

PAULO JORGE DE OLIVEIRA PONTE DE SOUZA

**AVANÇO DA FRONTEIRA AGRÍCOLA NA AMAZÔNIA:
IMPACTOS NO BALANÇO DE ENERGIA E SIMULAÇÃO DO
CRESCIMENTO E RENDIMENTO DA SOJA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S729a
2009

Souza, Paulo Jorge de Oliveira Pontes de, 1975-

Avanço da fronteira agrícola na Amazônia: impactos no
balanço de energia e simulação do crescimento e rendimento /
Paulo Jorge de Oliveira Pontes de Souza. – Viçosa, MG,
2009.

xx, 262f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Aristides Ribeiro.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 240-259.

1. Balanço energético (Geofísica). 2. Soja - Rendimento.
3. Soja - Crescimento. 4. Impactos ambientais. 5. Soja -
Fatores climáticos. 6. Soja - Efeito da radiação. 7. Amazônia.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 551.4

PAULO JORGE DE OLIVEIRA PONTE DE SOUZA

**AVANÇO DA FRONTEIRA AGRÍCOLA NA AMAZÔNIA:
IMPACTOS NO BALANÇO DE ENERGIA E SIMULAÇÃO DO
CRESCIMENTO E RENDIMENTO DA SOJA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

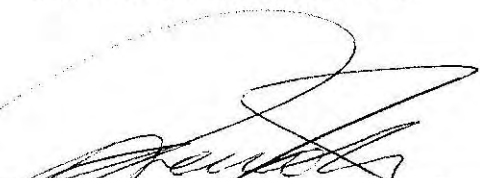
APROVADA: 11 de dezembro de 2009.



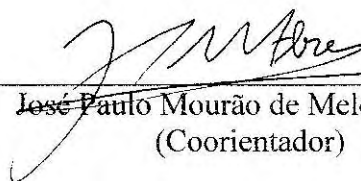
Edson José Paulino da Rocha



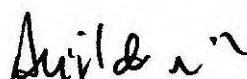
Celso von Randow



José Renato Bouças Farias
(Coorientador)



José Paulo Mourão de Melo e Abreu
(Coorientador)



Aristides Ribeiro
(Orientador)

À minha mãe Iracema Oliveira, que infelizmente não pôde me dar riquezas, mas fez de tudo para me educar, sozinha e com a ajuda de Deus.

À minha querida esposa e companheira Nazaré Azevedo por todo o apoio e incentivo durante este longo período de estudo.

Aos meus filhos Paulo Junior e Ana Paula pelo amor e carinho oferecidos nos momentos mais difíceis durante o curso.

Ao meu pai Hamilton Cezar pelo incentivo e carinho.

Ao meu irmão Carlos Fernando pela sua amizade.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por tudo e por todas as oportunidades oferecidas ao longo de minha vida.

À Universidade Federal Rural da Amazônia, por ter permitido meu afastamento para cursar o doutorado.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Aos professores do curso de Meteorologia Agrícola pelos ensinamentos transmitidos, em especial aos professores Gilberto Sedyama e Sérgio Zolnier, pelos muitos esclarecimentos e sugestões.

Ao amigo e compadre professor Dr. Edson Rocha, por todo o apoio, confiança e incentivo desde o meu ingresso no curso de Meteorologia em 1993 e pelo enorme esforço na realização do experimento de campo.

Ao professor Dr. Aristides Ribeiro, pela orientação, confiança e apoio durante todo o curso.

À equipe de trabalho de campo do experimento CTHIDRO, pela dedicação e responsabilidade na coleta de dados: Adriano, Edna, Roselene, Gleice e outros, e especialmente a Renata Loureiro e Carlos Capela.

Ao professor Dr. José Paulo Abreu, pela importante contribuição na montagem do experimento e pela receptividade e atenção durante minha estada em Portugal.

Ao Dr. José Renato Farias, pela ajuda no modelo da soja, sem a qual não seria possível sua utilização.

Ao Sr. Oswaldo proprietário da fazenda El-Shaday em Paragominas, por permitir a realização do experimento de campo.

À CAPES, pelo auxílio financeiro para a realização do trabalho.

Aos demais familiares que estiveram torcendo pelo meu sucesso.

Aos colegas da pós-graduação em Meteorologia Agrícola Welliam, Ranieri (Fuleragem), Cristiane, Marcelo Cid, Zé de Paulo, Raquel, Roziane, Evandro (Tchê), Rafael Ávila, Rafael Delgado, Thieres e Marcos Vanderlei.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

PAULO JORGE DE OLIVEIRA PONTE DE SOUZA, filho de Hamilton Cezar Ponte de Souza e Iracema Jesus de Oliveira, nasceu em 10 de abril de 1975, em Belém do Pará.

Em novembro de 1996, concluiu o curso de graduação em Meteorologia na Universidade Federal do Pará.

Em março de 1997, ingressou no curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, defendendo dissertação em agosto de 1999.

Em setembro de 1999, ingressou no projeto científico LBA como gerente de logística dos sítios experimentais localizados no estado de Rondônia, onde permaneceu até setembro de 2001.

Em outubro de 2001, foi convidado pela Universidade de Edinburgh para gerenciar o sítio experimental do projeto LBA localizado na Flora de Caxiuaná no estado do Pará, permanecendo até o ano de 2004.

Em agosto de 2002, ingressou no quadro de professor de nível superior da Universidade Federal Rural da Amazônia, em Belém-PA.

Em fevereiro de 2006, iniciou o curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Meteorologia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, na área de sistema e modelagem agrometeorológica, submetendo-se à defesa de tese em 11 de dezembro de 2009.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS	xiv
RESUMO	xvii
ABSTRACT	xix
INTRODUÇÃO GERAL	1
Soja na Amazônia	6
CAPÍTULO 1 – CRESCIMENTO E RENDIMENTO DA SOJA	14
1. INTRODUÇÃO	14
2. MATERIAL E MÉTODOS	17
2.1. Área experimental	17
2.2. Coleta de dados	17
2.3. Medidas de crescimento e desenvolvimento	18
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
3.1. Condições meteorológicas	20
3.2. Índice de área foliar (IAF)	24

	Página
3.3. Produção de matéria seca	27
3.4. Crescimento de grão e produtividade da soja	28
4. CONCLUSÕES	31
5. AGRADECIMENTOS	31
6. REFERÊNCIAS	31
CAPÍTULO 2 – DESENVOLVIMENTO E EXIGÊNCIA TÉRMICA DA SOJA	37
1. INTRODUÇÃO	37
2. MATERIAL E MÉTODOS	40
2.1. Experimento de campo	40
2.2. Medidas meteorológicas	41
2.3. Desenvolvimento fenológico	41
2.4. Graus-dia efetivo	42
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
3.1. Temperaturas cardinais	43
3.2. Exigência térmica	45
3.3. Duração do ciclo	47
3.4. Desempenho do modelo empírico	51
4. CONCLUSÕES	53
5. REFERÊNCIAS	54
CAPÍTULO 3 – EXIGÊNCIA HÍDRICA DA SOJA	58
1. INTRODUÇÃO	58
2. MATERIAL E MÉTODOS	60
2.1. Área experimental	60

	Página
2.2. Dados	60
2.3. Evapotranspiração.....	61
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
3.1. Condições meteorológicas e área foliar	63
3.2. Evapotranspiração	66
3.3. Entressafra	70
4. CONCLUSÕES	72
5. REFERÊNCIAS	73
CAPÍTULO 4 – BALANÇO DE RADIAÇÃO	78
1. INTRODUÇÃO	78
2. MATERIAL E MÉTODOS	80
2.1. Localização	80
2.2. Balanço de radiação	81
2.3. Avaliação do desenvolvimento	81
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
3.1. Condições meteorológicas durante o experimento da soja	82
3.2. Balanço de ondas curtas	83
3.2.1. Dias parcialmente nublados	83
3.2.1.1. Radiação incidente	83
3.2.1.2. Radiação interceptada	84
3.2.1.3. Radiação refletida	85
3.2.2. Dias nublados	86
3.2.2.1. Radiação incidente	86
3.2.2.2. Radiação interceptada	88

	Página
3.2.2.3. Radiação refletida	89
3.3. Balanço de ondas longas	90
3.3.1. Dias parcialmente nublados	90
3.3.2. Dias nublados	92
3.4. Balanço global de radiação	93
4. CONCLUSÕES	93
5. REFERÊNCIAS	94
CAPÍTULO 5 – ALBEDO DA SOJA	97
1. INTRODUÇÃO	98
2. MATERIAL E MÉTODOS	99
2.1. Área experimental	99
2.2. Determinação do albedo	101
2.3. Avaliação do desenvolvimento	101
2.4. Determinação do índice de área foliar (IAF)	102
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
3.1. Fatores intervenientes	103
3.1.1. Elevação solar	103
3.1.2. Índice de área foliar	105
3.1.3. Umidade do solo	106
3.1.4. Velocidade e direção do vento	107
3.1.5. Albedo durante o ciclo da soja	108
3.1.6. Variação horária do albedo da soja	112
4. CONCLUSÕES	114
5. AGRADECIMENTOS	114

