espigamento ou maturidade) (LOKUPITIVA et al., 2009).

Um fluxograma simplificado do modelo SiB2 original com os novos módulos descritos neste trabalho são mostrados na Figura 2.1.

As adaptações foram semelhantes às descritas no modelo Agro-IBIS (KUCHARIK et al., 2003), que inclui culturas anuais como milho e soja, e uma cultura perene como a cana-de-açúcar (CUADRA et al., 2010). O modelo Agro-Ibis é uma versão do modelo IBIS (FOLEY et al., 1995) que inicialmente foi concebido para ser um modelo de superfície para sistemas naturais e, a partir dele, fazer uma adaptação para a pastagem. Algumas modificações de valor nos parâmetros foram necessárias para representar as culturas do Brasil descritas no SiB2, a partir de dados da literatura descritos na Tabela 2.2.

Figura 2.1: Fluxograma do modelo SiB2 com as rotinas implementadas para a adaptação dos agrossistemas.

Tabela 2.2: Conjunto de parâmetros específicos para sistemas agrícolas implementados e as referências: (1) KUCHARIK et al., 2003; (2) CUADRA et al., 2010; (3) GAIEWSKI, 2009; (4) CORREA, 2008; (5) Valor resultado da calibração; (6) INMAN-BAMBER & SMITH, 2005; (7) CABRAL et al., 2011; (8) WULLSCHLEGER, 1993. Continua.

Símbolo	Definição	Unidade	Cana-de-açúcar	Milho	Soja	Pastagem
a) Parâmetros do Plantio						
$typeveg^{(1)}$	número que diferencia o tipo de vegetação	-	16	14	13	11
$p_{temp}^{(1)}$	media da temperatura nos últimos 10 dias	K	283,16	283,16	284,16	-
$pm_{temp}^{(1)}$	media da temperatura mínima nos últimos 10 dias	K	279,16	279,16	279,16	-
$pm_{min}^{(2) (3)(4)}$	primeiro mês que pode ocorrer o plantio	mês	11	10	11	-
$pd_{min}^{(5)}$	primeiro dia que pode ocorrer o plantio	dia	1	1	1	-
$year0^{(5)}$	primeiro ano da simulação	ano	03	01	88	-
b) Parâmetros Fisiológicos						
$baseT^{(6) (3)(4)}$	temperatura basal inferior	K	287,16	283,16	283,16	-
$temp_{max}^{(2) (3)(4)}$	temperatura basal superior	K	303,16	303,16	303,16	-
$tkill^{(2) (1)}$	temperatura em que a cultura morre por congelamento	K	268,16	273,16	268,16	-

Tabela 2.2: Conclusão.

<i>Símbolo</i>	Definição	Unidade	Cana-de-açúcar	Milho	Soja	Pastagem
c) Parâmetros de Alocação						
<i>alaicons</i> ⁽⁵⁾	constante de declínio do IAF das culturas	-	0,18	3,0	2,0	-
<i>allconst</i> ⁽⁵⁾	fator de declínio da alocação da folha	-	5,0	5,0	2,0	-
<i>allconss</i> ⁽⁵⁾	fator de declínio da alocação do caule	-	2,0	2,0	5,0	-
<i>alaimx</i> ^{(7) (3)(4)}	IAF máximo	m ² m ⁻²	20,0	6,0	7,0	-
<i>arooti</i> ⁽⁵⁾	fração inicial da alocação da raiz	-	0,95	0,25	0,50	0,55
<i>arootf</i> ⁽⁵⁾	fração final da alocação da raiz	-	0,02	0,005	0,05	0,55
<i>aleaff</i> ⁽⁵⁾	fração inicial da alocação da folha	-	0,05	0,00	0,05	0,45
<i>astmef</i> ⁽⁵⁾	fração final da alocação do caule	-	0,10	0,00	0,10	0,45
<i>declfact</i> ⁽⁵⁾	taxa de declínio do IAF depois do surgimento dos grãos	-	0,00	0,65	1,05	-
<i>fleaff</i> ⁽⁵⁾	fator da fração de alocação da folha	-	0,00	0,75	0,80	-
d) Parâmetros de GD e controle da fenologia						
<i>GDM</i> ⁽⁶⁾ (3)(4)	graus dias para atingir a maturidade	°C dia ⁻¹	3100	1800	1400	-
<i>amxmat</i> ⁽¹⁾	máximo de dias depois do plantio para a maturidade fisiológica	dia	570	165	150	-
<i>femerg</i> ⁽¹⁾	fração de GDM para atingir a emergência	-	0,03	0,03	0,03	-
<i>grnfill</i> ⁽⁵⁾	fração de GDM para atingir a florescência	-	0,75	0,41	0,59	-
<i>bfact</i> ⁽⁵⁾	coeficiente da curva do IAF	-	-4,00	-4,00	-2,50	-
e) Parametros da Cultura						
<i>ztopmx</i> ^{(7) (1) (5)}	altura máxima da planta	m	4	2,5	1,0	-
<i>afe</i> ⁽⁵⁾	área foliar específica	kg m ⁻²	15,5	25,0	33,0	13,0
<i>tauleaf</i> ⁽¹⁾	tempo de retorno do carbono na folha	ano	1,0	1,0	1,0	1,25
<i>tauroot</i> ⁽¹⁾	tempo de retorno do carbono na raiz	ano	200	200	200	1,00
<i>xminlai</i> ⁽⁵⁾	menor valor de IAF	m ² m ⁻²	0,01	0,01	0,01	0,01
<i>cgrain</i> ^{(1) (2) (5)}	fração da matéria seca do grão que é carbono	-	0,45	0,43	0,65	-
<i>convfact</i> ⁽¹⁾	fator de correção da unidade	-	159,46	159,46	159,46	-
<i>fyield</i> ⁽⁵⁾	fração da matéria seca do grão que é semente	-	0,90	0,65	0,75	-
<i>cfrac</i> ⁽⁵⁾	fração da matéria seca que é carbono	-	0,50	1,00	0,50	-
<i>Vmax</i> ^{(5) (8)}	Máxima capacidade fotossintética associada ao Rubisco	micro mol m ⁻²	70	54	94	50

A eficiência quântica variável (*effcon*) tem valores fixos para as culturas da soja (planta C3 com *effcon* = 0,08) e para o milho e a pastagem (planta C4 com *effcon* = 0,05), e para a cana-de-açúcar há uma característica que impede-se de ter um valor fixo, o fato do seu

plantio ser feito pelo sistema de rebrota, que reduz sua eficiência ao longo dos plantios, pelo que *effcon* começa com valor de 0,07 para a cana planta e primeira soca, e para a segunda soca em diante o valor diminui para 0,05, devido à calibração do modelo feita nesse trabalho.

Para todas as culturas, a data do plantio pode ser prescrita ou determinada pelo modelo. A decisão do plantio da cultura é baseada em três condições, respeitando as condições ideais de clima: a média da temperatura diária do ar e a média da temperatura mínima devem ser acima de um limiar; e o plantio não pode ocorrer antes de uma data específica baseada na estação de crescimento dependente da região em questão e da cultura. Se todas essas condições forem aceitas o plantio será iniciado.

Para simular o desenvolvimento fenológico das culturas, foi necessário obter-se uma taxa de desenvolvimento que, nesse caso, está relacionada linearmente com a temperatura, sendo a soma térmica a energia necessária para a planta se desenvolver. Há um limiar mínimo, T_{base} , abaixo da qual não ocorre desenvolvimento.

A colheita é simulada quando duas condições são satisfeitas: quando o GD, eq. (10), (Graus dias, tempo térmico em unidade de °C dia acumulado desde o plantio) for igual ou maior do que GDM (graus dias necessários para a planta atingir a maturidade fisiológica), e quando os dias de desenvolvimento igualem o número de dias máximo de duração da cultura.

$$GD = \sum (T_{media} - T_{base}) \quad (10)$$

Para a cana-de-açúcar, a colheita deve ter uma janela específica de tempo entre o número máximo e o mínimo de dias de plantio pois é uma cultura perene. Assim, como nas outras culturas, a colheita ocorre quando o GD (° dia⁻¹) atinge o limite GDM (° dia⁻¹). O desenvolvimento da cultura é calculado pela maturidade relativa, *MR* (adimensional) que representa a evolução do GD ao longo do ciclo da cultura variando numa escala de 0 a 100, tal que

$$MR = 100 \left(\frac{GD}{GDM} \right) \quad (11)$$

2.1.3. Estádios de Desenvolvimento e Alocação de Carbono

A alocação de carbono é a distribuição de matéria seca na planta, que está diretamente relacionada ao desenvolvimento da cultura, na medida em que seus órgãos vão sendo

formados durante os estádios de desenvolvimento. Assim marca a formação de raízes, folhas, caules no estágio vegetativo e dos grãos no estágio reprodutivo. A ordem de aparição dos órgãos é uma característica genética, sendo diferente para cada cultura.

O modelo utiliza diferentes metodologias para o cálculo dos estádios de desenvolvimento e alocação de carbono das culturas agrícolas. Para as culturas anuais, milho e soja, são considerados três estádios diferentes de desenvolvimento controlados pelo GD: o primeiro começa no plantio e termina na emergência da primeira folha; o segundo vai da emergência das folhas até o aparecimento de grãos; o terceiro, do aparecimento dos grãos até a maturidade fisiológica. Cada estágio de desenvolvimento é caracterizado por distintas frações de alocação de carbono, para cada uma das 4 partes diferentes da planta: raiz, caule, folhas e grão (KUCHARIK e BRYE, 2003). A emergência das folhas ocorre quando o GD atinge uma proporção de GDM (eq.12), específico para cada cultura, chamada GDE (graus dias para a emergência).

$$GDE = femerg * GDM \quad (12)$$

Para a cultura da soja a metodologia utilizada para a alocação de carbono foi baseada nos dados observados a campo (CORREA, 2008). Com as medições de campo das frações de matéria seca para as diferentes partes da planta em intervalos conhecidos do desenvolvimento, esse intervalo de tempo é aproximadamente uma semana, obteve-se as equações (13, 14, 15 e 16).

$$\partial a_{root} / \partial t = a_{root} * MR(t) \quad (13)$$

$$\partial a_{leaf} / \partial t = a_{leaf} * MR(t) \quad (14)$$

$$\partial a_{stem} / \partial t = a_{stem} * MR(t) \quad (15)$$

$$\partial a_{repr} / \partial t = a_{repr} * MR(t) \quad (16)$$

Em que: a_{root} é a alocação para as raízes, a_{leaf} é a alocação para as folhas, a_{stem} é a alocação para o caule e a_{repr} é a alocação para os órgãos reprodutores (a alocação é adimensional).

A alocação da cana-de-açúcar começa separando a parte aérea da parte subterrânea sendo a alocação de matéria seca na parte subterrânea é igual a matéria seca na raiz:

$$a_{ar} = (1 - a_{rootf}) \times (1 - e^{-droot \times MR/10}) \quad (17)$$

$$a_{root} = 1 - a_{ar} \quad (18)$$

Onde: a_{ar} é a alocação da parte aérea (adimensional); a_{rootf} é a alocação final da raiz (adimensional); $droot$ (0,9) fator de declínio da alocação de carbono para raiz.

Para a cultura da cana-de-açúcar não há forma empírica de alocação de carbono, mas sim um conjunto de equações específicas para essa cultura. Baseado originalmente nas equações descritos nos modelos APSIM-Sugarcane (KEATING et al., 1999), CANEGRO (SINGELS e BEZUIDNHOUT, 2002; SINGELS et al., 2005) e CUADRA (2010), foi utilizado o conjunto de equações de alocação de carbono em função de GD para a cana-de-açúcar proposto por Cuadra et al (2012):

$$A_a = (1 - A_{mr}) \times \min[1, 1 - e^{-(Rd \times MR)}] \quad (19)$$

$$A_{stem} = \min [(1 - A_{lm} - A_{rm}), A_a \times \max (0, F_1, F_2)] \quad (20)$$

$$F_1 = (MR \times C_{lstem}) - (I_{lstem} \times C_{lstem}) \quad (21)$$

$$F_2 = 1 - e^{[(MR \times C_{estem}) - (I_{estem} \times C_{estem})]} \quad (22)$$

Em que $F1$ e $F2$ são funções lineares (adimensionais) e exponenciais que descrevem a atribuição de carbono para o colmo, sendo que o maior desses valores será a alocação do colmo ($astem$). Na equação (21), C_{lstem} é o coeficiente angular de $F1$, e o produto formado por C_{lstem} faz com que $F1$ nunca seja zero, pois não há alocação negativa. Analogamente, C_{estem} é o coeficiente da função exponencial de $F2$ e o produto entre C_{estem} e i_{estem} faz com que $F2$ tenha valor nulo.