	Página
6. LITERATURA CITADA	115
CAPÍTULO 6 – EFICIÊNCIA DO USO DA RADIAÇÃO	118
1. INTRODUCTION	119
2. MATERIALS AND METHODS	120
3. RESULTS AND DISCUSSION	123
3.1. Meteorological conditions	123
3.2. Leaf area index (LAI) and biomass production	126
3.3. Radiation interception	127
3.4. Radiation extinction coefficient (k)	128
3.5. Radiation use efficiency (RUE)	130
4. CONCLUSIONS	134
5. ACKNOWLEDGEMENTS	134
6. REFERENCES	134
CAPÍTULO 7 – BALANÇO DE ENERGIA	138
1. INTRODUÇÃO	138
2. MATERIAL E MÉTODOS	140
2.1. Área experimental	140
2.2. Dados	140
2.3. Metodologia	141
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	143
3.1. Período de entressafra	150
4. CONCLUSÕES	152
5. REFERÊNCIAS	153
CAPÍTULO 8 – IMPACTOS NO ALBEDO	157

	Página
1. INTRODUÇÃO	158
2. MATERIAL E MÉTODOS	160
2.1. Localização	160
2.1.1. Ecosistema soja	160
2.1.2. Ecosistema de floresta	161
2.2. Determinação do albedo	162
2.3. Avaliação do desenvolvimento	163
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	163
3.1. Condições meteorológicas durante o cultivo da soja	163
3.2. Albedo médio diário (soja x floresta)	164
3.3. Impactos no albedo em cada fase	167
4. CONCLUSÕES	169
5. AGRADECIMENTOS	169
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169
CAPÍTULO 9 – IMPACTOS NO BALANÇO DE RADIAÇÃO	172
1. INTRODUÇÃO	172
2. MATERIAL E MÉTODOS	173
2.1. Ecosistema de soja	173
2.2. Ecosistema florestal	174
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	175
3.1. Impactos durante o ciclo da cultura da soja	175
3.2. Impactos durante a entressafra	179
3.3. Análise conjunta	183
4. CONCLUSÕES	186

	Página
5. AGRADECIMENTOS	186
6. BIBLIOGRAFIA CITADA	187
CAPÍTULO 10 – IMPACTOS NO BALANÇO DE ENERGIA	190
1. INTRODUÇÃO	190
2. MATERIAL E MÉTODOS	192
2.1. Ecossistema de soja	192
2.2. Ecossistema florestal	193
2.3. Balanço de energia	193
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	195
4. CONCLUSÕES	202
5. AGRADECIMENTOS	203
6. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	203
CAPÍTULO 11 – MODELO DE CRESCIMENTO DE RENDIMENTO DA SOJA	207
1. INTRODUÇÃO	207
2. MATERIAL E MÉTODOS	209
2.1. Experimento de campo	209
2.2. Medidas meteorológicas	210
2.3. Medidas de crescimento e desenvolvimento	211
2.4. Descrição do modelo	212
2.4.1. Desenvolvimento fenológico	213
2.4.2. Formação da área foliar	214
2.4.3. Produção de biomassa	216
2.4.4. Crescimento de grãos	217

	Página
2.4.5. Balanço de nitrogênio	218
2.4.5.1. Fase vegetativa	218
2.4.5.2. Fase reprodutiva	219
2.4.6. Balanço de água	220
2.4.7. Validação do modelo	221
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	222
3.1. Índice de área foliar (IAF)	222
3.2. Evapotranspiração da cultura (ETc)	224
3.3. Matéria seca total da parte aérea	225
3.4. Rendimento da soja	227
4. CONCLUSÕES	230
5. REFERÊNCIAS	231
CONSIDERAÇÕES FINAIS	237
Recomendações e trabalhos futuros	239
REFERÊNCIAS	240
APÊNDICES	260
APÊNDICE A	261
APÊNDICE B	262

LISTA DE SIMBOLOS

		Unidade
α	Refletividade do dossel – Albedo	%
β	Razão de Bowen	
Δ	Inclinação da curva de pressão de saturação	KPa °C ⁻¹
Δ_e	Gradiente vertical de pressão do vapor d'água	KPa
Δ_L	Matéria seca nas folhas	g m ⁻²
Δ_V	Matéria seca total da parte aérea	g m ⁻²
ΔQ_a	Fluxo de calor advectado	MJ m ⁻²
ΔQ_s	Fluxo de calor armazenado no dossel	MJ m ⁻²
γ	Coefficiente psicrométrico	KPa °C ⁻¹
λ	Calor latente de evaporação	J kg ⁻¹
θ	Tempo térmico normalizado	
ρ	Densidade do ar seco	Kg m ⁻³
τ	Transmissividade do dossel	%
τ_T	Tempo térmico	°C dia ⁻¹
Φ_L	Fração de matéria seca nas folhas	%
Ω	Fator de desacoplamento	
Af	Área foliar	cm ²
AFE	Área foliar específica	m ² g ⁻¹

Ad	Área do disco foliar	cm ²
As	Área do dolo	cm ²
AT	Quantidade atual de água transpirável	mm
Bol	Balanco de ondas longas	MJ m ⁻²
C _p	Calor específico à pressão constante	MJ kg ⁻¹ °C ⁻¹
d	Índice de concordância de Wilmott	
D	Numero de dias de ocorrência do 2º estágio de evaporação do solo	
DAC	Dias após a colheita	
DAE	Dias após a emergência	
DAS	Dias após a semeadura	
dMSa	Produção diária de matéria seca	g m ⁻²
dMSa _w	Produção de matéria seca da parte aérea penalizada pela água	g m ⁻²
ETc	Evapotranspiração da cultura	mm dia ⁻¹
EUR	Eficiência do uso da radiação	g MJ ⁻¹ PAR
Ev	Evaporação do solo	mm dia ⁻¹
FATS	Fração de água transpirável do solo	%
FPI	Fração de PAR interceptada	%
f(T)	Função do efeito reductivo de elevadas temperaturas	
FTSW	Fraction of transpirable soil water	%
G	Fluxo de calor no solo	MJ m ⁻²
g _a	Condutância aerodinâmica	m s ⁻¹
g _c	Condutância do dossel ao transporte de vapor	m s ⁻¹
h	Altura do dossel	m
H	Fluxo de calor sensível	MJ m ⁻²
IAF	Índice de área foliar	
Ic	Índice de colheita	
k	Coefficiente de extinção da radiação PAR	
K _H	Coefficiente de transporte turbulento de calor	
K _{LE}	Coefficiente de transporte turbulento de vapor d'água	
LAI	Leaf Area Index	
LE	Fluxo de calor latente de evaporação	MJ m ⁻²
MSr	Biomassa produzida nos ramos	g m ⁻²
MTA	Modelo de desenvolvimento sem temperatura efetiva	

MTE	Modelo de desenvolvimento sem temperatura efetiva	
NAC	Nitrogênio acumulado	$\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
NAC _w	Acúmulo de nitrogênio diário penalizado pela água	$\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
Ner	Nitrogênio específico nos ramos	mgN g^{-1}
Nef	Nitrogênio específico nas folhas	gN m^{-2}
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa	MJ m^{-2}
PAR _{trans}	Radiação PAR transmitida ao solo	MJ m^{-2}
PAR _{in}	Radiação PAR incidente	MJ m^{-2}
Pd	Peso dos discos	g
Pf	Peso das folhas	g
Prp	Precipitação	mm
Qg	Radiação global incidente	MJ m^{-2}
Qr	Radiação global refletida	MJ m^{-2}
Q _{trans}	Radiação global transmitida ao solo	MJ m^{-2}
R ₁ -R ₈	Fases fenológicas da soja durante período reprodutivo	
r _c	Resistência do dossel ao transporte de vapor	s m^{-1}
RMSE	Raiz quadrado do erro quadrático médio	
Rnet	Saldo global de radiação	MJ m^{-2}
RUE	Radiation use efficiency	$\text{g MJ}^{-1} \text{ PAR}$
T _b	Temperatura basal inferior	°C
T _B	Temperatura basal superior	°C
T _e	Temperatura efetiva	°C
T _o	Temperatura ótima	°C
TT	Quantidade total de água transpirável	mm
V _e -V _n	Fases fenológicas da soja durante período vegetativo	
w _θ	Teor de umidade do solo	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
Z	Ângulo zenital	Graus

RESUMO

SOUZA, Paulo Jorge de Oliveira Ponte de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2009. **Avanço da fronteira agrícola na Amazônia: impactos no balanço de energia e simulação do crescimento e rendimento da soja.** Orientador: Aristides Ribeiro. Coorientadores: Gilberto Chohaku Sedyama, José Paulo Mourão de Melo e Abreu e José Renato Bouças Farias.