Além disso, a alocação de raízes (a_r) é o complemento da alocação aérea para completar uma unidade, e a alocação das folhas ($aleaf$) é dada por $a_r - a_{stem}$. Seguindo o mesmo tipo de função atribuída ao carbono estrutural do, a alocação do acúmulo de sacarose é descrita nas equações 23, 24 e 25:

$$A_{suc} = A_{stem} \times \max (0, F_3, F_4) \quad (23)$$

$$F_3 = (MR \times C_{lsuc}) - (I_{lsuc} \times C_{lsuc}) \quad (24)$$

$$F_4 = 1 - e^{[(MR \times C_{esuc}) - (I_{esuc} \times C_{esuc})]} \quad (25)$$

As equações que governam a alocação de carbono para o milho estão representadas a seguir e são divididas em duas partes, a primeira na fase vegetativa e a segunda fase reprodutiva, todas em função do desenvolvimento da planta, tal que

$$a_{root} = a_{rooti} - (a_{rooti} - a_{rootf}) * GD / GDM \quad (26)$$

$$a_{leaf} = (1 - a_{root}) * fleaf \quad (27)$$

$$a_{stem} = 1 - a_{root} - a_{leaf} \quad (28)$$

$$a_{repr} = 0 \quad (29)$$

$$fleaf = fleafi * e^{(-bfact)} - e^{(-bfact * (GD / GDM) + 0.5)} / (e^{(-bfact)} - 1) \quad (30)$$

A partir do momento do florescimento da planta do milho as equações de alocação mudam. Apenas a alocação da raiz (a_{root}) continua sendo uma função linear de decaimento, tal que

$$a_{stem} = a_{stem} * (1 - (GD - GDG) / (GDM * declfact) - GDG)^{allconss} \quad (31)$$

$$a_{leaf} = a_{leaf} * (1 - (GD - GDG) / (GDM * declfact) - GDG)^{allconsl} \quad (32)$$

$$a_{repr} = 1 - a_{root} - a_{stem} - a_{leaf} \quad (33)$$

O acúmulo de biomassa da planta é a assimilação (ou produtividade) líquida da planta (NPP). Com as curvas de alocação implementadas pode-se obter a biomassa das partes da planta, tal que

$$\Delta C_{root} = a_{root} * NPP - \tau C_{root} \quad (34)$$

$$\Delta C_{leaf} = a_{leaf} * NPP - \tau C_{leaf} \quad (35)$$

$$\Delta C_{stem} = a_{stem} * NPP \quad (36)$$

$$\Delta C_{repr} = a_{repr} * NPP \quad (37)$$

Onde:

C_{root} : biomassa acumulada na raiz ($Mg\ ha^{-1}$);

C_{leaf} : biomassa acumulada nas folhas ($Mg\ ha^{-1}$);

C_{stem} : biomassa acumulada no caule ($Mg\ ha^{-1}$);

C_{repr} : biomassa acumulada nos grãos ($Mg\ ha^{-1}$).

O cálculo do IAF utiliza a mesma metodologia para todas as culturas, separado em duas fases, a 1ª na fase vegetativa, em que ocorre o aumento do IAF em todas as plantas, decorrente da maior alocação de carbono nesse órgão. Nessa fase utiliza-se a biomassa acumulada na folha multiplicada pelo AFE (Área foliar específica) em $m^2\ kg^{-1}$, que é uma constante que demonstra a relação entre a área foliar e a massa seca da folha (eq. 38), tal que:

$$IAF = AFE * C_{isaf} \quad (38)$$

Na 2ª fase, reprodutiva ocorre a senescência das folhas que é função do desenvolvimento e do acúmulo de GD, no caso da cana-de-açúcar não há essa fase, tal que

$$IAF_t = IAF_{t-1} * ((1 - GD - GDG)/0.55 * GDM)^{alaicons} \quad (39)$$

onde, *alaicons* é a constante de declínio do IAF das culturas.

O modulo implementado no modelo SiB2 separa o IAF em duas partes, o IAF verde que são as folhas ativas que produzem fotossíntese na planta, e o complementar IAF morto que são as folhas secas. O coeficiente G (adimensional) é a porcentagem de folhas verdes sobre o total de folhas, sendo o complemento as folhas mortas. As equações 40 a 42 mostram que o cálculo do G é em função do desenvolvimento da planta e muda em função do tempo, e distinto para cada tipo de cultura tal que:

$$G_{soja} = 0.99 (1 - GD - (1 * GDG/0.4 * GDM))^{alaicons} \quad (40)$$

$$G_{milho} = 0.99 (1 - GD - (1 * GDG/0.55 * GDM))^{alaicons} \quad (41)$$

$$G_{cana} = 0.99 (1 - GD - (0.1 * GDG/15.5 * GDM))^{alaicons} \quad (42)$$

Pode-se observar pelas equações que o valor máximo do IAF verde jamais passará de 0.99 do valor do IAF total.

Pode-se observar que o valor máximo do IAF verde jamais passará de 0,99 do IAF total. O cálculo do IAF da pastagem é feito de maneira análogo à eq. 38. A sazonalidade dessa assimilação é dada por G prescrito nos parâmetros de entrada do modelo com dados

mensais e interpolado para cada dia. O processo de calibração do modelo e dos módulos apresentados nesse trabalho estão representados no APÊNDICE B.

2.1.4. Transporte Turbulento

Para a transferência de momentum no modelo SiB2 o cálculo dos fluxos utiliza resistências aerodinâmicas, visualizadas na Figura 2.2, sendo três: r_d , resistência entre o solo e o espaço de ar do dossel; r_b , resistência da folha do dossel com o ar do dossel; e r_a , resistência entre o ar do dossel e o ar fora do dossel em uma altura de referência (z_r) na qual a temperatura é medida. Os cálculos dessas resistências são feitos por parâmetros aerodinâmicos que dependem da morfologia da vegetação, e que originalmente empregava uma vegetação estática deste ponto de vista, ou seja, as variáveis morfológicas (veja Tabela 2.1) eram constantes e calculados em um pré-processador de parâmetros aerodinâmicos, SiBX/MOMOPT (SELLERS et al., 1989). Nessa versão do modelo essa rotina foi implementada no código, detalhada a seguir, para a atualização dos parâmetros morfológicos a todo passo de tempo.

Figura 2.2: Esquema das resistências no modelo SiB2 na transferência de calor sensível e na transferência de calor latente. Adaptado de Sellers et al. (1996)

O modelo SiB2 originalmente utiliza um esquema do fechamento do vento de primeira ordem com duas características importantes: (i) um perfil vertical triangular do índice de área foliar dentro do dossel, o que evidencia posições preferenciais onde o arrasto aerodinâmico se concentra; (ii) a inclusão de uma camada vertical de transição, onde o perfil vertical do vento não é necessariamente log-linear entre o topo do dossel e a camada de superfície (onde a propósito o perfil do vento é log-linear) conforme a Figura 2.3.

Figura 2.3: Transferência turbulenta considerado no esquema de fechamento do vento de primeira ordem e perfil vertical triangular do índice de área foliar dentro do dossel utilizado no modelo SiB2. Adaptado de Sellers et al. (1999).

Este módulo requer como variáveis de entrada a altura do dossel (z_2), a altura de inflexão da densidade foliar (Z_c), o IAF e a largura da folha (zlw), sendo os outros parâmetros constantes e seus valores descritos no Apêndice A. A solução do sistema apresenta como saídas o conjunto de parâmetro formado por: $h_a(m)$, $z_0(m)$, $d(m)$, G_1 , G_2 , G_3 , $corb1$ e $corb2$, conforme a formulação descrita na Apêndice A. A estimativa final utiliza-se esses parâmetros

aerodinâmicos para o cálculo das resistências. Por exemplo, a resistência da camada entre a atmosfera e o dossel, r_b , é definida como

$$\frac{1}{r_b} = \int_{z_1}^{z_2} \frac{L_d \sqrt{u}}{p_s C_s} dz \quad (43)$$

onde C_s ($C_s = 90 * zlw^{1/2}$) é o coeficiente de transferência e zlw é a largura da folha da planta.

Como mostra a eq.(A.4), L_d varia com a altura e u é dado por (47). Integrando a eq. (43) temos:

$$\overline{r_b} = \frac{C_s}{\sqrt{u_2}} \quad (44)$$

A resistência entre o dossel e o solo, r_d , é definida por

$$r_d = \int_{z_{qs}}^{h_a} \frac{1}{K} dz \quad (44)$$

onde h_a é a altura da fonte de calor dentro do dossel (m), e K_s é o coeficiente de transferência do vapor d'água ou calor sensível ($m s^{-2}$), supondo ser igual K_m . A equação (A.23) é integrada numericamente usando (A.16) abaixo de z_1 e (A.3) e (A.6) entre z_1 e h_a .

$$r_d = \frac{C_s}{u_2} \quad (45)$$

A fonte de calor do dossel, h_a , é assumida para ser a altura na qual ocorre as trocas entre a folha e o ar dentro do dossel, obtendo a solução de

$$\int_{z_1}^{h_a} \frac{L_d}{r_b} dz = \int_{h_a}^{z_2} \frac{L_d}{r_b} dz = \frac{1}{2r_b} \quad (46)$$

A resistência aerodinâmica governa a transferência entre a folha e o ar dentro do dossel r_a , é dada por

$$r_a = \int_{h_a}^{z_r} \frac{1}{K_s} dz + \int_{z_2}^{z_m} \frac{1}{K_s} dz + \int_{z_m}^{z_r} \frac{1}{K_s} dz \quad (47)$$

A equação (47) é calculada com a soma das resistências atuando separadamente dentro do espaço de ar no dossel $h_a < z < z_2$, a camada de transição $z_2 < z < z_m$ e na subcamada inercial $z_m < z$. Os cálculos de todos os parâmetros aerodinâmicos utilizados na calculo das resistências estão apresentados no APÊNDICE C.

2.1.5. Decomposição de Matéria Orgânica

Foi implementado um modelo biogeoquímico subterrâneo para complementar o fluxo de CO₂ entre a vegetação e a atmosfera, estimando os detritos e matéria orgânica no solo baseado no esquema de VERBENE et al. (1990) e KUCHARIKK et al. (1999). Essa formulação simula o crescimento da biomassa microbiana (responsável pela decomposição de matéria orgânica) como uma função direta da serrapilheira, renovação da raiz e do carbono no solo. Assim, o modelo permite o crescimento dos microorganismos, da taxa de nitrogênio imobilizado (nitrogênio disponível para o aumento da biomassa dos microorganismos) e da taxa de nitrogênio mineralizado (nitrogênio disponível para a nutrição da planta), como resíduo da decomposição da matéria orgânica, que são dependentes do tipo de solo (argila, silte, arenoso). Solos mais argilosos têm maior capacidade de aumentar a proteção da matéria orgânica e da biomassa microbiana, que pode potencializar as taxas de perda do nitrogênio mineralizado e aumentar a densidade de carbono no solo (VERBENE et al., 1990). A biomassa de microorganismos no modelo é considerada como carbono ativo (altamente instável) e é mantida separada de todos os outros armazenamentos de carbono no solo.

O modelo permite que a atividade microbiana seja modelada em função da temperatura do solo (LLOYD; TAYLOR, 1994) e da umidade do solo (LINN; DORAN, 1984). O perfil de raízes no modelo é prescrito como parâmetro de entrada e descreve onde se encontra a raiz e o carbono do solo, e assim, a maioria da biomassa microbiana. Leva-se em consideração que a mortalidade da raiz não é uma função linear e o perfil das raízes para as culturas agrícolas não ultrapassa 1 m de profundidade.

O carbono subterrâneo tem como fonte de matéria orgânica a queda das folhas, os detritos do caule e a renovação das raízes, além da matéria orgânica disponível no solo (Figura 2.4). Os valores iniciais de entrada da biomassa são estimados conforme os cálculos da colheita anterior para as diferentes partes da planta (raiz, caule, folhas), e a matéria orgânica é dividida em diferentes compostos (WHITMORE et al., 1997): material decomponível (MDP, matéria decomponível da planta como a sacarose), estrutural (MEP, matéria estrutural da planta), e lignina (MRP, matéria resistente da planta). Cada composto tem um tempo de decomposição por serem de composição diferentes, ou quanto maior o tamanho da molécula, mais tempo para ser decomposta. Sendo assim, há uma relação C:N entre o carbono e o nitrogênio disponível para a biomassa dos microorganismos.

Figura 2.4: Fluxograma da rotina de decomposição da matéria orgânica. Onde: MDP, matéria decomponível da planta; MEP, matéria estrutural da planta; MRP, matéria resistente (lignina) da planta.