Nos últimos anos tem-se verificado um contínuo avanço da fronteira agrícola na região Amazônica, onde se aponta o monocultivo da soja como o principal condicionante. Diante da necessidade de se compreender as respostas desta cultura às condições climáticas da região Amazônica, e também pela necessidade de se avaliar quais os possíveis impactos ambientais gerados por este novo modelo de uso da terra na região realizou-se um experimento micro/agrometeorológico durante os anos de 2006, 2007 e 2008 no município de Paragominas, localizado na região nordeste do estado do Pará por esta região ter apresentado uma rápida expansão desta cultura nos últimos anos. Uma torre micrometeorológica de três metros de altura foi instalada no centro da área de estudo, cultivada com soja variedade Tracajá em uma extensão de 200 ha. Informações de crescimento da soja foram coletadas semanalmente em um experimento inteiramente casualizado com seis repetições, e a fenologia da cultura foi acompanhada diariamente seguindo a escala proposta por Fehr e Caviness (1977) em um experimento também inteiramente casualizado com diferentes tratamentos (data de plantio) e 3 repetições. O balanço de energia e a evapotranspiração da cultura foram obtidos por

meio da razão de Bowen seguindo as recomendações de Perez et al. (1999). Um modelo mecanístico simplificado de crescimento e rendimento da soja foi parametrizado e calibrado para as condições ambientais da Amazônia e sua validação foi feita com dados de rendimento observados entre 2007 e 2009. Dados referentes a um ecossistema florestal foram utilizados nas discussões sobre os impactos da soja e obtidos na floresta nacional de Caxiuanã, localizado no setor central do estado do Pará. A produção de biomassa aérea e área foliar foram influenciadas pelas distintas condições climáticas entre os anos, embora o rendimento final não tenha sido muito diferente devido supostamente pela compensação na fixação de nitrogênio em 2007. A inclusão do efeito redutivo de elevadas temperaturas mostrou ser um método bastante eficiente para simular o desenvolvimento da soja nas condições térmicas da Amazônia reduzindo de 4,7 para 2,3 dias o erro (RMSE) na determinação da maturação fisiológica da soja. O consumo máximo de água ocorreu durante o período reprodutivo, com valor médio de 4,1 mm dia⁻¹ durante o enchimento de grãos. Devido ao aumento gradual no albedo da superfície, o saldo de radiação apresentou redução ao longo do ciclo, sendo grande parte desta energia usada como calor latente principalmente entre as fases de florescimento e enchimento de grãos, havendo, porém um aumento no fluxo de calor sensível próximo da maturação. Durante o ciclo da cultura há uma redução de 16,6% no saldo de radiação e de 15,5% durante a entressafra, mas devido a elevada condutância estomática da soja observou-se impactos positivos no fluxo de calor latente em algumas fases da cultura comparada ao ecossistema de floresta. Por outro lado, há uma diminuição significativa no fluxo de calor latente e um aumento considerável no fluxo de calor sensível durante o período da entressafra comparado ao ecossistema florestal devido à ausência de cobertura vegetal. O modelo de crescimento e rendimento utilizado apresentou ótimo desempenho na simulação da evapotranspiração da soja, e principalmente na produção de área foliar, biomassa total e rendimento final nas condições climáticas da Amazônia. A simulação do rendimento da soja apresentou baixíssimos erros, com diferenças em relação aos dados observados menores que 10%. O modelo encontra-se parametrizado, calibrado e validado para as condições climáticas da Amazônia, e pode ser usado como ferramenta de apoio aos agricultores na tomada de decisões bem como ferramenta de ensino nas instituições de ensino de ciências agrárias da região.

ABSTRACT

SOUZA, Paulo Jorge de Oliveira Ponte de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2009. **The advance of agricultural frontier in the Amazon: Impacts on energy balance and simulation of soybean growth and yield.** Adviser: Aristides Ribeiro. Co-advisers: Gilberto Chohaku Sedyama, José Paulo Mourão de Melo e Abreu and José Renato Bouças Farias.

In recent years there has been observed a continuous expansion of the agriculture frontier in the Amazon region, with the soybean monoculture as the main responsible. Because of the need to understand the responses of this culture to the Amazon climatic conditions, and also by the need to evaluate such possible environmental impacts generated by this new land use model in the region a micro/agrometeorological experiment was carried out during the years 2006, 2007 and 2008 in Paragominas, Para state, due to this region has been shown a rapid expansion of this crop in last years. A micrometeorological tower of three meters high was installed at the center of the experimental area, which was cultivated with soybean (variety Tracajá) in an extension of 200 ha. The soybean growth data were collected weekly in a completely randomized design with six replications, and the crop phenology was monitored daily following the scale proposed by Fehr and Caviness (1977) also in a completely randomized experiment with different treatment (planting date) and 3 replications. The energy balance and evapotranspiration were obtained through the Bowen ratio method following the recommendations of Perez et al (1999). A simplified

mechanistic model of soybean growth and yield was parameterized and calibrated for environmental conditions in the Amazon and its validation was made with yield data obtained from 2007 to 2009. Data from a forest ecosystem were used during impacts discussions and it was obtained at Caxiuanã Forest, located in the central sector of the Para state. The biomass production and the leaf area were both influenced by different weather conditions between years, although the final yield was not very different presumably because of the compensation in nitrogen fixation in 2007. The inclusion of the reductive effect of high temperatures proved to be a very efficient method to simulate the soybean development under such thermal conditions of the Amazon, reducing the error (RMSE) in determining the physiological maturity of soybean from 4.7 to 2.3 days. The maximum soybean water consumption occurred during the reproductive period, with a mean of 4.1 mm day⁻¹ during the grain filling. Due to the gradual increase in surface albedo, the net radiation decreased over the cycle, with major of this energy used as latent heat mainly between flowering and grain filling stages, showing, however, an increase in sensible heat flux close to the maturity. The net radiation was reduced by 16.6% during the crop cycle and by 15.5% during the post-harvest period, but because of its high stomatal conductance it was observed some positive impacts on the latent heat flux during specific crop stages when compared to the forest ecosystem. On the other hand, there is a significant decrease in latent heat flux and a considerable increase in sensible heat flux during the “*dry crop season*” compared to the forest ecosystem due to absence of the vegetation cover. The soybean model used has shown excellent performance in simulating the soybean evapotranspiration, and especially the leaf area production, the total biomass and the final yield under such climatic conditions. The simulation of soybean yield had very low errors, with differences less than 10% compared to the observed data. The model is parameterized, calibrated and validated for the climatic conditions of the Amazonia, and can be used as a decision-supporting tool by farmers as well as a teaching tool in the agricultural sciences schools in the region.

INTRODUÇÃO GERAL

A maior floresta tropical úmida de todo o planeta, a Amazônia tem muita importância, como fonte de calor e vapor d'água, para os processos que determinam a circulação geral da atmosfera. A região Amazônica ocupa uma área total de cerca de 6,9 milhões de km², desde suas nascentes, nos Andes Peruanos, até sua foz, no Oceano Atlântico, ao norte do Brasil. De toda esta área, 64% correspondem à Amazônia legal, representada pelos estados da região Norte, pelo estado do Mato Grosso e Oeste do Maranhão.

A Amazônia é imprescindível para a humanidade, tanto pelo papel que desempenha como fonte de biodiversidade, quanto por representar riquíssima fonte de matéria-prima (alimentares, florestais, medicinais, energéticas, minerais e maior reserva de água potável do planeta). De acordo com Fearnside (2006), existem três grupos básicos relativos aos serviços ambientais providos pela manutenção da floresta que justificam a manutenção de sua área, que são a biodiversidade, a ciclagem de água e o armazenamento de carbono.

Na década de 70, o governo brasileiro priorizou a ocupação da região Amazônica por meio de políticas públicas que facilitaram tal ocupação, por meio de aumento na infraestrutura, pelo assentamento de colonos em áreas florestais, o que causou contínuo aumento da área desmatada (COHENCA, 2005).

De acordo com Soares-Filho et al. (2005), várias são as causas históricas e atuais do desmatamento na Amazônia e, frequentemente, estão inter-relacionadas. Compreendem desde incentivos fiscais e políticas de colonização no passado, as quais

desencadearam forte migração para a Amazônia, como provável solução para os problemas sociais de outras regiões; passam por recorrentes conflitos fundiários, motivados pela ausência de titularidade da terra e pela pressão da reforma agrária; até o recente cenário macroeconômico, que envolve o avanço da exploração madeireira, da pecuária e o agronegócio, em especial, a expansão das culturas de soja sobre áreas de pastagens.

A pavimentação e a construção de estradas consistem no principal determinante dos futuros padrões de desmatamento da bacia Amazônica (SOARES-FILHO et al., 2005). Segundo Mangulis (2003), 75% dos desmatamentos na Amazônia ficam localizados a menos de 25 km de alguma rodovia municipal, estadual ou federal, região conhecida como arco do desmatamento.

Alguns exemplos, como o planejamento de projetos rodoviários, pela reconstrução das rodovias BR-163 (Cuiabá-Santarém) e BR-319 (Manaus-Porto Velho), implicam a abertura de áreas grandes de floresta para a entrada de agentes de desmatamento (FEARNSIDE, 2006).

Segundo o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), a área total desflorestada na Amazônia brasileira vem crescendo, continuamente, desde 1978, quando esta área era de apenas 152 mil km² e passou para um total de área desmatada de 415 mil km², em 1990 (MARGULIS, 2003). No ano de 2008, o total de área desmatada na Amazônia já chegava a 730 mil km², aproximadamente 15% da área total da Amazônia (MIRAGAYA, 2008).

Após um pico de desmatamento ocorrido em 2004 (27.423 km² ano⁻¹), tem se observado redução considerável na taxa anual de desmatamento, que correspondeu a 18.846 km², em 2005, 14.109 km², em 2006, e 11.532 km², em 2007 (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE, 2008). Entretanto, o estado do Pará foi o que apresentou menor redução nessa taxa, já que manteve uma média de 5,5 mil km² por ano, que está relacionada, diretamente, com o crescimento do processo de ocupação pela pecuária extensiva no sul do Estado e também pelo avanço da fronteira agrícola nesta região.

Nos últimos anos, o monocultivo da soja tem sido apontado como o principal responsável pelo avanço da fronteira agrícola na Amazônia (MUELLER; BUSTAMANTE, 2003; DANTAS; FONTELES, 2005). De acordo com Mueller (1992), a rápida expansão da soja, no país, foi consequência de dois fatores importantes,

quais sejam, o apoio do governo brasileiro e condições edafoclimáticas favoráveis ao seu desenvolvimento.

Na região Amazônica, esse tipo de atividade veio crescendo lentamente, mas começou a ganhar espaço, dada a existência de condições favoráveis à expansão da lavoura, que se aproveitou de áreas de transição cerrado-floresta ou mesmo de terras desmatadas ou degradadas que existiam na região (MUELLER; BUSTAMANTE, 2003).

Segundo informações divulgadas pelo IBGE, por meio do levantamento “*Indicadores de Desenvolvimento Sustentável: Brasil 2008*”, o desmatamento na Amazônia é realizado com a principal finalidade de formação de pastos e áreas agrícolas, além da extração ilegal de madeira (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2008).

Na opinião de Kuster e Marti (2004, citados por DANTAS; FONTELES, 2005), o aumento na exportação de soja e de carne bovina pelo Brasil foi um dos principais motivos para o início de um ciclo de exploração indiscriminada de solos no Brasil, cuja consequência foi o aumento no desmatamento da Amazônia para plantios de pastagens e de soja.

Anderson et al. (2003) afirmaram que a agricultura, em particular a soja, foi um importante fator de pressão para a mudança no uso da terra, no caso do cerrado, devido, principalmente, às características do relevo da região e à fácil correção química do solo.

Na opinião de Margulis (2003), porém, a pecuária é a principal atividade na região como fonte dos desmatamentos, devido ao contínuo processo de sua expansão desde os anos 70. Segundo o autor, o alto custo do desmatamento e a correção necessária para o solo tornariam as áreas florestais inadequadas para as atividades agrícolas.

Em vez de despender recursos para a fertilização corretiva do solo amazônico, o qual apresenta poucos nutrientes, os produtores adotam a queimada, por haver aumento de alguns nutrientes logo após esse processo (FEARNSIDE, 1980). De acordo com Homma (2005), o custo de derrubada de novas áreas é de, aproximadamente, R\$ 200 a R\$ 300/hectare, enquanto a correção do solo e a reposição dos nutrientes em áreas já desmatadas chegam a R\$ 700-R\$ 750/hectare, o que os leva a preferir a queimada.

Segundo Simon e Garagorry (2005), a produção agrícola, que antes era concentrada em algumas microrregiões situadas no sul do país, apresentou uma

migração para a região Norte, com novos centros de produção próximos ou mesmo dentro dos limites da região Amazônica. Outro detalhe, citado pelos autores, é que, em 2001, a contribuição da Amazônia para a agricultura brasileira era bastante significativa, em relação a algumas atividades (mandioca, arroz, banana e pecuária), mas, no caso da soja, representava menos de 2% da produção nacional.

Entretanto, alguns pesquisadores afirmaram que o crescimento do cultivo da soja, na Amazônia, acompanha o da pecuária, representando um ciclo que envolve madeiros-pecuaristas-produtores de soja (DANTAS; FONTELES, 2005). Segundo Fearnside (2001), poucos são os produtores de soja que derrubam a floresta para produzi-la, em vez disso, compram áreas já desmatadas de pequenos fazendeiros, obrigando-os a se deslocarem para áreas de fronteira e a derrubar ainda mais a floresta.

Entretanto, há casos em que grandes áreas de plantio de soja são abandonadas, dado o uso exaustivo do solo, e voltam a ser usadas como pasto, o que gera, assim, procura por novas áreas para o plantio da soja.

Além desse desmatamento direto e indireto, a soja causa diversos outros impactos ambientais severos, tais como erosão do solo e contaminação ambiental pelo uso de herbicidas, inseticidas e fungicidas, com efeitos colaterais sobre as florestas adjacentes e sobre o sistema hídrico e biológico (FEARNSIDE, 2001).

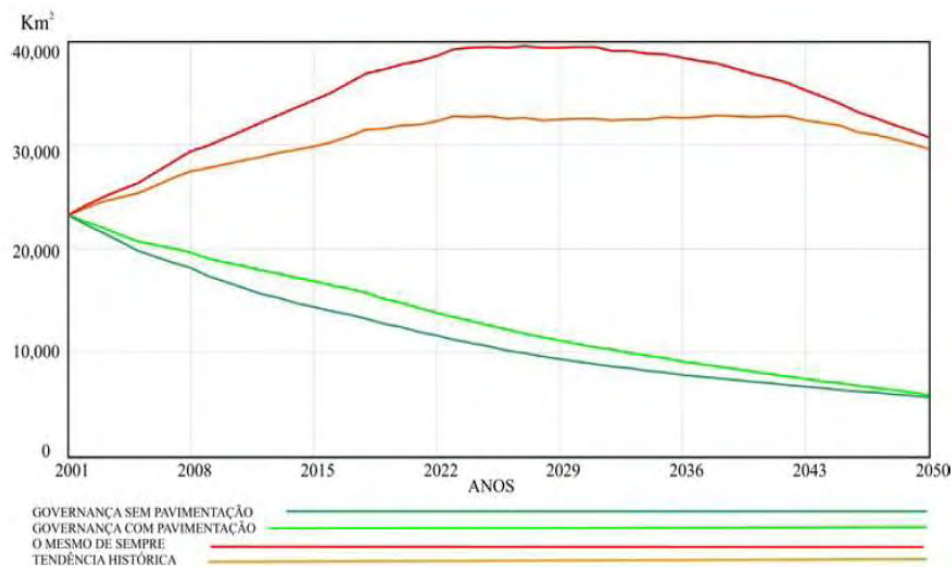
Na opinião de Miragaya (2008), entretanto, o impacto direto causado pela soja, assim como pelas demais culturas temporárias no desmatamento nessa região, é absolutamente inexpressivo, se comparado ao gerado pela atividade pecuária. O impacto maior veio de forma indireta, causado pela expansão da soja, da cana-de-açúcar e de outras culturas em outras regiões do país, as quais provocaram o deslocamento da pecuária bovina para a Amazônia, particularmente para a região do arco do desmatamento, ao qual o autor denomina de “**arco do Boi**”.

Segundo esse autor, as áreas para plantio de pastagens tiveram aumento, entre 1990 e 2006, na Amazônia legal, de 22,7 para 50,8 milhões de ha, enquanto a ocupada com soja, nesse mesmo período, aumentou de 230 mil para 1,72 milhões de ha. A área usada para cana-de-açúcar e outras culturas relevantes (arroz, milho, algodão e outros) aumentou de 14 mil para 27 mil ha e de 365 mil para 600 mil ha, respectivamente.

Independente de qual seja o principal fator que exerça pressão para o desmatamento na região Amazônica, o seu controle é essencial para evitar os impactos da perda da floresta. Soares-Filho et al. (2005), ao realizarem simulações de cenários

futuros para o desmatamento da Amazônia, encontraram resultados preocupantes, caso não haja uma ação firme do governo no combate ao desmatamento.

Para esses autores, no cenário mais pessimista chamado de “*o mesmo de sempre*”, no qual se considera a taxa histórica de desmatamento, além da aceleração devido ao asfaltamento das rodovias, o desmatamento na Amazônia brasileira atingiria mais de 50% da cobertura original, apresentando uma taxa anual de desmatamento de 40 mil km², em torno de 2030 (Figura 1). No entanto, no cenário mais otimista, chamado de “*governança*”, as taxas teriam uma trajetória descendente, graças ao aumento gradual do estado de governança através da bacia Amazônica.



Fonte: Soares-Filho et al. (2005).

Figura 1 – Projeção do desmatamento, sob vários cenários, para a Amazônia brasileira.

No entanto, ao excluir as áreas protegidas, como terras indígenas e reservas florestais, apenas 20% da Amazônia legal, cerca de 1,0 milhão km², é considerada área potencial para rendimentos da soja superiores a 2 t ha⁻¹ (VERA-DIAZ et al., 2008). Desta área, 44% pertencem ao estado do Mato Grosso, onde a soja já se encontra totalmente expandida, o que representa uma barreira econômica para o contínuo avanço desta cultura na Amazônia. Fatores como condições edafoclimáticas adequadas, crédito financeiro acessível, facilidade no transporte e menor gasto com o uso de fertilizantes e defensivos são determinantes para potencializar o plantio extensivo da soja nessas áreas.

Soja na Amazônia

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) já era cultivada há mais de cinco mil anos, no leste da Ásia, e era tratada como um grão sagrado pelos chineses, que a exploravam intensamente em sua dieta alimentar, sendo bastante diferente da que é cultivada atualmente. Somente na segunda metade do século XX, essa cultura começou a ser explorada pelos países Ocidentais, em especial, os Estados Unidos, que, em 1940, já cultivavam cerca de dois milhões de hectares da cultura, a qual, no entanto, usada como forrageira (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2005).