Os detritos das folhas, do caule e da biomassa da raiz são tratados separadamente e divididos nos três compartimentos de liteiras com taxas C:N para cada tipo de resíduo. A taxa

de C:N para as diferentes partes da planta e seus diferentes compostos usados no modelo são supostos constantes, representados na tabela 2.3.

O modelo acumula a matéria orgânica das folhas e do caule na superfície do solo. Essa matéria pode-se encontrar na forma protegida ou não protegida dependendo da composição da matéria. Similarmente, há um armazenamento de matéria da decomposição da biomassa da raiz, denominado matéria orgânica protegida por estarem protegidas da rápida decomposição microbiana, que está no subsolo. Segundo Parton (1987), essas liteiras têm um tempo de residência muito pequeno da ordem de semanas a meses. A maior parte da liteira das partes MDP e MEP de carbono armazenado mudam-se diretamente para biomassa microbiana na decomposição, enquanto que quase que a totalidade da MRP é transferida para a matéria orgânica do solo (VERBERNE et al., 1990). O carbono no subsolo é dividido em quatro compartimentos: (1) a biomassa microbiana (carbono ativo) com um tempo de residência variando de poucas horas a meses; (2) matéria orgânica protegida e (3) não protegida (armazenamento mais lento), com tempo de residência de 10 a 30 anos; e (4) matéria orgânica estável, representando o carbono que tipicamente reside com um tempo maior de 1000 anos (Figura 2.4). O carbono da decomposição da matéria orgânica no solo é dividido entre biomassa microbiana e respiração, de acordo com a eficiência do microorganismo para cada transformação (Tabela 2.3).

As variáveis de saída da rotina incluem os totais de carbono e nitrogênio no solo, as quantidades de biomassa contidas no solo e no subsolo, o total de biomassa microbiana, o fluxo de CO₂ na liteira, o carbono orgânico e o nitrogênio mineralizado e imobilizado.

A matéria orgânica decomposta no solo é simulada com passo de tempo diário, valores horários de temperatura e umidade do solo convertidos em valores diários e para a primeira camada das raízes. Esses fatores representam a temperatura e umidade do solo de 0-100 cm que é a profundidade onde se encontra toda a biomassa da raiz no solo (JACKSON et al., 1996). A adição de carbono no solo através dos processos de decomposição não é particionada entre as respectivas camadas do solo (a decomposição da biomassa da raiz não acompanha a distribuição da raiz para cada camada do solo individualmente). O total acumulado do carbono decomposto é agregado ao perfil total do solo.

Tabela 2.3: Parâmetros da rotina processo de decomposição sendo que: MDP, matéria decomponível da planta; MEP, matéria estrutural da planta; MRP, matéria resistente da planta; Pbio, matéria orgânica na biomassa dos microorganismos protegidos; Pom, matéria orgânica protegida; Nbio, matéria orgânica na biomassa dos microorganismos não protegidos; Nom, matéria orgânica não protegidos; Som, carbono no solo.

<i>Tipo de material e parte da planta</i>	<i>Taxa de Decomposição, d.⁻¹</i>	<i>Eficiência Microbiana</i>	<i>Relação C:N</i>
MDP			
folhas	0,15	0,40	6
raiz	0,10	0,40	6
caule	0,00	0,40	6
MEP			
folhas	0,01	0,30	150
raiz	0,005	0,30	150
caule	0,001	0,30	150
MRP			
folhas	0,01	1,0	100
raiz	0,005	1,0	100
caule	0,001	1,0	100
Pbio → Pom	0,005	1,0	10
Nbio → Nom	0,045	1,0	10
Pom → Pbio	1,0 x 10 ⁻⁴	0,25	10
Nom → Nbio	0,001	0,20	15
Pom → Som	1,0 x 10 ⁻⁶	1,0	15
Nom → Som	1,0 x 10 ⁻⁶	1,0	10
Som	1,0 x 10 ⁻⁷	0,20	15

2.2. Sítios Experimentais

2.2.1. Cana-de-açúcar

Os dados meteorológicos forçantes do modelo e os fluxos atmosféricos foram medidos na área de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) localizada sobre uma plantação de 351ha, na Fazenda São Jose do Pulador (Fazenda 27) da Usina Santa Rita (21°38S, 47°47W, 522 m), no município de Luiz Antonio, SP. O solo predominante é do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo,

de textura arenosa. A torre foi instalada no início de fevereiro de 2005 no talhão nº 20, contendo a soca de cana-de-açúcar, variedade SP83 – 2847, plantada com espaçamento entre linhas de 1,5 m e com altura média de aproximadamente 3,5 m na época da colheita, realizada nos dias 14 de abril de 2005 e 10 de maio de 2006, respectivamente, segundo e terceiro corte (TATSCH, 2006). Os dados de biomassa acima do solo (colmos, folhas verdes e mortas) foram medidos em intervalos de 20 dias, e foram amostrados em dez parcelas aleatórias de 1 m ao longo do plantio. Sub-amostras contendo 10% do peso fresco foram secas em estufas a 60°C até que o peso constante fosse alcançado. Os índices de área foliar verde e mortos foram calculados a partir da biomassa seca amostradas (CABRAL et al., 2011).

2.2.2. Soja

Os dados meteorológicos utilizados como forçantes foram obtidos da Reanálise do Sistema de Previsão do Clima NCEP (SAHA et al., 2010), da combinação numérica do sistema global acoplado, de dados observacionais de superfície e de radiossondas. Os dados de biomassa foram obtidos do campo experimental (1007 m acima do nível do mar, 15°35'30" S e 47°42'30" W) da Embrapa Cerrados em Planaltina-DF, Brasil, na safra de 1988-1989. O experimento avaliou o padrão de crescimento de 10 diferentes variedades cultivadas de soja, semeadas em 8 de Novembro. As parcelas foram dispostas sem blocos ao acaso, com 4 repetições. Em cada unidade, foram instalados 10 áreas amostrais de 1,2 m² cada, e uma área de 4 m² para a colheita. Inicialmente, as plantas foram divididas em parte aérea e raiz. Após a obtenção de massa de matéria seca total, uma sub-amostra foi usada para determinar a área, foliar. As partes foram secas (70°C) e a massa da matéria seca foi determinada (EMBRAPA, 1994).

2.2.3. Milho

O experimento de campo foi conduzido entre 20 de setembro de 2003 (semeadura) e 16 de fevereiro de 2004 (última coleta), na área experimental da Universidade de São Paulo (Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"), em Piracicaba - SP (22°42'30" S e 47°38'00" W), a 546 m de altitude e os dados meteorológicos da estação meteorológica da ESALQ. A emergência da planta ocorreu em 27 de setembro de 2003 (7 dias após a semeadura). As parcelas experimentais possuíam as seguintes dimensões: 10 m de comprimento por 4 m de largura. A coleta das plantas foi

realizada e as mesmas foram separadas em partes (raízes, folhas, colmo e órgão reprodutivos) e levadas à estufa de secagem de ventilação forçada de ar a 65°C, até que a massa fosse constante, para a determinação da massa de matéria seca. A massa de matéria seca de raiz, folha, caule e órgão reprodutivo de plantas de milho, referente aos genótipos utilizados (BRS-1001, BRS-1010 E BRS-3003), foi mensurada com 4 repetições (GAIEWSKI , 2009).

2.2.4. Pastagem

O sítio de pesquisa situava-se na Fazenda Nossa Senhora - FNS (10°45'44'' S, 62°21'24'' W) no município de Ouro Preto d'Oeste, RO. A área de estudo está na maior área plana com pastagem da região, com aproximadamente 4 km² de área, e altitude de 220 m acima do nível do mar. O solo é profundo até atingir a parte rochosa (7 m) e possui uma textura silto-arenosa na superfície, aumentando a porcentagem de argila com a profundidade. A pastagem é formada por 99 % de *Urochloa brizantha* e com uma pequena contribuição de *Panicum maximum* e *Urochloa humidicula*. Os dados foram coletados em 5 pontos de 1 m² escolhidos aleatoriamente e amostradas uma vez por mês. Foram coletadas 300 amostras entre o período de fevereiro de 1999 a janeiro de 2005 na FNS. Para a amostragem, primeiramente foram feitas a retirada do material morto da área demarcada de (1 m²). O material vivo restante foi cortado e caso houvesse outras espécies de vegetais essas seriam recolhidas, separando os espécimes uns dos outros. Os dados meteorológicos utilizados foram estação meteorológica instalada no sítio (SAKAI et al., 2004).

As forçantes das simulações se encontram no Apêndice D.

2.2.5. Cenários de Mudança do Clima

Nessa seção é demonstrada a sensibilidade do modelo com á variações nas forçantes climáticas da soja. Foram gerados cenários de mudanças climáticas alterando as variáveis precipitação e temperatura. Primeiro estabeleceu-se como experimento controle a simulação resultante da calibração do modelo. Com os dados desse experimento foram realizadas simulações para os cenários com 1°C, 2°C e 3°C mais frios e 1°C, 2°C e 3°C mais quentes que a temperatura de entrada do experimento. Assim foram gerados sete cenários de temperatura com a mesma precipitação: com 25%, 50% e 75% mais secos e 25%, 50% e 75% mais úmidos que a precipitação do experimento controle. Assim totalizando também sete cenários para cada cenário de temperatura, ou seja, um total de 49 cenários diferentes.

3. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados gerados das simulações do modelo SiB2 para as culturas de cana-de-açúcar, milho, soja e pastagem, com foco no desenvolvimento fenológico avaliado por meio do índice de área foliar e da quantidade de matéria seca, e no efeito da variabilidade do clima na produtividade.

3.1. Desenvolvimento e Alocação

A Figura 3.1 mostra o desenvolvimento das culturas determinado pelo método dos graus dias (GD). Quando o GD acumulado ao longo do ciclo da cultura atinge o valor da do início da fase de florescência, inicia-se o estágio reprodutivo para a soja e o milho, enquanto na cana começa o acúmulo de sacarose nos colmos (em torno de 2000 GD). A cana-de-açúcar atinge a maturidade em 3000 GD quando ocorre a colheita. A cana-de-açúcar é a cultura com maior ciclo, aproximadamente 400 dias, a soja e o milho são culturas com ciclos menores, com 120 dias de duração. Como a média da temperatura foi um pouco maior no sítio experimental do milho, em SP, do que no sítio experimental da soja, no DF, o desenvolvimento dessas culturas mostrou duração semelhante. O florescimento do milho ocorre próximo dos 550 GD e antes da soja que é próximo de 800 GD, porém o número de GD para a maturidade (GDM) do milho (1700 GD) foi superior ao da soja (1400 GD).

Figura 3.1: Desenvolvimento das culturas com o GD, graus dias, acumulados (linha sólida preta), GDF, florescimento ou início do acúmulo de sacarose (linha tracejada azul), e GDM, maturidade (linha tracejada vermelha), das culturas da cana-de-açúcar, soja e milho. Continua.

Figura 3.1: Conclusão.

A Figura 3.1 mostra as diferentes curvas de alocação da biomassa nos quatro compartimentos da planta (raiz, folhas, caule e grãos ou sacarose para a cana-de-açúcar) para cada cultura. Após o plantio, a alocação de carbono ocorre nas raízes e folhas, órgãos essenciais para a fotossíntese através da absorção de água e CO_2 , respectivamente. O crescimento do caule (órgão de transporte) ocorre logo em seguida, até atingir um ponto máximo (início da fase reprodutiva), a partir do qual a alocação dos grãos (sacarose na cana) aumenta e as outras partes diminuem (ou estabilizam na cana). O decaimento da alocação na raiz com o tempo é exponencial para a cana-de-açúcar e linear para as outras culturas. Nas culturas de soja e milho a alocação nos grãos ocorre de maneira rápida, ao passo que as outras partes se aproximam da fração zero e quase todo carbono é alocado nos grãos próximo à colheita. As oscilações na curva de alocação do caule e da sacarose na cana-de-açúcar ocorre em função da variação da temperatura.

Figura 3.2: Partição de carbono para as diferentes partes da planta: raiz (linha sólida marrom), folha (linha sólida verde), caule (linha sólida vermelha) e sacarose ou grãos (linha sólida azul) nas culturas de cana-de-açúcar (a), soja (b) e milho (c), ao longo de um ciclo de plantio.

A cana-de-açúcar continua assimilando carbono no caule e nas folhas, pois não atinge a fase reprodutiva. A fase de florescimento do milho, início da fase reprodutiva, ocorre antes da soja. A escala de tempo na Fig. 3.2 é diferente, que na cana-de-açúcar é contada pelos dias após o plantio e não pelos dias após a emergência como nas demais culturas. Depois do plantio, o milho precisou de 5 dias para emergir e a soja 4 dias. Ocorre uma oscilação no tempo de alocação do caule e da sacarose na cana-de-açúcar devido às condições do clima pois alguns dias frios a planta dá preferência para alocar carbono na parte estrutural e alguns dias mais quentes a preferência fica para o acúmulo de biomassa.