Por volta de 1960, a área para o cultivo de grãos da soja já havia crescido, exponencialmente, nos EUA e outros países, como Brasil e Argentina, já apresentavam extensas áreas de produção dessa cultura. Na safra de 2006/2007, a área total cultivada com soja, no Brasil, ficou em torno de 20,7 milhões de hectares, com uma produção média de 58,4 milhões de toneladas, abaixo somente dos EUA, que produziram pouco mais de 73 milhões de toneladas (EMBRAPA, 2008). Na safra de 2007/2008, chegou a 21,3 milhões de hectares de área plantada, com produção de 60 milhões de toneladas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2008).

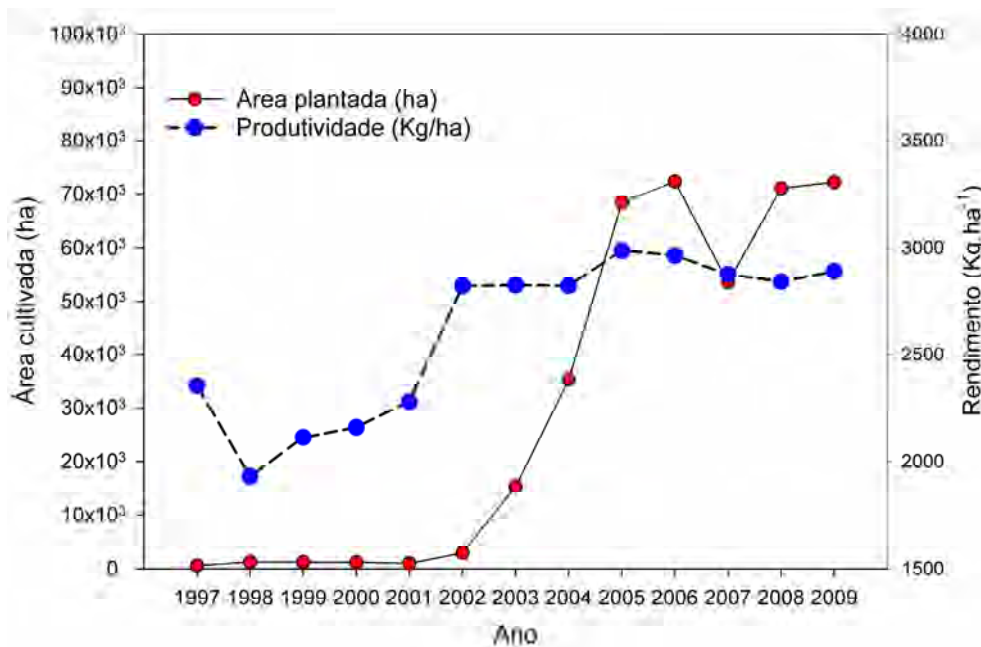
O cultivo da soja foi introduzido no Brasil em torno de 1882, no estado da Bahia, vinda dos Estados Unidos, mas só começou a ser desenvolvido, com considerável êxito, nos estados da região Sul, em 1900, devido às condições climáticas similares às da região de origem (EMBRAPA, 2005).

No Rio Grande do Sul, a soja começou a ser cultivada para substituir as áreas onde anteriormente eram pastos ou onde eram cultivadas outras lavouras. Posteriormente, foi expandida para os estados do Paraná, Santa Catarina e São Paulo (MUELLER; BUSTAMANTE, 2003).

De acordo com Igreja et al. (1988), a partir da década de 80, a soja expandiu-se para outras regiões do Brasil, como os estados de Goiás, Oeste de Minas Gerais, Sul do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Atualmente, dos 21,7 milhões de hectares cultivados com soja no Brasil, cerca de 45,5% localizam-se na região Centro-Oeste, sendo o estado do Mato Grosso o principal produtor de soja no país, com uma produção média de 17,96 milhões de toneladas, cerca de 31,4% do total que é produzido no país, seguido pelo estado do Paraná, que é responsável por quase 16,6% de toda a produção nacional (CONAB, 2009).

Na década de 2000, a soja chegava à Amazônia, mas ocupava uma área considerada insignificante (73 mil ha), em relação ao restante do país (MUELLER; BUSTAMANTE, 2003). Na safra de 2007/2008, no entanto, essa área total já chegava a 517 mil ha, mas representava somente 2,6% da produção total do país (CONAB, 2009).

No estado do Pará, especificamente, a área plantada era de apenas 1.200 ha no ano de 2000, mas a região já vinha recebendo incentivos do governo, desde 1994, para aumentar a produção de grãos, principalmente nas regiões de Santarém e Paragominas. No ano de 2006, o total de área plantada no estado já chegava a 72 mil ha, com produtividade média de 3 ton.ha⁻¹ (Figura 2) (SAGRI, 2009).



Fonte: Sagri (2009).

Figura 2 – Evolução da produção de soja no estado do Pará, nos últimos anos.

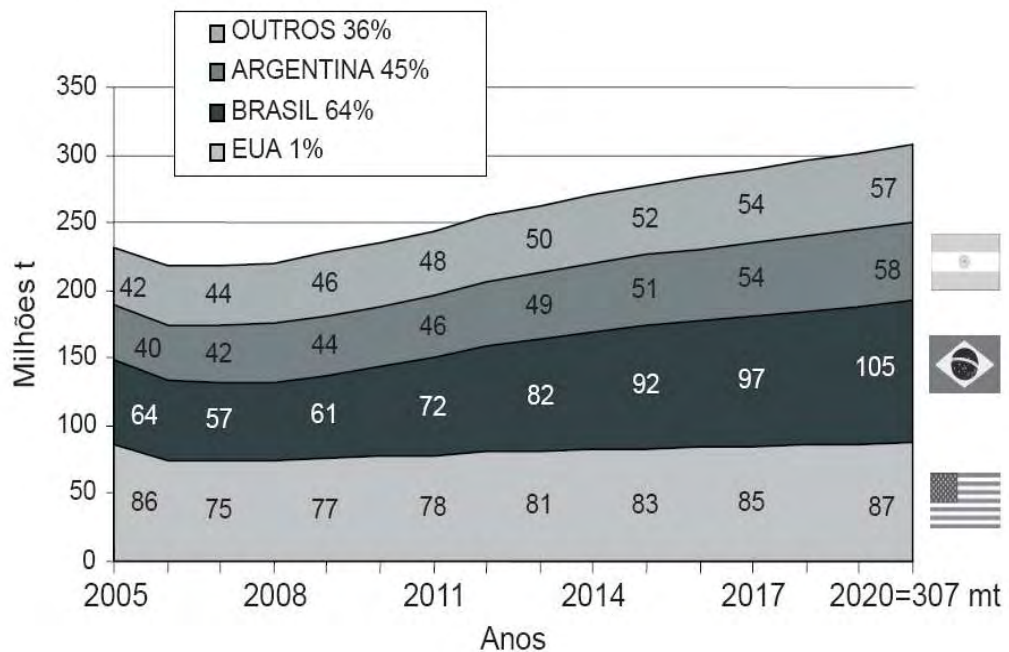
Na safra de 2006/2007 e 2007/2008, entretanto, a área plantada no estado do Pará reduziu-se para 53 e 71 mil ha, respectivamente, com uma produção de 154 e 201 mil ton, considerado o terceiro maior produtor da região Norte, atrás do Tocantins (856 mil ton) e de Rondônia (326 mil ton) (CONAB, 2009).

Essa redução na área total de produção se deu devido a questões ambientais na região de Santarém, o que causou redução no crédito de financiamento e obrigou os

produtores a optarem por outras culturas, aliadas à ocorrência de doenças e da baixa competitividade da soja perante o milho, na região de Paragominas (EL HUSNY, 2007).

Apesar de existirem alguns fatores que dificultam e restringem o avanço da cultura da soja na Amazônia, como os altos níveis pluviométricos e o favorecimento à proliferação de pragas e doenças, devido ao clima quente e úmido (BENCHIMO et al., 2005), a descoberta e a incorporação de novas variedades menos sensíveis a elevadas temperaturas e, principalmente, ao fotoperíodo tornaram possível a expansão para essas regiões de baixa latitude (SINCLAIR et al., 2005).

Segundo a Embrapa, o mercado da soja, no Brasil, apresenta boas perspectivas de crescimento nos próximos anos, devido a fatores como aumento da população humana, o que, indiretamente, resultará em elevação da produção de farelo de soja; o potencial uso da soja para a indústria de biodiesel; e, principalmente, pelo fato de os países produtores, como EUA, China e Índia, estarem com suas fronteiras agrícolas quase ou totalmente esgotadas, o que tornará o Brasil um dos grandes provedores da grande demanda mundial (Figura 3).



Fonte: Embrapa (2008).

Figura 3 – Produção mundial de soja, em 2020.

Segundo informações da FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação), mais de 850 milhões de pessoas passam fome no planeta hoje em dia, valor que, devido à atual crise de alimentos, pode aumentar em 300 milhões, razão da necessidade de aumento na produção de alimentos em 50%, até 2030.

A utilização de alimentos alternativos no combate à fome da população de baixa renda é assunto que tem recebido atenção no Brasil, nos últimos anos, especialmente em razão do drama crescente da população carente. Segundo Homma (1996), são necessários que sejam cultivados de 1 a 1,3 milhão de hectares de culturas de subsistência, para alimentar a população da Amazônia, em gêneros de primeira necessidade (arroz, feijão, mandioca, etc.).