3.2. Índice de Área Foliar (IAF)

Os IAFs da cana-de-açúcar são apresentados na Figura 3.3. O padrão do IAF verde se aproxima de uma curva sigmóide. O IAF máximo observado no campo no ciclo 2005/2006 foi maior do que no ciclo 2006/2007 (18,7 e 11,0 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, respectivamente). No final do ciclo IAF verde é aproximadamente 25% do IAF total. Comparado aos valores observados, nota-se que no início do ciclo o IAF total foi superestimado pelo modelo enquanto na última metade do ciclo ele foi subestimado. O IAF verde, na maior parte do ciclo foi levemente superestimado. No resultado do modelo o IAF total simulado foi mais penalizado em comparação ao IAF verde simulado.

Figura 3.3: Cálculo do IAF total (linha sólida preta) e verde (linha sólida verde) da cana-de-açúcar comparando com os dados observados de IAF total (linha tracejada com ponto preto) e verde (linha tracejada com ponto verde) para os ciclos de 2005/2006 (a) e 2006/2007 (b). A reta laranja é a relação 1:1 e a reta tracejada é a regressão linear do calculado vs. observado.

A Figura 3.4, mostra a simulação final da implementação do cálculo do IAF do milho que apresenta um padrão bem diferente do padrão do IAF verde da cana-de-açúcar. Nota-se

uma curva com três fases definidas: a primeira crescente; a segunda de estabilização; e a última de senescência das folhas.

A comparação do IAF total calculado é feita para três cultivares diferentes do milho, que apesar disso mostraram padrões e valores próximos entre si. A curva do IAF calculado representou muito satisfatoriamente o padrão das observações, o que é confirmado pela pequena dispersão dos pontos em torno das retas 1:1 (Fig. 3.4, segunda coluna). No final do ciclo do milho as folhas secam, ou seja, na época da colheita quase não há folhas verdes. O modelo simulou de forma consistente esse decaimento do IAF observado.

Figura 3.4: Cálculo do IAF total do milho (linha sólida preta) comparando com o observado para três cultivares diferentes: BR-1010 (linha tracejada com ponto cinza), BR-1001 (linha tracejada com ponto azul) e BR-3003 (linha tracejada com ponto vermelho). A reta laranja é a relação 1:1 e as retas tracejadas são as regressões lineares do calculado vs. observado.

A comparação do IAF total calculado é feita com três cultivares diferentes do milho, que por sua vez mantêm o mesmo padrão de curva e valores próximos. A curva calculada obedece muito satisfatoriamente este padrão e mantém-se sempre próxima dos dados observados, como confirmam a proximidade das retas 1:1. No final do ciclo do milho as folhas secam, ou seja, na época da colheita quase não há folhas verdes. O modelo calculou esse decaimento do IAF bem próximo da realidade observada.

Figura 3.5: Cálculo do IAF total da cultura da soja (linha sólida verde) comparando com o observado da média de dez cultivares diferentes (linha tracejada com ponto preto). A reta laranja é a relação 1:1 e a reta tracejada é a regressão linear do calculado vs. observado.

O padrão da evolução do IAF total da soja (Figura 3.5) mostra uma curva com duas fases: na primeira um crescimento exponencial, que atinge um pico ($6,78 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) na florescência; e na segunda fase o decaimento do IAF. Na fase de crescimento do IAF o modelo subestima levemente as observações, porém os dados observados são médias de dez variedades de soja, ou seja, há aí uma variação intrínseca expressiva. O valor máximo calculado foi um pouco superior à média observada de $6,45 \pm 1,61 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, mas razoável quando diante da variância da observação. Quando se atinge o ponto máximo do IAF, ocorre o fechamento completo do dossel, reduzindo a luz interceptada no seu interior. Na fase de decaimento do IAF total o modelo também mostra leve superestimativa, o que foi um certo viés do cálculo nos 2 últimos terços do desenvolvimento.

A discussão sobre o IAF da pastagem contempla o maior período de dados observados (1999-2001, 3 anos). A Figura 3.6 mostra as médias mensais do IAF calculado e observado. Com exceção do primeiro ano de simulação os extremos superiores do IAF observado ficaram em torno $2,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e os extremos inferiores foram menores que $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. Em geral o IAF simulado subestimou a variabilidade do IAF observado. No ano de 1999 a sazonalidade dos

dados observados é menos óbvia, o que pode ser decorrente do manejo da pastagem onde fatores como piquetes de separação e intensidade de pastejo são variantes e podem influenciar os dados observados. Entretanto observa-se que o intervalo de variação do IAF simulado foi muito próximo ao do IAF observado, apesar das superestimativas durante os meses chuvosos. A importância desta análise é fazer o cálculo do IAF de maneira automática e o cálculo deve mostrar razoável coerência com os dados observados, tanto em magnitude quanto na sazonalidade.

Figura 3.6: Cálculo do IAF da pastagem (linha sólida verde) comparando com o observado (linha tracejada com ponto preto). A reta laranja é a relação 1:1 e a reta tracejada é a regressão linear do calculado vs. observado.

3.3. Biomassa

Nessa seção será discutido os resultados da comparação entre a biomassa calculada e observada para as três culturas. A biomassa seca do caule (ou do colmo) é a variável mais importante da cultura da cana-de-açúcar, pois é o órgão da planta em que o açúcar é acumulado. O modelo separa a parte estrutural do caule e a parte da sacarose. A Figura 3.7 mostra a somatória dessas partes, ou seja a massa total do colmo. A porcentagem de sacarose no colmo é 40% e a da matéria estrutural é de 60%. Observa-se uma queda na produtividade entre as socas, o primeiro com $37,27 \text{ Mg ha}^{-1}$ e o segundo com $21,26 \text{ Mg ha}^{-1}$. Nos meses centrais de desenvolvimento (aproximadamente entre 100 a 250 dias) a matéria seca

acumulada calculada foi levemente superestimada, a partir da metade dos ciclos a biomassa simulada foi mais coerente com os dados observados. Pelos diagramas de dispersão da Fig. 3.7, verifica-se que o modelo tende a superestimar para valores baixos de biomassa e vice-versa. Contudo a produtividade final simulada foi muito próxima à observada.

Figura 3.7: Cálculo da biomassa do caule da cana-de-açúcar (linha sólida vermelha) comparando com o observado (linha sólida verde) para os ciclos de 2005/2006 (a) e 2006/2007 (b). A reta laranja é a relação 1:1 e a reta tracejada é a regressão linear do calculado vs. observado.

A biomassa da folha é a somatória de duas componentes medidas no campo: a biomassa das folhas secas e a biomassa das folhas verdes. Os dois ciclos mostram a queda da produção entre as socas, o primeiro com maior produtividade ($37,27 \text{ Mg ha}^{-1}$) comparado com o segundo ($21,26 \text{ Mg ha}^{-1}$). Nos meses centrais de desenvolvimento (aproximadamente entre 100 a 250 dias) o cálculo acumulado de matéria seca é levemente superestimado, e a partir da metade do ciclo se comporta de forma mais coerente com os dados observados, observado também na comparação 1:1, que na colheita indica melhor comparabilidade. Identicamente, a biomassa seca das folhas (Figura 3.8)) mostrou queda de produtividade ($13,26 \text{ Mg ha}^{-1}$ no primeiro ciclo e $8,00 \text{ Mg ha}^{-1}$ no segundo ciclo) de aproximadamente 58%, um valor muito comparável à queda observada na biomassa seca do caule (57%). A forma da curva da matéria seca das folhas foi semelhante à da curva do IAF total, como esperado pela proporcionalidade direta da AFE. O modelo superestimou quase que sistematicamente as observações durante o desenvolvimento (conforme diagrama de dispersão da Fig 3.8) devido ao fato da calibração, da curva de alocação de carbono, valor de AFE e matéria seca do colmo, ter penalizado matéria seca da folha.

Figura 3.8: Cálculo da biomassa da folha da cana-de-açúcar comparando (linha sólida verde) com o observado (linha tracejada com ponto preto) para os ciclos de 2005/2006 (a) e 2006/2007 (b). A reta laranja é a relação 1:1 e a reta tracejada é a regressão linear do calculado vs. observado. Continua.

Figura 3.8: Conclusão.

A Figura 3.9 mostra a biomassa seca total calculada do milho para os três cultivares diferentes. O modelo mostrou leve superestimativa em comparação as observações até o dia 60 depois da emergência, a seguir ocorre level subestimativa, e culmina com valores próximos aos das observações. De maneira geral a representação do total de biomassa seca do milho ficou comparável com os dados dos três cultivares. Nota-se que a colheita no modelo ocorreu no dia 128 DAE, portanto antecipada em relação a observada (148 DAE).

Figura 3.9: Cálculo do total de biomassa seca (linha sólida preta) do milho comparando com o observado para três cultivares diferentes: BR-1010 (linha tracejada com ponto cinza), BR-1001 (linha tracejada com ponto azul) e BR-3003 (linha tracejada com ponto vermelho). A reta laranja é a relação 1:1 e as retas tracejadas são as regressões lineares do calculado vs. observado.

A biomassa acumulada por partes da planta é apresentada na Figura 3.10. O acúmulo calculado de biomassa no caule e na raiz superestimou os dados observados. O florescimento na simulação ocorre mais atrasada, e, conseqüentemente o acúmulo de biomassa dos órgãos reprodutores (grãos, espigas, etc.) é subestimado na maior parte do tempo, exceto no final quando aproxima-se da colheita. O padrão das curvas de evolução do caule e dos órgãos reprodutores são concordantes com as observações, apesar de super ou subestimativas transientes, na comparação 1:1 ocorre uma regressão razoável. A biomassa do caule se estabiliza depois do florescimento. Nos casos das biomassas da folha e da raiz há uma superestimação do cálculo nas raízes e uma subestimação das folhas no final do ciclo, o que de certa forma acaba sendo contrabalanceado na biomassa seca total (Figura 3.9).

Figura 3.10: Cálculo da biomassa seca da folha (a), da raiz (b), do caule (c) e dos órgãos reprodutivos (d) de milho (linha sólida preta) comparando com o observado para três cultivares diferentes: BR-1010 (linha tracejada com ponto cinza), BR-1001 (linha tracejada com ponto azul) e BR-3003 (linha tracejada com ponto vermelho). A reta laranja é a relação 1:1 e as retas tracejadas são as regressões lineares do calculado vs. observado. Continua.

Figura 3.10: Conclusão.

O acúmulo de biomassa da cultura de soja seguiu uma curva de crescimento aproximadamente sigmóide, com inclinação chamada de taxa de crescimento absoluto da cultura e definida como o aumento de biomassa por unidade de tempo. A taxa de crescimento

da biomassa da soja cresce ao longo do desenvolvimento da planta, atinge um valor máximo e diminui próximo à colheita, dividida em três fases: um período inicial de crescimento exponencial no tempo; crescimento linear; e fase final de diminuição da biomassa. O cálculo da biomassa (Figura 3.11)) mostra que nas primeiras duas fases de desenvolvimento a biomassa acumulada concordou bem com as observações, mas na fase de senescência superestima a biomassa seca.

Figura 3.11: Cálculo da biomassa seca da soja (linha sólida verde) comparando com o observado da média de dez cultivares diferentes (linha tracejada com ponto preto). A reta laranja é a relação 1:1 e a reta tracejada é a regressão linear do calculado vs. observado.

A Figura 3.12 mostra a biomassa calculada separadamente nas partes para a cultura da soja. A biomassa seca das folhas e do caule apresenta maiores valores nos 100 primeiros dias, mesmo com a queda da biomassa da folha após o florescimento da planta. A biomassa seca da raiz praticamente se estabiliza depois da florescência e é a parte que menos acumula matéria seca. As taxas de crescimento do caule e dos grãos são praticamente iguais, sendo as curvas muito semelhantes, e na época de colheita as partes que mais acumularam biomassa foram respectivamente: o caule, os grãos, a folha e a raiz. As folhas por mais da metade do ciclo é a parte que mais acumula biomassa mas com a senescência perde biomassa no final, a

raiz é a parte que menos acumula e o caule é a parte que mais acumula biomassa sendo provavelmente a parte que superestima a biomassa total no final do ciclo.

Figura 3.12: Cálculo da biomassa seca da raiz (linha sólida marrom), da folha (linha sólida verde), do caule (linha sólida vermelha) e dos grãos da soja (linha sólida azul).