Na Amazônia, os pequenos produtores são responsáveis por grande parte da produção de banana, feijão, mandioca e café; a produção de milho e arroz é realizada em posição intermediária, enquanto produtos como soja e pecuária são produzidos, principalmente, em grandes fazendas (HOMMA, 1996). No ano de 2001, a Amazônia já possuía um papel importante na agricultura brasileira, dada a expressiva participação na produção nacional de alguns itens, como mandioca (28,9%), banana (21,3%), arroz (14,2%) e rebanho bovino (20%).

Embora o total produzido atualmente com soja, nos estados da região Norte (RR, RO, PA e TO), seja de apenas 2,6% do total nacional, houve pequeno aumento em relação ao que era produzido em 2001 (2%).

Fatores como baixos preços das terras e condições climáticas favoráveis, na Amazônia, fizeram com que houvesse essa migração na agricultura brasileira, e acredita-se que esta continue a ser o padrão dominante na agricultura brasileira, uma vez que são necessárias novas áreas para suprir a crescente demanda de alimentos (HOMMA, 1996). Um detalhe bastante importante nesta discussão, no entanto, é o fato de que em algumas cidades da Amazônia, a soja foi adotada como estratégia para levar desenvolvimento e agregar valores aos serviços gerados direta e indiretamente na região.

No caso da soja, entretanto, cerca de 80% da produção mundial ainda é destinada à elaboração de ração animal por meio do farelo da soja, que é muito pouco usado diretamente na alimentação humana. Rica em proteínas de boa qualidade, a soja possui ácidos graxos poliinsaturados, além de ser excelente fonte de minerais e vitaminas do complexo B. De forma geral, apresenta, em média, cerca de 40% de proteínas, 20% de óleos, 5% de minerais e 34% de carboidratos, enquanto o arroz

possui 7% de proteína e o feijão 20%, razão pela qual pode ser uma boa opção para a dieta humana, pois, embora tenha mais calorias (395 cal/100 g) do que o arroz (364) e o feijão (344), possui mais proteínas (EMBRAPA, 2008).

Desde 1985, a Embrapa soja vem trabalhando no desenvolvimento de cultivares mais adequadas ao consumo e que pudessem ser introduzidos na alimentação humana, por meio da melhoria do sabor e aumento do tamanho do grão e do teor de proteínas. Alguns produtos derivados, como leite, óleo, fibra, proteínas texturizadas e grãos de soja, estão cada vez mais frequentes na mesa do consumidor.

Na tentativa de reduzir a pressão pelo avanço da fronteira agrícola na região, algumas atitudes estão sendo tomadas tanto pelo governo brasileiro, como também pelos grandes importadores da soja que é produzida no Brasil, para tentar reduzir os desmatamentos na Amazônia.

Uma destas ações foi a criação, no ano de 2003, de um grupo de trabalho chamado “Articulação Soja Brasil”, formado por ONGs que tinham o objetivo principal de discutir os critérios de produção da soja para servir de referência para as empresas compradoras do produto. Em 2004, essa articulação gerou um documento intitulado “Critérios para Responsabilidade Social das empresas Compradoras de Soja”, no qual foram enumerados vários parâmetros mínimos para serem observados pelas empresas com relação à origem do grão, sugerindo que estas não comprassem soja cultivada que não atendessem a tais condições.

Segundo Galeranie (2003), o crescente aumento na produtividade da soja tem relação direta com o avanço tecnológico ocorrido nos últimos anos, portanto, a procura por novas áreas para produção de soja, na Amazônia, é um reflexo exclusivamente do apelo econômico, e não de uma possível estagnação da produtividade, o que mostra que é possível produzir bem, mesmo com a mesma quantidade de área já existente, e não há tanta necessidade de novas aberturas.

A falta de alternativas de atividades econômicas sustentáveis leva a população, mesmo em comunidades tradicionalmente extrativistas, a práticas criminosas como forma de sobrevivência, pois, muitas vezes, são os próprios habitantes das reservas extrativistas que desmatam a floresta para formar pastagens ou vender a madeira.

Para cerca de 10 milhões de moradores da Amazônia legal que dependem da atividade extrativista ou agropecuária, discursos sobre consciência ecológica não funcionam, pois o que eles precisam é de medidas que tornem mais vantajoso preservar do que destruir.

Segundo Homma (2005), o Brasil precisa, urgentemente, de uma quinta revolução tecnológica, como as que ocorreram quando da criação da Petrobrás, da Embraer, do programa Proálcool e da fundação da Embrapa, a qual deverá se ater aos problemas da Amazônia, visando ao domínio da biodiversidade e à descoberta de atividades apropriadas e de novas alternativas econômicas.

Por isso, há necessidade de se efetuarem trabalhos, junto aos agricultores, que busquem alternativas sustentáveis de exploração da floresta, mostrando que é possível viver da agricultura e, ao mesmo tempo, através do extrativismo, por meio da extração de produtos florestais como castanha, babaçu e outros que constam como atividades a serem financiadas pelo Fundo Amazônia, criado pelo governo federal.

Atividades extrativistas, como sangria da seringueira, colheita do cacau e do cupuaçu, açaí, extração de palmito e outros, são atividades que precisam de mão-de-obra, já que não deve surgir tão cedo maquinário que substitua essa mão-de-obra, seriam atividades apropriadas para a agricultura familiar, com vistas em reduzir a quantidade de mão-de-obra desempregada (HOMMA, 2005).

Na opinião de Homma (2005), o uso das áreas já desmatadas, nas quais se desenvolvam atividades que tenham mercado e com técnicas apropriadas, e a recuperação das áreas que não deveriam ter sido desmatadas seriam alternativas viáveis a serem adotadas pelo governo, para buscar o uso sustentável da Amazônia. Cerca de 16 milhões de hectares de áreas de pasto estão abandonados na Amazônia, os quais poderiam ser recuperados e usados, o que faria com que a produção de grãos crescesse 30% na região, sem que houvesse a necessidade de derrubada de uma única árvore.

Espera-se que, com todas essas medidas, os habitantes da Amazônia, em especial os pequenos e grandes produtores, conscientizem-se de que é possível produzir sem precisar queimar e derrubar mais do que já foi feito, nesses últimos anos.

Algumas pesquisas indicam sérios problemas ambientais decorrentes do desmatamento da Amazônia, em especial, os climáticos, uma vez que esta região funciona como uma importante fonte de energia e de vapor d'água para circulação geral da atmosfera.

Resultados observacionais indicam que, na Floresta, a maior parte da energia é usada para evaporação e pouca, para aquecer o ambiente, enquanto em áreas de pastagem a transferência de energia para a atmosfera acontece de forma equilibrada, durante o período seco (GALVÃO; FISCH, 2000). Outros resultados indicam que a substituição da floresta por áreas de pastagem, na Amazônia, ocasiona sérios impactos,

como aumento na temperatura do ar, aumento no albedo da superfície, e redução na evapotranspiração (RANDOW et al., 2004; SANTIAGO, 2005).

Ao utilizarem modelos de circulação da atmosfera (ETA/SSiB), com diferentes mapas de vegetação da Amazônia, Alvalá et al. (2007) encontraram redução no saldo de radiação que variava de 15 a 17% para um cenário atual de desmatamento e para um cenário futuro, em que se considera a completa remoção da floresta Amazônica para fins de pastagem, respectivamente.

Quando o desmatamento objetiva a implantação da lavoura de soja, poucos são os resultados disponíveis, pois há grande necessidade de compreender, com mais detalhes, esse novo modelo de uso da terra na Amazônia. Devido às características da soja relacionadas com sua fisiologia e arquitetura, os impactos são mais intensos do que quando o solo é usado para a pastagem (SOUZA et al., 2008a).

Resultados obtidos com modelos de circulação da atmosfera mostram que a substituição da floresta para cultivo da soja também causa redução na precipitação, semelhante aos encontrados quando o uso é para fins de pastagem. Entretanto, os impactos são mais intensos no caso do ecossistema de soja, devido ao elevado albedo da superfície (COSTA et al., 2007; SAMPAIO et al., 2007).

No entanto, estes resultados não são conclusivos, por terem sido utilizadas apenas duas variáveis para parametrização do modelo (albedo e índice de área foliar) e não terem sido considerados os impactos da entressafra. Tais modelos precisam utilizar cenários mais realistas das características e dos processos físicos observados no ecossistema de soja podendo resultar em diferentes conclusões acerca da redução que ocorreria na precipitação da Amazônia, dado o avanço da soja.

Diante desta discussão, verifica-se a extrema necessidade de compreender o comportamento desta cultura nesta região cujas características climáticas são totalmente diferentes das demais regiões produtoras de soja no Brasil, não apenas para conhecer os aspectos agronômicos da mesma, mas também para se tentar elucidar as possíveis alterações que este novo modelo de uso da terra possa causar no clima. Portanto, este estudo teve o principal objetivo de estudar o desenvolvimento da soja, nas condições climáticas da região Amazônica, e entender os possíveis impactos de plantios extensivos desta cultura no clima regional.