3.4. Altura da Cana-de-açúcar

As alturas de todas as culturas foram calculadas (ver apêndice B), porém apenas a cultura da cana-de-açúcar teve valores de campo. No início da simulação (Figura 3.13) o modelo demora para disparar o crescimento da planta (em 60 dias do ciclo 2005/2006 e 100 dias do ciclo 2006/2007), e mostra o valor de 25 cm constante, que é o mínimo modelado, já que o modelo tem um limite pois abaixo desse valor o modelo não consegue calcular o perfil vertical do vento dentro do dossel. Essa discrepância é compensada quando ocorre o crescimento da altura calculada, que rapidamente compara as observações com variância pouco expressiva, como indica a dispersão da reta 1:1.

Figura 3.13: Cálculo da altura da cana-de-açúcar (linha sólida vermelha) comparando com o observado (linha tracejada com ponto preto) para os ciclos de 2005/2006 (a) e 2006/2007 (b). A reta laranja é a relação 1:1 e a reta tracejada é a regressão linear do calculado vs. observado.

A variável "altura" representa a altura do dossel e influencia o cálculo dos fluxos devido à condutância aerodinâmica, sendo assim importante que a altura seja bem simulada. Nos dias em que antecedem a colheita, a altura do dossel atingiu o valor máximo de 4 m, e por isso termina o ciclo de maneira estável nesse valor.

3.5. Decomposição de Matéria Orgânica

A decomposição de matéria orgânica começa no momento da colheita quando praticamente toda a biomassa seca da raiz, folhas e caule (apenas folhas e raiz para cana-de-açúcar) estão disponíveis no solo para ação dos microrganismos decompositores. A Figura 3.14 mostra o carbono disponível das folhas e das raízes no solo para decomposição, observa-se que a biomassa das folhas está em ordem de grandeza maior pois há mais carbono disponível nas folhas do que das raízes em todas as culturas. O primeiro tipo de matéria a sofrer decomposição é a matéria componível da planta (MDP), glicose, que tem a maior taxa de decomposição, os outros tipos de matéria orgânica, MEP (estrutural) e MRP (lignina) tem uma taxa de decomposição menor e para o tempo simulado não há variação. Já que toda a matéria do caule é composta de MRP e MEP, não é notada variação na biomassa disponível no do caule. A biomassa disponível das folhas é maior para as plantas C4 (cana-de-açúcar e milho) a soja, porem a biomassa disponível da raiz tem ordem de grandeza maior no milho, pois foi superestimada no modelo, comparada com as outras culturas, e por isso não observamos uma variação visível. Nota-se que a queda da matéria orgânica das folhas mostra um mesmo padrão de decaimento exponencial com pausas para todas as culturas, isso ocorre pelo aumento da biomassa de microrganismos que aumentam a competição entre si e paralisa o processo. A decomposição das raízes demora um pouco mais para começar devido às condições necessárias de umidade e temperatura do solo demorar mais para atingir o ponto ideal.

Figura 3.14: Carbono disponível no solo das folhas (linha sólida verde) e da raiz (linha sólida marrom) para as culturas da cana-de-açúcar (a), soja (b) e milho (c), que sofre decomposição de microorganismos referentes aos dias após a colheita. Continua.

Figura 3.14: Conclusão

3.6. Produtividade das culturas

A produtividade estimada da cana-de-açúcar é a soma da biomassa seca da folha e do caule, a produtividade do milho é da biomassa seca dos órgãos reprodutores e da soja é a matéria seca dos grãos. As culturas do tipo C4 foram as de maior produtividade, cana-de-açúcar e milho, respectivamente, e a soja (cultura C3) com menor produtividade.

Figura 3.15: Produtividade final (Mg.ha^{-1}) da biomassa seca aérea da cultura da cana-de-açúcar nos ciclos 2005/2006 e 2006/2007, dos órgãos reprodutores da cultura do milho e da cultura da soja (colunas cinza claro) relacionadas com os dados observados (colunas cinza escuro) e os desvios padrão.

Para a cana-de-açúcar, o ciclo 2005/2006 foi mais produtivo que o ciclo 2006/2007 ($48,1 \pm 10,9$ e $32,0 \pm 5,4 \text{ Mg ha}^{-1}$), como esperado pela sucessão da planta pela rebrota, tendo o modelo superestimado ($52,3$ e $35,8 \text{ Mg ha}^{-1}$) as observações, principalmente pela biomassa seca das folhas. A produtividade da biomassa seca dos órgãos reprodutores calculada do milho ($17,1 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi um pouco abaixo do observado porém dentro do intervalo do erro ($17,6 \pm 2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$). A produtividade calculada da soja ($3,9 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi a mais aproximada da observação, ao redor de $3,8 \text{ Mg ha}^{-1}$.

3.7. Fluxos

A Figura 3.16, apresenta as médias (ou somas) mensais do IAF, dos fluxos de calor latente (LE) calculado pelo modelo e observado, do saldo de radiação (Rn), do total de precipitação (Fig 3.16 a) e das componentes da evapotranspiração (evaporação, transpiração e interceptação de água pelas folhas) para os ciclos (2005/2006 e 2006/2007) da cana-de-açúcar (Fig. 3.16b). O LE acompanha a variação sazonal da precipitação e de Rn. Os valores calculados de LE foram superestimados (levemente subestimados) em comparação aos observados na estação chuvosa (seca). Conforme esperado, a evapotranspiração segue o padrão de variação da transpiração, sendo essa componente predominante na cana-de-açúcar. A transpiração segue o padrão sazonal da chuva e do IAF, uma vez que ela é a perda de água pelos estômatos das folhas. Apesar da redução do IAF no segundo ciclo, a transpiração na

estação chuvosa não mostrou uma diminuição na mesma proporção, indicando que a umidade do solo não foi limitante. As componentes evaporação e interceptação da folhas também acompanham o IAF e a precipitação porém em menor proporção da evapotranspiração. Nos meses em que o IAF é menor a transpiração é reduzida e a evapotranspiração é dominada pela interceptação e evaporação do solo. O estresse hídrico no início do ciclo 2006/2007 é um dos motivos porque o IAF desse ciclo foi menor na comparação com o ciclo 2005/2006, porém o LE teve um pico maiores valores no ciclo 2006/2007 devido a maior precipitação na estação chuvosa nesse período.

Figura 3.16: (a) Média mensal do cálculo (linha sólida com ponto verde) do Fluxo de calor latente (LE) da cana-de-açúcar comparando com o observado (linha sólida com ponto azul) para os ciclos de 2005/2006 e 2006/2007, com o IAF médio mensal calculado (linha tracejada preta), o saldo de radiação, Rn, (linha tracejada com ponto cinza) e a precipitação total mensal (barra verde). (b) Evapotranspiração média do mês em mm (linha sólida com ponto verde), IAF médio mensal calculado (linha tracejada preta), precipitação total mensal (barra verde) e as componentes da Evapotranspiração: Evaporação (linha sólida com ponto vermelho), Transpiração (linha sólida com ponto laranja) e Interceptação (linha sólida com ponto cinza). Continua.

Semelhantemente a Figura 3.16 a Figura 3.17 mostra é semelhante a Fig. 3.16, para as culturas do milho (a), soja (b) e pastagem (c), e as médias são representadas em pêntadas. Para a pastagem são apresentadas às mesmas variáveis porém como médias mensais. As culturas da soja e milho tem ciclos relativamente curtos e por isso a sazonalidade da precipitação não é evidente. A cultura do milho apresenta evapotranspiração dominada, de maneira geral, pela transpiração. Na cultura da soja, a componente que prevalece sobre a evapotranspiração é a Interceptação devido a ocorrência de precipitação durante todas as pêntadas do ciclo. Em comparação ao ciclo do milho a transpiração é maior somente nas pêntadas com menor valor de precipitação e a evaporação é praticamente constante ao longo do ciclo.

A evapotranspiração da pastagem acompanha marcadamente a sazonalidade da precipitação e do IAF. A transpiração e interceptação foram as componentes mais importantes da evapotranspiração. As plantas de metabolismo C₄ (cana-de-açúcar, milho e pastagem) apresentam magnitudes semelhantes de evapotranspiração, com máximos de até 5 mm . dia⁻¹ e picos mínimos próximos a 1 mm . dia⁻¹. A cultura da soja mostrou maior evapotranspiração atingindo 6 mm . dia⁻¹, o que foi provocado pelas altas taxas de precipitação que favorecem a interceptação das folhas.

Figura 3.17: Evapotranspiração média por pântadas, para o milho (a) e soja (b) e mensal para a pastagem (c) em $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ (linha sólida com ponto verde), IAF médio calculado (linha tracejada preta), precipitação total mensal (barra verde) e as componentes da Evapotranspiração: Evaporação (linha sólida com ponto vermelho), Transpiração (linha sólida com ponto laranja) e Intercepção (linha sólida com ponto cinza). Continua.

3.8. Cenários de Mudanças do Clima

Os resultados das simulações para os cenários de mudança do clima são apresentados na Figura 3.18 que mostra a produtividade total da cultura da soja na colheita. Observa-se que a produtividade diminui com a redução da precipitação independente da temperatura. Analisando a diferença entre as curvas -75% e -50% e as curvas -25% e 0% verificar-se que a sensibilidade aumenta quando o ambiente apresenta menor precipitação. A biomassa aumenta quando o ambiente é mais frio e diminui quando a temperatura aumenta. Isso ocorre porque o modelo utiliza o método de graus dias. Assim, quanto mais quente, mais rápido a planta atinge a maturidade e mais cedo ocorre à colheita. Nos cenários mais frios demora-se mais tempo para a ocorrência da colheita e assim sobram mais dias para assimilar carbono, o que favorece o aumento da quantidade de grãos (tempo entre a floração e a maturidade aumenta). Dessa forma, a floração demora mais para ocorrer e IAF aumenta, pois há mais dias entre a emergência e a florescência. Conseqüentemente, a quantidade de carbono alocado na folha é maior e a assimilação de carbono aumenta.

Figura 3.18: Comparação da Produção de Biomassa Seca Total da cultura da soja com o arranjo de diferentes cenários de precipitação: 75% mais úmido (linha tracejada com ponto rosa), 50% mais úmido (linha tracejada com ponto verde musgo), 25% mais úmido (linha tracejada com ponto verde claro), 75% mais seco (linha tracejada com ponto verde escuro), 50% mais seco (linha tracejada com ponto azul), 25% mais seco (linha tracejada com ponto vermelho), sem variação na precipitação (linha tracejada com ponto preto e temperatura (1°C, 2°C, 3°C) mais quente e (1°C, 2°C, 3°C) mais frio.

Analisando-se separadamente as partes (produção de matéria seca na raiz, folha e caule) das plantas, verifica-se que todas acompanham o padrão analisado previamente (Figura 3.19). Exceção ocorre no caso da produção de biomassa seca dos grãos para os cenários mais frios, o padrão esperado seria de aumento na produção de grãos. No entanto isso não ocorre devido ao fato da colheita ocorrer antes da planta atingir a maturidade no cenário mais frios (-3°C e -2°C), pois atinge o número máximo de dias após a semeadura e assim a colheita ocorre antes. Ou seja, em um ambiente mais frio a floração demora mais para ocorrer e o período, em dias, de preenchimento de grãos é menor, uma vez que há um limite de dias para ocorrência da colheita da cultura.

Figura 3.19: Comparação da Produção de Biomassa Seca Total para as partes: raiz (a), folhas (b), caule (c) e grãos(d) da planta de soja; com o arranjo de diferentes cenários de precipitação: 75% mais úmido (linha tracejada com ponto rosa), 50% mais úmido (linha tracejada com ponto verde musgo), 25% mais úmido (linha tracejada com ponto verde claro), 75% mais seco (linha tracejada com ponto verde escuro), 50% mais seco (linha tracejada com ponto azul), 25% mais seco (linha tracejada com ponto vermelho), sem variação na precipitação (linha tracejada com ponto preto e temperatura (1°C, 2°C, 3°C) mais quente e (1°C, 2°C, 3°C) mais frio. Continua.

Figura 3.19: Conclusão.

A Produção Primaria Bruta é maior nos cenários mais frios devido ao fato do ciclo de desenvolvimento da planta ter maior duração e assim há mais tempo disponível para a produção de fotossíntese. A respiração autotrófica no modelo é função da temperatura (Figura 3.20). Por essa razão, possui maiores valores médios nos cenários quentes, contribuindo para uma menor produção de biomassa nesses cenários. A Produção Primaria Bruta subtraída da

Respiração Autotrófica da planta é igual ao da Produção de Biomassa Seca Total (Figura 3.18) .

Figura 3.20: Comparação da Produção de Primária Bruta (a) e Total da Respiração (b) da planta de soja com o arranjo de diferentes cenários de precipitação: 75% mais úmido (linha tracejada com ponto rosa), 50% mais úmido (linha tracejada com ponto verde musgo), 25% mais úmido (linha tracejada com ponto verde claro), 75% mais seco (linha tracejada com ponto verde escuro), 50% mais seco (linha tracejada com ponto azul), 25% mais seco (linha tracejada com ponto vermelho), sem variação na precipitação (linha tracejada com ponto preto e temperatura (1°C, 2°C, 3°C) mais quente e (1°C, 2°C, 3°C) mais frio. Continua.