Especificamente, pretende-se:

- a) Quantificar os indicadores fisiológicos da cultura e sua variação ao longo do ciclo da cultura, como índice de área foliar, produção de matéria seca, e rendimento final;
- b) Determinar as exigências térmica e hídrica, durante o desenvolvimento da soja, em diferentes estádios fenológicos;
- c) Determinar a eficiência do uso da radiação solar ao longo do ciclo da soja;
- d) Estudar os componentes do balanço de radiação, durante o ciclo da soja e durante a entressafra;
- e) Estudar os componentes do balanço de energia (calor sensível e latente), durante o ciclo da soja e durante a entressafra;
- f) Analisar comparativamente os componentes do balanço energético no ecossistema de soja e florestal da Amazonia afim de determinar os impactos gerados;
- g) Calibrar e validar um modelo matemático de crescimento e produtividade da soja para as condições ambientais locais, o qual incorpore o processo de assimilação de nitrogênio e carbono em razão do uso eficiente da radiação solar;
- h) Simular, ao longo do ciclo da cultura, o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da soja, na região de estudo.

CAPÍTULO 1

CRESCIMENTO E RENDIMENTO DA SOJA

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação), mais de 850 milhões de pessoas passam fome no planeta hoje em dia, e devido à atual crise de alimentos este valor pode aumentar em 300 milhões, sendo necessário haver um aumento na produção de alimentos em 50% até 2030.

Vieira et al. (1999) avaliaram o teor nutricional de seis cultivares de soja e constataram que elas apresentavam excelente balanço de aminoácidos essenciais, podendo ser consideradas como uma fonte de proteína de alta qualidade para a alimentação humana. Todas as cultivares estudadas apresentaram em sua composição um conteúdo médio, na base seca, de 39,52% de proteína, 23,04% de óleo, 5,41% de cinzas, 5,75% de fibra e 32,01% de glicídios totais.

O mercado da soja no Brasil apresenta boas perspectivas de crescimento nos próximos anos, devido a fatores como o potencial uso da soja para a indústria de bicomustível, ao aumento do consumo de farelo de soja e principalmente pelo fato de países produtores como EUA, China e Índia estarem com suas fronteiras agrícolas quase ou totalmente esgotadas, tornando o Brasil como um dos grandes provedores da demanda mundial (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2008).

A cultura da soja foi introduzida no Brasil em 1882 no estado da Bahia, mas só começou a ser desenvolvida com êxito no Brasil, nos estados da região Sul devido às condições climáticas similares às do local de origem. No Rio Grande do Sul a soja começou a ser cultivada como uma substituição às áreas anteriormente cultivadas com pastos ou outras lavouras. Posteriormente foi expandida para os estados do Paraná, Santa Catarina e São Paulo (MUELLER; BUSTAMANTE, 2006).

De acordo com Igreja et al. (1988), a partir da década de 80, a soja se expandiu para outras regiões do Brasil, como os estados de Goiás, Oeste de Minas Gerais, Sul do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Em alguns casos, como no cerrado, a expansão da soja ocorreu devido ao tipo de relevo da região, à fácil correção química do solo, e ao apoio técnico-científico oferecido pelo Governo (ANDERSON et al., 2003).

Segundo Simon e Garagorry (2005), a produção agrícola que antes era concentrada em algumas microrregiões situadas no sul do País, apresentou uma migração para a região Norte, possuindo novos centros de produção próximos ou mesmo dentro dos limites da região Amazônica. O avanço da sojicultura para as regiões de baixas latitudes surgiu como estratégia para atender ao crescente aumento da população e da demanda por alimentos e mais recentemente pela pressão decorrente da busca por biocombustíveis.

A baixa rentabilidade econômica das pastagens também contribuiu para que houvesse esta migração no uso da terra para fins agrícolas nestas regiões. Outro detalhe, no entanto, é o fato de que em algumas cidades da Amazônia, a soja foi adotada como estratégia para levar desenvolvimento e agregar valores aos serviços gerados direta e indiretamente na região.

Na Amazônia o cultivo da soja (*Glycine max* (L.) Merryl) se iniciou na década de 2000, com uma área de plantio de apenas 73 mil ha. No estado do Pará, por exemplo, a área plantada era de apenas 1.200 ha em 2000, mas a região já vinha recebendo incentivos do governo desde 1994 para estimular o aumento da produção de grãos principalmente nas regiões de Santarém e Paragominas (MUELLER; BUSTAMANTE, 2006). A área plantada em 2006 no estado do Pará já chegava a 72 mil ha, com produtividade média de 3 t ha⁻¹ (SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA – SAGRI, 2009).

Entretanto, nas safras de 2007 e 2008 a área plantada no estado do Pará apresentou uma redução para 53 e 71 mil ha, respectivamente, com uma produção de 154 e 201 mil ton (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB,

2009). Esta redução se deu devido a questões ambientais na região de Santarém, causando redução do crédito de financiamento e obrigando os produtores a optar por outras culturas; e também associadas a ocorrência de doenças e da baixa competitividade da soja perante o milho na região de Paragominas (EL-HUSNY, 2007).

Fatores como os baixos preços das terras e condições climáticas favoráveis na Amazônia fizeram com que houvesse esta migração na agricultura Brasileira (HOMMA, 1996). Apesar dos altos níveis pluviométricos, altas temperaturas e do favorecimento à proliferação de pragas e doenças dificultarem o avanço da soja na Amazônia (SCHNEIDER et al., 2000), o desenvolvimento de novas variedades menos sensíveis a elevadas temperaturas e principalmente ao fotoperíodo, tornou possível a expansão da sojicultura para as regiões de baixa latitude (SINCLAIR et al., 2005).

Apesar dos sérios impactos ambientais gerados pelo avanço da soja como redução das chuvas na região (COSTA et al., 2007), aumento do albedo da superfície (SOUZA et al., 2008a) e erosão e contaminação do solo pelo uso de produtos químicos (FEARNSIDE, 2001) o impacto direto causado pela soja, assim como pelas demais culturas temporárias no desmatamento nesta região é absolutamente inexpressivo comparado ao gerado pela atividade pecuária (MIRAGAYA, 2008).

No entanto, excluindo-se as áreas protegidas como terras indígenas e reservas florestais, apenas 20% da Amazônia Legal, cerca de 1,0 milhão km², são consideradas áreas potenciais para rendimentos superiores a 2 t ha⁻¹ desta cultura (VERA-DIAZ et al., 2008). De toda esta área 44% pertencem ao estado do Mato Grosso onde a soja já se encontra totalmente expandida o que representa uma barreira econômica para o contínuo avanço desta cultura na Amazônia. Fatores como condições edafoclimáticas adequadas, crédito financeiro acessível, facilidade no transporte e menor gasto com o uso de fertilizantes e defensivos são determinantes para se potencializar o plantio extensivo nestas áreas.

Alguns estudos realizados no Brasil têm mostrado que o rendimento da soja é influenciado por fatores como déficit hídrico (THOMAS; COSTA, 1994; ALBERTO et al., 2006), excesso hídrico (SCHOFFEL et al., 2001), temperatura (SCHOFFEL; VOLPE, 2002), espaçamento adotado (TOURINO et al., 2002; RAMBO et al., 2003) e ao nitrogênio (JENDIROBA; CÂMARA, 1994). No caso específico da Amazônia, nas áreas aonde o cultivo da soja vem sendo desenvolvido com certa intensidade, pouco se sabe sobre o comportamento desta cultura em função das condições ambientais da região.

Por isso, é importante ampliar os conhecimentos sobre as respostas da soja em áreas em que se verifica o avanço da fronteira agrícola na região para validação de modelos de simulação que possam ser utilizados tanto para prever as respostas da cultura às variáveis climáticas locais como para prever os impactos ambientais nas áreas onde já se realiza e onde se prevê o cultivo da soja.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área experimental

O experimento foi realizado na região nordeste do estado do Pará, a cerca de 320 km da cidade de Belém. O campo experimental ficou localizado em uma área com 200 ha de plantio de soja (latitude: 2°59'08"S, longitude: 47°19'57"W, altitude: 122 m). O solo da região é classificado como latossolo amarelo argiloso de textura variando de franco-arenosa a muito argilosa (71% de argila) com conteúdo volumétrico de água de 0,43 m³m⁻³ na capacidade de campo e de 0,19 m³m⁻³ no ponto de murcha.

O solo foi convencionalmente preparado no início da estação chuvosa e posteriormente foi semeado mecanicamente com a cultivar BRS Tracajá (maturidade intermediária) a qual é a cultivar mais recomendada para esta região (EL-HUSNY et al., 2003a). A população de plantas foi de 200.000 plantas ha⁻¹ a um espaçamento entre linhas de 0,50 m.

Antes da semeadura, as sementes foram preparadas adequadamente com inoculante (*rhizobium*), fungicida e inseticida. A semeadura foi realizada em 23 de fevereiro de 2007 e sete de fevereiro de 2008, a uma taxa de 26-28 sementes m⁻². Durante a semeadura realizou-se fertilização do solo com 2-20-18 de N, P e K a 350 kg ha⁻¹ de fertilizante químico. Em todos os experimentos, herbicidas e pesticidas foram utilizados quando necessário. A colheita foi realizada nos dias 21 e 06 de junho de 2007 e 2008, respectivamente.

2.2. Coleta de dados

Uma torre micrometeorológica de 3 metros de altura foi instalada no centro da área experimental (Tabela 1). Os sensores foram conectados a um datalogger CR10X (Campbell Scientific, Inc.) e a um multiplexador AM416 (Campbell Scientific, Inc.). As

medidas dos dados durante o experimento foram realizadas a cada 10 segundos, fornecendo totais e médias a cada 10 minutos. A fim de se obter informações sobre a disponibilidade de água para a soja, utilizou-se a fração de água transpirável do solo (FATS) seguindo a metodologia proposta por Sinclair (1986) através da razão entre a quantidade real de água transpirável e o total de água transpirável do solo.