Figura 3.210: Conclusão.

A Figura 3.21 mostra a Produtividade Líquida acumulada ao longo do ciclo da soja para os diversos cenários de temperatura. Nota-se, como visto anteriormente, que nos cenários mais frios a produção de biomassa é maior, não apenas na colheita mas em todo o ciclo. A explicação para esse resultado é o IAF que é maior nos cenários mais frios (Figura 3.21), isso ocorre porque o modelo utiliza o método de graus dias. Assim, quanto mais quente, mais rápido a planta atinge a maturidade e mais cedo ocorre a floração (momento do pico máximo do IAF). Nos cenários mais frios demora-se mais tempo para a ocorrência do florescimento e assim sobram mais dias para aumentar o IAF, que tem a fase de crescimento entre o plantio e a floração (fase vegetativa). Dessa forma, com IAF maior a planta assimila mais carbono, o que favorece o aumento da quantidade de grãos na fase reprodutiva.

Figura 3.21: Comparação da Produção de Primária Líquida (a) e IAF (b) da planta de soja com o arranjo de diferentes cenários de temperatura: 3° mais quente (linha sólida rosa), 2° mais quente (linha sólida verde musgo), 1° mais quente (linha sólida verde claro), 3° mais frio (linha sólida verde escuro), 2° mais frio (linha sólida azul), 1° mais frio (linha sólida vermelha), sem variação na temperatura (linha sólida preta).

4. CONCLUSÃO

Nesse estudo, implementações para representar as culturas agrícolas foram incorporado ao modelo SiB2. Esse aperfeiçoamento permitiu simular explicitamente a dinâmica dos ecossistemas agrícolas e fornece uma nova ferramenta para modelagem de agro-ecossistemas. O modelo foi testado para quatro culturas: cana-de-açúcar, pastagem, soja e milho, utilizando dados observados, em diferentes experimentos de campo, de evapotranspiração, biomassa aérea e índice de área foliar.

Da calibração do modelo SiB2 com o novo módulo derivaram-se conjuntos de parâmetros para a cana-de-açúcar, soja e milho dos quais destacam-se, respectivamente: T_{base} , (287,16; 283,16; 283,16 K); GDM , (3100; 1400; 1800°Cd); GDF , (2500; 550; 850,°Cd); IAF_{max} , (20,0; 7,0; 6,0 m².m⁻²); AFE , (15,5; 33,0; 25,0 kg.m⁻²); $Vmax$, (70, 94, 54, micro mol m⁻² s⁻¹).

A representação das culturas agrícolas inclui um conjunto de equações e parametrizações, que expressam a alocação de carbono de forma diferenciada para cada cultura. O desempenho do modelo no cálculo do IAF foi satisfatório para maioria das culturas estudadas. Algumas variáveis foram penalizadas para priorizar o melhor ajuste do modelo para outras variáveis. Por exemplo o caso da biomassa seca das folhas da cana-de-açúcar que foram superestimadas, embora a biomassa seca do caule tenha sido simulada com melhor ajuste às observações. A produtividade final das culturas evidenciou que as culturas de metabolismo do tipo C4 que tiveram maior produtividade (cana-de-açúcar e milho) do que a soja com menor produtividade.

Os valores calculados de LE foram superestimados (subestimados) na estação chuvosa (seca) em comparação com dados observados e a componente dominante da evapotranspiração das plantas C4 (cana-de-açúcar, milho e pastagem) foi a Transpiração, com máximos de até 5 mm dia⁻¹ e mínimos próximos a 1 mm . dia⁻¹. No caso da soja (planta C3), a interceptação das folhas foi a componente dominante da evapotranspiração, com picos de até 6 mm dia⁻¹, devido a precipitação na forcante ter uma chuva mais contínua. Esses resultados indicaram diferenças que pode ter grandes impactos em simulações de longo prazo por modelos climáticos.

Com diferentes cenários de mudanças climáticas o modelo mostrou sensibilidade ao déficit hídrico. A diminuição da precipitação acarretou menor acúmulo de biomassa total no

ciclo, em sentido oposto, com aumento da precipitação não ocorreram mudanças significativas no acúmulo de biomassa. Há maior produção de biomassa em condições mais frias e menor produção em condições mais quentes devido ao fato de uma colheita mais tardia prolongar o acúmulo de biomassa por maior período de tempo. Essa avaliação de mudanças climáticas é parcial, já que não foi considerado o efeito de aumento da concentração de CO₂.

Além da avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre sistemas agrícolas, o aperfeiçoamento realizado no modelo SiB2 possibilita também sua aplicação para estimativa dos impactos hidroclimáticos decorrentes de mudanças no uso da terra, gerados pelas alterações nos padrões do balanço de energia e nos processos hidrológicos de superfície.

Sugestões de trabalhos futuros

- Incorporar um modelo que determine a época de plantio baseado no déficit de umidade no solo. No modelo atual há restrição quanto ao zoneamento agrícola regional, e algumas regiões não comportam alguns tipos de culturas devido ao solo, o que é ruim para as certas culturas. Essa condição mudaria para as diferentes cultivares de algumas espécies, como as espécies precoce e safrinha.
- Incorporar a representação de processos responsáveis pela quebra de produtividade em eventos de frio não apenas a morte da planta, mas com a mudança no comportamento metabólico da vegetação como mecanismo de defesa natural para a mitigação de condições adversas, por meio de mudanças na alocação de carbono nas diferentes fases do ciclo.
- Inserir o efeito de operações de manejo agrícola (adubação, fertilização, aragem do solo, tratamento de resíduos) sobre os fluxos de superfície e a produtividade.
- Implementação do modelo para escala regional ou de bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFONSI, R.R.; Pedro Jr., M.J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V.. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, v.1, p. 42-54, 1987.
- ARRUDA, Z.J.; **A pecuária bovina de corte no Brasil e resultados econômicos de sistemas alternativos de produção**. In: SIMPÓSIO SOBRE PECUARIA DE CORTE, 4., Piracicaba, 1997. Anais. Piracicaba: FEALQ, p. 259-273, 1997.
- ASSAD, E.D.; **Coord. Zoneamento Agrícola do Brasil – Análise de Riscos Climáticos e Atualização**. Projeto Macroprograma 1. Embrapa, 2002.
- BAIGORRIA, G. A.; JNES, J. W.; SHIN, D.W.; MISHRA, A.; O'BRIEN, J. J.; **Assesing uncertainties in crop model simulations using daily bias-corrected Regional Circulation Model outputs**. Climate Resarch, v. 34, p. 211-222, 2007.
- BALL, J.T., WOODROW, I.E., BERRY, J.A.. **A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions**. Progress in Photosynthesis Research, v.IV, p.221-224, 1987.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Comércio exterior brasileiro**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br>. Acesso em: 10 de agosto de 2011.
- BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; COMIRAN, F.; BERGONCI, J.I.; MULLER, A.G.; FRANÇA, S.; SANTOS, A.O.; RADIN, B.; BIANCHI, C.A.M.; PEREIRA, P.G.. **Deficit Hídrico e produtividade na cultura do milho**. Pesquisa Agropecuaria brasileira, v.41, n.2, p. 243-249, 2006.

- 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.** Agricultural Systems, v.52, p. 171-198, 1996.
- BRUNINI, O.; ZULLO JR, J.; PINTO, H. S.; ASSAD, E.; SAWAZAKI, E.; DUARTE, A., P., PATTERMAN, M. E. Z.; **Riscos Climáticos para a cultura de milho no estado de São Paulo.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.9, p. 519-526, 2001.
- CABRAL, O.M.R.; ROCHA, H.R.; GASH, J.H; LIGO, M.A.V.; TATSCH, J.D.; FREITAS, H.C.; BRASILIO, E.; **Water use in a sugar-cane plantation.** Global Change Biology Bioenergy, 2011.
- CAMARA, G.M.S.; **Efeitos do fotoperíodo e da temperatura no crescimento, florescimento e maturação de cultivares de soja (*Glycine Max(L.)Merrill*).** Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa, p.266, 1991.
- CANABRAVA, A. P.; **História econômica: estudos e pesquisas.** Unesp, 2005.
- CARLIN, S. D.; **Impacto do tombamento na produtividade de diferentes cultivares de cana-de-açúcar.** Dissertação de Mestrado – Instituto Agronômico de Campinas, 2005.
- CASAGRANDE, A. A.; **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar.** FUNEP, 1991.
- CASSMAN, K. G.; WOOD, S.; **Cultivated systems.** Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends, v. 1, p. 745-794, 2005.
- CHALLINOR, A.J.; COSTA, M.H.; SOARES-FILHO, B.S.; **The Influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River- Land surface processes and atmospheric feedbacks.** Journal Hydrol, v. 369, p.165-174, 2005.

- CHEN, F.; DUDHIA, J.; **Couple an Advenced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity.** American Meteorological Society, v. 129, p. 569-585, 2001.
- CHIODI, L.; **Integração espacial no mercado brasileiro de milho.** Dissertação de Mestrado – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2006.
- COLLATZ, G.J.; RIBAS-CARBO, M.; BERRY, J.A.. **Coupled Photosynthesis-Stomatal Condutance Model for Leaves of C4 Plants.** Journal Plant Physiology, v.19, p.519-538, 1992.
- CONTE, L.; **Economia de escala e substituição de fatores na produção de soja no Brasil.** Tese de Doutorado – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2006.
- CORREA, S, T,R. **Apaptação do modelo Lintul (Light Interception and Utilization) para estimação da produtividade potencial da cultura da soja.** Dissertação de Mestrado – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
- CUADRA, S, V. **Desenvolvimento de um modelo biofísico de crescimento da Cana de Açúcar para estudos globais .** Tese de Doutorado – Universidade Federal de Viçosa, 2010.
- CUADRA, S, V; COSTA, M,H; KUCHARIK, C, J; DA ROCHA, H, R; TATSCH, J, D; LEITE, C, C; CABRAL, O, M, R. **A biophysical model of Sugarcane growth.** GCB BIOENERGY, v.4, p. 36-48, 2012.

- CUNHA, A, P, M, A. **Calibração do “Simplified Simple Biosphere Model – SSiB” para o bioma caatinga do nordeste brasileiro.** Dissertação de Mestrado – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007.
- DA CUNHA, W.F.; **Métodos indiretos para estimativa de massa de forragem em pastagens de *Cynodon spp.*** Dissertação de mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2002.
- DA SILVA, S.C.; PEDREIRA, C.G.S. **Princípios de ecologia aplicados ao manejo da pastagem.** In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMAS DE PASTAGENS, Anais: p.1-62, 1997.
- DA ROCHA, H.R.; NOBRE, C.A.; BONATTI, J.P.; WRIGHT, I.R.; SELLERS, P.J.. **A vegetation atmosphere interaction study for Amazonian deforestation using field data and a single column model.** Quarterly Journal Royal Meteorological Society, v. 122, p.567-594, 1996a.
- DEFRIES, R. S., ACHARD, F.; **New estimates of tropical deforestation and terrestrial carbon fluxes: Results of two complementary studies.** LUCC Newsletter., v. 8, p 7-9, 2002.
- DICKINSON, R.E.. **Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance.** Advances in Geophysics, v. 25, p. 305-353, 1983.
- DIEESE: Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos. **Desempenho do setor sucroalcooleiro brasileiro e os trabalhadores.** Estudos e Pesquisa, v.3, 2007.
- DUBROVSKY, M.; ZALUD, Z.; STASTNA, M.; **Sensitivity of CERES-Maize yields to statistical structure of daily weather series.** Climate Change, v. 46, p. 477-472, 2000.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Disponível em http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/ecofisiologia.htm . Acesso em: 10 de agosto de 2011.

EMBRAPA. **Relatório técnico do projeto Nipo-Brasileiro de cooperação em pesquisa agrícola 1987-1992**. Brasília, p.74, 1994.

FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCNO, A.L.; NEUMAIER, N.; **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, circular técnica, v.48, p.9, 2007.

FARQUHAR, G.D.; VON CAEMMERER, S.; BERRY, J.A.; **A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species**. Planta 149, p.78-90, 1980.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E.; **Stages of soybean development**. Iowa: Agricultural Experimental Station, p.81, 1977.

FOLEY, J. A., DEFRIES, R.; ASNER, G.P.; BARFORD, C.; BONAN, B.; CARPENTER, S.R.; CHAPLIN, F.S.; COE, M.T.; DAILY, G.C.; GIBBS, H.K.; HELKOWSKI, J.H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E.A.; KUCHARIK, C.J.; MONFREDA, C.; PATZ, J.A.; PRENTICE, I.C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P.K.. **Global consequences of land use**. Science, v. 309, p.570-574, 2005.

FOLEY, J; PRENTICE, I, C; RAMANKUTTY N; LEVIS, S; POLLARD, D; SITCH, S; HAXELTIE A. **An Integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics**. Global Biogeochemical cycles, v.10(4), p. 603-628, 1995.

FRANÇA, S.; BERGAMASCHI, H. ROSA, L. M. G.. **Modelagem do crescimento do milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de graus-dias, com e sem irrigação**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria , v.7, n.1, p.59-66, 1999.

- GADIOLI, J.L.; DOURADO-NETO, D.; GARCIA, A.G. ;BASANTA, M.V. **Temperatura do ar, rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma calórica.** ScientiaAgricola, v.57, p.377-383, 2000.
- GAIEWSKI, V.. **Parametrização do modelo LINTUL para estimar a produtividade potencial da cultura do milho.** Dissertação de Mestrado – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2009.
- GALLOWAY, J. N.; SCHLESINGER, W. H.; LEVY, H.; MICHAELS, A.; SCHNOOR J. L.. **Nitrogen fixation: Antropogenic enhancement- environmental response.** Global Biogeochem, v. 9, p. 235-252, 1995.
- HAIM, D.; SHECHTER, M.; BERLINER, P., 2008. **Assessing the impact of climate change on representative field crops in Israeli agriculture: a case study of wheat and cotton.** Climate Change, v.86, p.425-440,2008.
- HERTEL, T. W.; BURKE, M. B.; LOBELL, D. B.; **The poverty implications of climate-induced crop yield changes by 2030.** Global Environmental Change, v. 20, p. 577-585, 2010.
- HOUGHTON, R. A.; **Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000.** Tellus Ser. B, v. 55, p. 378-390, 2003.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 de agosto de 2011.
- INMAN-BAMBER,N.G.; SMITH, D.M.. **Water relations in sugarcane and response to water deficits.** Field Crops Research, v.92, p.185-202, 2005.
- INMET, Instituto Nacional de Meteorologia: **Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola.** v.1, p.268, 2009.

IPCC: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Cove Writing Team, Pachauri, R. K. and Reisinger, A. (eds)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p.104, 2007.

JACKSON, R.B.; CANABELL, J.; EHLERINGER, J.R.. **A global analysis of root distributions for terrestrial biomes.** *Oecologia*, vol.108, p. 389-411, 1996.

JAMES, G. **Introduction to sugarcane.** In: JAMES, G. *Sugarcane*. Oxford: Wiley-Blackwell, p1-19, 2004.

KEETING, B.A.; ROBERSTON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I.. **Modelling sugarcane production systems. I. Development and performance of the sugarcane module.** *Field Crops Res.*, vol.61, p.253-271, 1999.

KUCHARIK, C.J.; NORMAN, J.M.; GOWER, S.T.. **Characterization of radiation regimes in nonrandomness with a multiband vegetation imager (MVI).** *Journal Geophysical Research*, vol. 102, p. 29455-29473, 1997.

KUCHARIK, C.J. **Evaluation of a process-based agro-ecosystem model (Agro-IBIS) across the U.S. cornbelt: simulations of the inter-annual variability in maize yield.** *Earth Interact.* v.7, 1–33, 2003.

KUCHARIK, C.J.; BRYE, K.R.. **Integrated Biosphere Simulator (IBIS) Yield and Nitrate Loss Prediction for Wisconsin Maize Receiving Varied Amounts of Nitrogen Fertilizer.** *Journal Environment*, v. 32, p. 247-268, 2003.

LINQUIST, J. L.; ARKEBAUER, T.J.; WALTERS, D.T.; CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A.; **Maize Radiation Use Efficiency under Optimal Growth Conditions.** *Agronomy Journal*, Madison, v.97, p.72-78, 2005.

- LINN, D.M.; DORAN, J.W.. **Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non tilled soils.** Soil Science Society American Journal, vol.48, p.1267-1272, 1984.
- LLOYD, J.; TAYLOR, J.A.. **On the temperature dependence of soil respiration.** Functional Ecology, vol.8, p.315-323, 1994.
- LOBELL, D., B.; SCHLENKER, W.; COSTA-ROBERTS, J.. **Climate Trends and Global Crop Production Since 1980.** Science express, p.1-5, 2011.
- LOKUPITIVA, E.; DENNING, S.; PAUSTIAN, K.; BAKER, I.; SCHAEFER, K.; VERMA, S.; MEYERS, T.; BERNACCHI, C.J.; SUYKER, A.; FISCHER, M.. **Incorporation of crop phenology in Simple Biosphere Model (SiBcrop) to improve land-atmosphere carbon exchange from croplands.** Biogeo-sciences, v.6, p.969-986, 2009.
- LLOPART, M.P.. **Calibração do modelo SiB2 em módulos sequenciais para a Floresta Tropical Amazônica.** Dissertação de Mestrado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- MARENGO, J.A.; LIMA, M.A. de; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. **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.** Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, p.97-123, 2001.
- MOZAMBANI, A. E. et. al. **História e morfologia da cana-de-açúcar.** In: SEGATO, S. V. et al Atualização em produção de cana-de-açúcar. p. 11-18.2006
- NOBRE, C.A.; ASSAD, E.D.; OYAMA, M.D.. **Mudança Ambiental no Brasil – O impacto do aquecimento global nos ecossistemas da Amazônia e na agricultura.** Scientific American Brasil. V. 12, 2005.

- NOILHAM, J.; PLANTON, S.. **A Simple Parametrization of Land Surface Processes for Meteorological Models**. American Meteorological Society, v. 117, p. 536-549, 1989.
- PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V.; OJIMA, D.S.. **Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands**. Soil Science Society of America Journal, vol. 51, p. 1173-1179, 1987.
- PELLEGRINO, G.Q.; ASSAD, E.D.; MARIN, F.R.. **Mudanças Climáticas Globais e a Agricultura no Brasil**. Revista MultiCiência, v.8, 2007.
- PIELKE, R. A.; MARLAND, G.; BETTS, R., A.; CHASE T. N.; EASTMAN J. L.; NILES, J., O.; NIYOGI, D. D. S.; RUNNING, S. W.; **The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: Relevance to climate-change policy beyond the relative effect of greenhouse gases**. Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, v. 360, p. 1705-1719, 2002.
- PITMAN, A.; PIELKE, R.; AVISSAR, R.; CLAUSSEN M.; GASH, J.; DOLMAN, H.; **The role of the land surface in weather and climate: Does the land surface matter?**. IGBP Newsletter, v. 39, p. 4-9, 1999.
- RAMANKUTTY, N.; EVAN, A.T.; MONFREDA, C.; FOLEY, J.A. **Farming the planet. Part 1: The Geographic Distribution of Global Agricultural Lands in the year 2000**. Global Biogeochem, v.22, GB1003, 2008.
- RITCHIE, S.; HANWAY, J.J.; BENSON, G. O.. **How a corn plant develops**. Yowa State University, Cooperative Extension Service Ames, Iowa. (Special bulletin, n.48). 1993. Disponível em :<http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/library/maize/www.ag.iastate.edu/departments/agronomy/corngrows.html>. Acesso em: 10 ago. 2010.

- RODRIGUES, O.; DIDNET, A.D.; LHAMBY, J.C.B.; LUZ, J.S. da. **Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo.** Pesquisa Agropecuária Brasileira. V.36, n.3, p.431-437, 2001.
- ROSENZWEIG, C.; PARRY, M. L.; **Potencial impact of climate change on world food supply.** Nature, v. 367, p. 133- 138, 1994.
- ROLIM, F.A.. **Estacionalidade de produção de forrageiras.** In: Peixoto, AM.; MOURA, J.C.; FARIA, V.P. (Ed.) Pastagens: fundamentos de exploração racional, v.2, p.533-566, 1994.
- SAHA, S. et al. **The NCEP Climate Forest System Reanalysis.** Submitted to the Bulletins the American Meteorological Society, 2010.
- SAKAI, R. K.; FITZJARRALD, D.R.; MORAES, O. L. L.; STAEBLER, R.M.; ACEVEDO, O.C.; CZIKOWSKY, M. J.; DA SILVA, R.; BRAIT, E.; MIRANDA, V.; **Land-use chang effects on local energy, water, and carbon balances in a Amazonian agricultural field.** Global Cahnge Biology, v.10, p. 895-907, 2004.
- SALIMON, C. I.; **Respiração do solo sob florestas e pastagens na Amazônia Sul-Ocidental, Acre.** Tese de Doutorado – Centro de Energia Nuclear na Agricultura USP, 2003.
- SANTOS, A. B.; **Evolução diferenciada entre os estados brasileiros do cultivo e do processo industrial da soja.** Dissertação de Mestrado – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2001.
- SELLERS,P.J.; MINTZ, Y.; SUD, Y.C.; DALCHER, A.. **A Simple Biosphere Model (SiB) for use within general circulation models.** Journal of Atmospheric Sciences, v. 43, p.505-531, 1986.

- SELLERS,P.J.; SHUTTLEWORTH, W.J.; DORMAN, J.L.. **Calibration the Simple Biosphere Model for Amazonian Tropical Forest Using Field and Remote Sensing Data. Part I: Average Calibration with Field Data.** American Meteorological Society, v. 28, p. 727- 759.,1989.
- SELLERS,P, J; RANDALL, D, A; COLLATZ, G, J; BERRY, J, A; FIELD, C, B; DAZLICH, D, A; ZHANG, C; COLLELO, G,D; BOUNOUA,L. . **A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmosferic GCMs. PartI: Model Formulation.** Journal of Climate. p 676-705, 1996.
- SELLERS,P, J; DICKINSON, R, E; RANDALL, D, A; BETTS, A, K; HALL, F,G; BERRY, J, A; COLLATZ, G, J; DENNING, A, S; MOONEY, H, A; NOBRE, C, A; SATO, N; FIELD, C, B; HENDERSON-SELLERS, A. **A Modeling the Exchanges of Energy, Water, and Carbon Between Continents and the Atmosphere.** Science. v. 275 p. 502-509, 1997.
- SMIL, V.. **Nitrogen in crop production: An account of global flows.** Global Biogeochemic Cycles, v. 13, p. 647-662, 1999.
- SINGLES, A.; BEZUIDENHOUT,C.N; **A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro sugarcane model.** Field Crop Res, v.78, p,151-164, 2002.
- SINGLES, A.; DONALDSON; R.A., SMIT, M.A.. **Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice.** Field Crops Res. v.92, p.291-303, 2005.
- SIQUEIRA, O.J.; LIMA, M.A. de; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. **Efeitos Potenciais das Mudanças Climáticas na Agricultura Brasileira e Estratégias Adaptativas para Algumas Culturas.** Mudanças Climáticas Globais e a Agropecuária Brasileira. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, p.65-96,2001.

- TATSCH, J. D. **Uma análise dos Fluxos de Superfície e do Microclima sobre Cerrado, Cana-de-açúcar e Eucalipto, com Implicações para Mudanças Climáticas Regionais**. Dissertação de Mestrado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- THOMAS, J.F. Ontogenetic and morphological plasticity in crop plants. **Physiology and determinations of crop yield**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, p.181-185, 1994.
- TUBIELLO, F.N.; SOUSSANA, J.F.; HOWDEN, S.M.; **Crop and pasture response to climate change**. PNAS, v.104, 19686-19690, 2007.
- VERBENE, E.L.; HASSINK, J.; DE WILLIGEN, P.; GROOT, J.J.R.; VAN VEEN, J.A.. **Modeling organic matter dynamics in different soils**. Netherland Journal Agricultural Science, vol. 38, p. 221-238, 1990.
- XUE, Y.; SELLERES, P.J.; KINTER, J.L.; SHUKLA, J.. **A simplified biosphere model for global studies**. Journal of Climate, v.4, p. 336-345, 1991.
- WHITMORE, A.P.; KLEIN-GUNNEWIEK, H.; CROCKER, G.J.; KLIR, J.; KORSCHENS M.; POULTON, P.R.. **Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the Verbene/MOTOR model**. Geoderma, vol. 81, p. 137-151, 1997.

APÊNDICE A – Parâmetros aerodinâmicos calculados para as culturas

- a) *Perfil da velocidade do vento e do coeficiente de transferência de momento dentro do dossel*

A velocidade do vento dentro do dossel varia em relação à altura do mesmo, devido ao cisalhamento. Porém a altura e o cisalhamento não são fixos, já que a altura do dossel varia e o IAF no dossel também. As equações abaixo governam a absorção de momento pelo dossel no modelo SiB2:

$$\tau = \rho K_m \frac{\partial u}{\partial z} \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \frac{C_d \overline{L_d} u^2}{p_s} \quad (\text{A.2})$$

$$K_m = \sigma u \quad (\text{A.3})$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$), ρ é a densidade do ar (kg m^{-3}), u é a velocidade do vento (m s^{-1}), z é a altura (m), C_d é coeficiente de arrasto da folha, p_s é o fator de abrigo, $\overline{L_d}$ é a densidade da área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$), e σ assim como C_d e p_s são constantes.

Para descrever o dossel com a distribuição da densidade foliar como um triângulo, representa-se $\overline{L_d}$ em função do IAF.

$$\int_{z_1}^{z_2} \overline{L_d} dz = \text{IAF} \quad (\text{A.4})$$

A combinação de (A.1) através de (A.4)

$$\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = (A_i + B_i z) y \quad (\text{A.5})$$

Onde $y = u^2$, $A_i = \frac{2a_i C_d}{p_s \sigma}$ e $B_i = \frac{2b_i C_d}{p_s \sigma}$ e a_i e b_i são constantes.

A equação (A.5) pode ser resolvida para dar uma expressão do perfil de vento dentro do dossel que incorpora a função modificada de Bessel, $I_{1/3}$.

$$y = u^2 = \alpha_i Y_\alpha + \beta_i Y_\beta \quad (\text{A.6})$$

$$\begin{aligned}
Y_\alpha &= \sqrt{\eta} I_{1/3}(\xi) \\
Y_\beta &= \sqrt{\eta} I_{1/3}(\xi) \\
\eta &= B_i^{-2/3} (A_i + B_i z) \\
\xi &= \frac{2}{3} \eta^{3/2}
\end{aligned}$$

Onde α_i , β_i são constantes determinadas pela solução de (A.6) com as condições de fronteira.

O gradiente da velocidade do vento no ar do dossel é obtido através da derivada da equação (47):

$$\frac{dy}{dz} = \frac{d(u^2)}{dz} = \alpha_i \frac{dY_\alpha}{dz} + \beta_i \frac{dY_\beta}{dz} \quad (\text{A.7})$$

As equações (A.6) e (A.7) fornece-nos uma descrição da variação de u e com a altura dentro do dossel.

b) Modificação do perfil do vento acima do dossel

Assume-se que o perfil log-linear do vento é uma boa aproximação acima da altura de transição, z_m . Próximo ao dossel, o coeficiente de transferência de momento é aumentado pela intensa turbulência gerada pelo elemento de rugosidade do topo do dossel. Assumindo que a altura da camada de transição é uma função linear do comprimento de rugosidade, z_0 , temos que:

$$z_m = z_2 + G_4 z_0 \quad (\text{A.8})$$

Onde $G_4 = z_{tz0}$. Supondo que o valor atual do coeficiente de transferência de momento, K_m , em z_2 é igual a um múltiplo que obtém a estimativa da extrapolação do perfil log-linear que pode ser observado acima de z_m :

$$\begin{aligned}
K_m &= G_1 K_m^* ; & z &= z_2 \\
&= z_2 k u_*(z_2 - d) ; & z &= z_2
\end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Onde G_1 é uma constante; K_m^* é o valor de K_m obtido pela extrapolação do perfil log-linear do vento (m s^{-2}), e $ku^*(z-d)$; k é a constante de von Karman's, com valor de 0.41; u^* é a velocidade de fricção (m s^{-1}); e d é a altura de deslocamento do plano zero (m).

Assumindo que K_m varia linearmente entre z_2 e z_m , aonde se torna igual a K_m^* :

$$K_m = ku_*(z-d) \left[1 + (G_1 - 1) \left[\frac{z_m - z}{z_m - z_2} \right] \right] \quad z_2 < z < z_m \quad (\text{A.10})$$

Para obter o valor da resistência aerodinâmica da transferência de momento entre z_2 e a maior altura, usa-se a integral inversa de (50) e (51):

$$r_{am} \Big|_{z_2}^z = \int_{z_2}^z \frac{1}{K_m} dz \quad (\text{A.11})$$

Onde r_{am} (s.m^{-1}) é a resistência aerodinâmica entre z_2 e z .

Quando z é menor que z_m , (A.10) pode ser inserida dentro de (A.11). Quando z é maior que z_m , o inverso de (A.10) é integrado entre z_2 e z_m e adicionado na integral inversa de K_m^* de z_m para z .

c) Solução das equações de transferência de momento no dossel

No ponto de inflexão da densidade do dossel, z_c , as equações que comandam a transferência de momento dentro do dossel, podem ser resolvidas com as condições de contorno adequadas para o perfil de u e K_m abaixo z_2 e o valor de d .

$$\sigma u \frac{\partial u}{\partial z} = \left[\frac{K_m}{G_1 k (z_2 - d)} \right]^2 \quad (\text{A.12})$$

A velocidade do vento na parte superior do dossel é dada por:

$$u, u^2, y = 1; \quad z = z_2 \quad (\text{A.13})$$

e a tensão de cisalhamento para z_2 .

A velocidade do vento é dada por:

$$u^2 \Big|_{z_c \leq z} = u^2 \Big|_{z_c \leq z} \quad (\text{A.14})$$

e o gradiente da velocidade do vento é:

$$\left. \frac{\partial(u^2)}{\partial z} \right|_{z_c \leq z} = \left. \frac{\partial(u^2)}{\partial z} \right|_{z_c \geq z} \quad (\text{A.15})$$

Enquanto que na parte inferior do dossel, z_l , a tensão de cisalhamento é calculada pela equação:

$$\frac{\sigma}{2} \frac{\partial(u^2)}{\partial z} = C_{D_{gs}} u^2 \quad (\text{A.16})$$

Onde C_{dgs} é o coeficiente de arrasto do solo, $C_{D_{gs}} = [k/\ln(z_1/z_{gs})]^2$.

O deslocamento da altura plano zero é equivalente a altura onde a velocidade do vento é nula dentro do dossel. Portanto podemos escrever da seguinte forma:

$$d = \frac{\int_{z_1}^{z_2} u^2 dz}{\int_{z_1}^{z_2} u^2 dz + \left. \frac{\tau}{\rho} \right|_{z_1} \frac{p_s}{L_d C_d}} \quad (\text{A.17})$$

d) Condições apropriadas para a transferência dentro e acima do dossel

As condições de transferência acima e dentro do dossel têm que ser combinadas em z_2 para assegurar continuidade no perfil da velocidade do vento e na tensão de cisalhamento. Nesse cálculo fica implícito o valor de z_0 em primeiro caso, que pode ser determinado em função de z_2 e d para considerar o balanço de momento na altura z_x , acima do dossel. Dessa maneira os termos de definição de u^* podem ser representados como uma função da diferença da velocidade do vento abaixo da altura referente:

$$u_*^2 = \frac{(u_x - u_2)}{r_{am} \left|_{z_2} \right.} \quad (\text{A.18})$$

Sendo que u_x é a velocidade do vento em z_x ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) e r_{am} é a resistência aerodinâmica ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) para o momento entre z_2 e z_x , eq (A.11).

Para o valor específico de z_x e tendo o valor de z_0 , podemos escrever

$$u_x = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z_x - d}{z_0} \right) \quad (\text{A.19})$$

e para u_2 , podemos escrever

$$u_2 = \frac{G_1 k u_* (z_2 - d)}{\sigma} \quad (\text{A.20})$$

Da combinação das equações (A.19) e (A.20) com (A.18) obtemos uma expressão para z_0 em termos de z_x , G_1 , d e z_m , em que z_m é uma função de z_0 , eq. (A.8), e assim podemos resolver (A.18), iterando com (A.8). Essa solução para z_0 origina uma dependência de z_0 com z_x . Quando $z_x > z_m$, z_0 é invariável com z_x , sendo o perfil log-linear válido. Se $z_x < z_m$, significa que o ponto de referencia das medidas esta dentro da camada de transição acima do dossel e z_0 aparece estar dependente de z_x .

APÊNDICE B – Calibração do modelo e dos módulos implementados

A calibração desse trabalho foi feita através dos dados de campo de IAF, biomassa seca e produtividade.

Para a cultura da cana-de-açúcar a calibração seguiu os seguintes passos: (i) Implementar a curva de alocação original (*aleaf*, *aroot*, *astem*, *arepr*) de CUADRA,2010; (ii) a curva do IAF Total, para os dois ciclos, é ajustada modificando a curva de alocação, principalmente a componente das folhas (*aleaf*) e para o ajuste ser mais refinado, com os dados observados, calibra-se o valor de AFE; (iii) a curva IAF verde, para os dois ciclos, implementa-se a curva de *G* e o valor de *alaicons*, refazendo o passo (ii); (iv) a biomassa seca das folhas, para os dois ciclos, calibra-se o valor de AFE, IAF total e verde, *G* e *alaicons*. Refazendo os passos anteriores (ii e iii); (v) a biomassa seca do caule, para os dois ciclos, calibra-se o valor de AFE, IAF total e verde, *G*, *alaicons* e a curva de alocação principalmente a componente do caule (*astem*). Refazendo os passos anteriores (ii, iii e iv); (vi) a altura do dossel, para os dois ciclos, calibra-se o valor da biomassa do caule e a curva de alocação principalmente a componente do caule (*astem*). Refazendo os passos anteriores (ii, iii, iv, v).

O esquema abaixo demonstra o processo de calibração da cana-de-açúcar.

Para a cultura do milho a calibração seguiu os seguintes passos: (i) Implementar a curva de alocação original (*aleaf*, *aroot*, *astem*, *arepr*) de KUCHARICK e BRYE,2003; (ii) a curva do IAF Total é ajustada modificando a curva de alocação, principalmente a componente das folhas (*aleaf*) e para o ajuste ser mais próximo das observações, calibra-se o valor de AFE e o valor de *alaicons*; (iii) a biomassa seca total calibra-se o valor de AFE, IAF total e *G*. Calibrando novamente o passo anterior (ii); (iv) a biomassa seca das partes calibra-se o valor de AFE, IAF, *G* e a curva de alocação (*aroot*, *aleaf*, *astem*). Refazendo os passos anteriores (ii, iii) em seguida; (v) a biomassa seca dos órgãos reprodutores calibra-se o valor de AFE, IAF, *G* e a curva de alocação principalmente a componente (*arepr*). Refazendo os passos anteriores (ii, iii e iv) em seguida

O esquema abaixo demonstra o processo de calibração do milho.

Para a cultura da soja a calibração seguiu os seguintes passos: (i) Implementar a curva de alocação original (*aleaf*, *aroot*, *astem*, *arepr*) de CORREA ,2008; (ii) a curva do IAF Total é ajustada modificando a curva de alocação, principalmente a componente das folhas (*aleaf*) e para o ajuste ser mais próximo do realizado, calibra-se o valor de AFE e o valor de *alaicons*; (iii) a biomassa seca total calibra-se o valor de AFE, IAF total e *G*. Calibrando novamente o passo anterior (ii); (iv) a biomassa seca dos grãos calibra-se o valor de AFE, IAF, *fyield*, *G* e a

curva de alocação principalmente a componente (*arepr*). Refazendo os passos anteriores (ii e iii) em seguida

O esquema abaixo demonstra o processo de calibração da soja.

APÊNDICE C – Parâmetros aerodinâmicos calculados para as culturas

APÊNDICE D – Forçantes das simulações

Figura 4.1: Dados de entrada do modelo SiB2 do sítio experimental para a cultura da cana-de-açúcar: irradiância de onda curta incidente observada, K_i ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); saldo de radiação, R_n ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); pressão de

vapor, e_m (hPa); temperatura do ar, t_m (K); velocidade horizontal do vento, u_m (m s^{-1}); precipitação observada, $prec$ (mm).

Figura 4.2: Dados de entrada do modelo SiB2 do sítio experimental para a cultura da cana-de-açúcar: irradiância de onda curta incidente observada, K_i (W m^{-2}); saldo de radiação, R_n (W m^{-2}); pressão de vapor, e_m (hPa); temperatura do ar, t_m (K); velocidade horizontal do vento, u_m (m s^{-1}); precipitação observada, $prec$ (mm).

Figura 4.3: Dados de entrada do modelo SiB2 do sítio experimental para a cultura do milho: irradiância de onda curta incidente observada, K_i (W m⁻²); saldo de radiação, R_n (W m⁻²); pressão de vapor, e_s (hPa); temperatura do ar, t_m (K); velocidade horizontal do vento, u_m (m s⁻¹); precipitação observada, $prec$ (mm).

Figura 4.4: Dados de entrada do modelo SiB2 do sítio experimental para a pastagem: irradiância de onda curta incidente observada, K_i (W m^{-2}); saldo de radiação, R_n (W m^{-2}); pressão de vapor, e_m (hPa); temperatura do ar, t_m (K); velocidade horizontal do vento, u_m (m s^{-1}); precipitação observada, $prec$ (mm).