Tabela 1 – Lista de instrumentos, alturas e medições da estação meteorológica automática instalada no experimento da soja

Variável meteorológica	Instrumento usado, fabricante (modelo)	Alturas
Radiação global incidente e refletida	Pyranometers Kipp & Zonen (CMP3)	2,45 (m)
Radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR)	Quantum sensor LI-COR (LI-190)	4 (m)
PAR refletida	Quantum sensor LI-COR (LI-190)	2 (m)
Radiação global transmitida	Tube solarímetro	Superfície do solo
PAR transmitida	Line quantum sensor LI-COR (LI-191)	Superfície do solo
Saldo de radiação	NR Lite (Campbell Sci.)	2,45 (m)
Temperatura do ar	Vaisala thermohygrometer (HMP35A), PT100 resistors	0,5; 1; 2 (m)
Umidade relativa do ar	Vaisala thermohygrometer (HMP35A),	0,5; 1; 2 (m)
Chuva	Rain gauge TB4	3,9 (m)

2.3. Medidas de crescimento e desenvolvimento

Dados para análise de crescimento foram coletados semanalmente a partir dos 10 dias após a semeadura (DAS). A amostragem das plantas consistiu de escolhas aleatórias de linhas de 1 metro de comprimento com seis repetições. Todas as amostras eram mantidas em saco de papel após terem sido coletadas até o processamento final no laboratório. As amostras eram então separadas em folhas, caules, pecíolos, flores, vagens e grãos (quando presentes) e eram posteriormente colocadas para secar em estufa aerada a 70°C por no mínimo 48h para estimativa do peso seco da planta. Na maturação (R8), a produtividade foi medida através de coletas com seis repetições de parcelas de um metro quadrado de área.

A área foliar foi estimada através do método dos discos (BENINCASA, 2003). Trinta discos de área conhecida eram coletados por repetição, colocados pra secar e pesados (equação 1).

$$A_f = \left(\frac{A_d * (P_d + P_f)}{P_d} \right) \quad (1)$$

$$A_d = (\pi.R^2) * n_d$$

em que A_f é a área foliar; A_d , área dos discos; P_d , peso seco dos discos; P_f , peso seco do resto das folhas; e n_d , número de discos.

O índice de área foliar foi estimado considerando estas medidas e o peso seco das folhas conforme a equação 2:

$$IAF = \left(\frac{A_f}{A_s} \right) = \left(\frac{A_f}{D_{planta} * D_{linha}} \right) \quad (2)$$

em que A_s é a área do solo; $D_{plantas}$, distância média entre plantas (≈ 10 cm); D_{linha} , distância média entre linhas (≈ 50 cm).

O desenvolvimento fonológico foi avaliado diariamente usando a escala descrita por Fehr e Caviness (1977) conforme Tabela 1A e Figura 1B apresentadas nos Apêndices A e B, respectivamente, e também durante a amostragem das plantas. Os estádios de desenvolvimento da soja foram acompanhados usando a escala térmica normalizada (θ), onde o tempo térmico é calculado de acordo com o modelo de “*dente de serra*” em função da temperatura efetiva (FERREIRA et al., 1997) e os tempos térmicos medidos para as fases R1, R3, R5 e R6 são os normalizadores (PENNING DE VRIES et al., 1992; COSTA et al., 2009).

A correção de fotoperíodo não foi considerada pelo fato da cultivar usada ser adaptada a região norte do Brasil (SINCLAIR et al., 2005). O tempo térmico normalizado foi definido para as fases fenológicas como $\theta = 1$ para o florescimento (R1), $\theta = 2$ para a frutificação ($\approx R3$), $\theta = 3$ para o início do enchimento de grãos (R5), $\theta = 4$ para a fase e enchimento pleno do grão (R6) e $\theta = 5$ para a maturação fisiológica (R7).

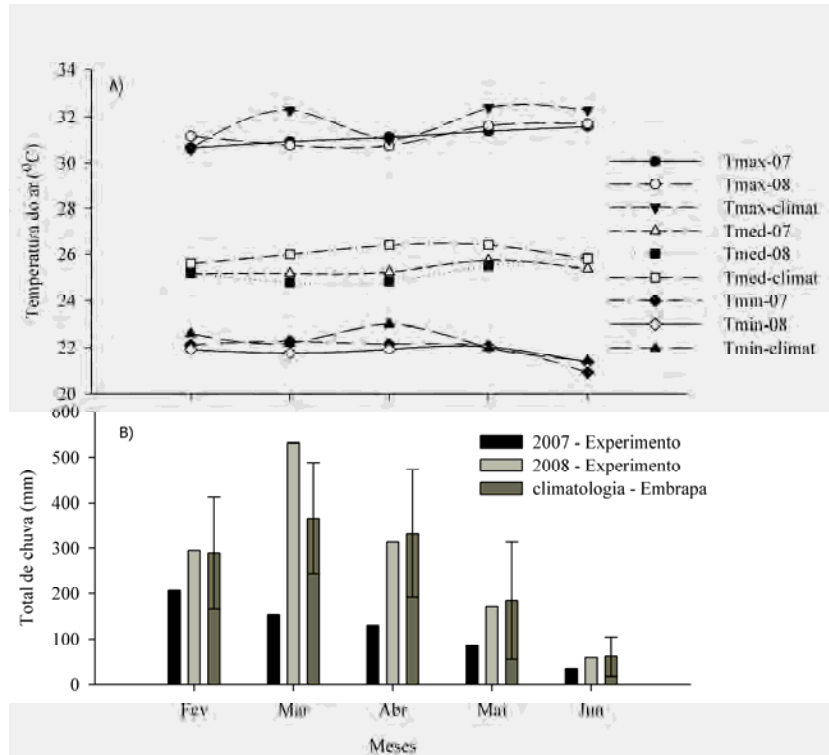
Modelos empíricos foram ajustados aos dados observados de índice de área foliar e matéria seca da parte aérea em função do tempo térmico normalizado (θ). A performance dos modelos foi avaliada através de métodos estatísticos e como critério estatístico, se usaram o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro

quadrático médio (RMSE) e o índice de concordância (d) desenvolvido por Wilmott et al. (1985).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Condições meteorológicas

As Figuras 1 e 2 apresentam as variáveis meteorológicas em ambos os experimentos com as normais climatológicas e a fração de água transpirável do solo (FATS) entre os anos, respectivamente. No experimento de 2007 a disponibilidade de chuva apresentou comportamento diferenciado, com totais mensais abaixo do regime observado em anos normais e durante 2008. Esta redução no total de chuvas pode ter sido causada por uma anomalia positiva na temperatura da superfície do oceano Pacífico observada entre outubro de 2006 e abril de 2007, indicando a ocorrência de El Niño (www.cptec.inpe.br/enos/). De acordo com Souza et al. (2000) durante eventos de El Niño ocorrem anomalias negativas no regime de chuvas na região nordeste da Amazônia, especialmente durante os meses de março e abril.



Fonte: Embrapa (1988).

Figura 1 – Condições meteorológicas durante o experimento e em condições climáticas normais \pm desvio padrão (1980-1988) – temperatura do ar (A) e chuva (B).

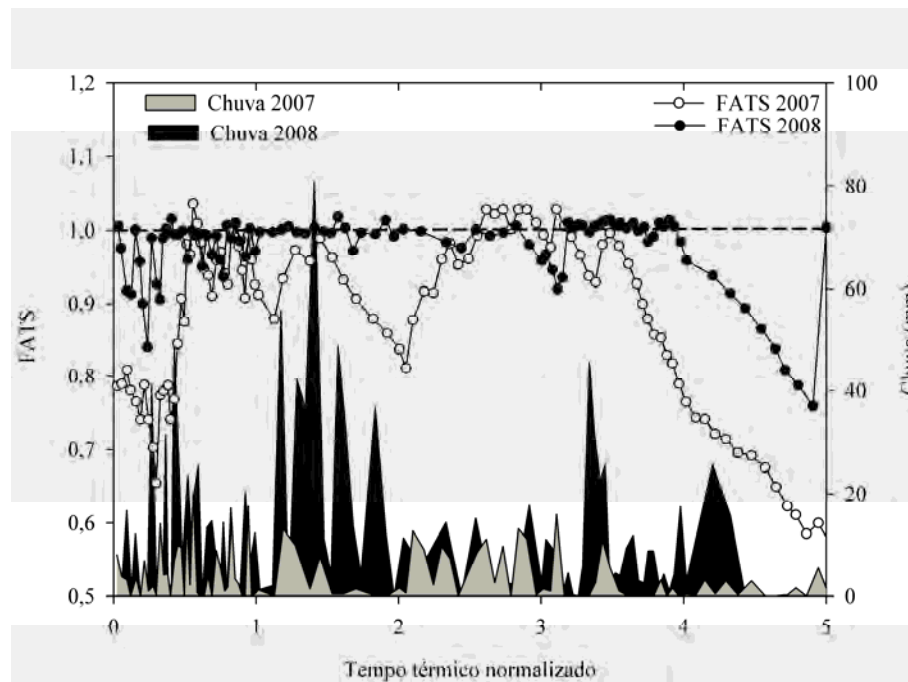


Figura 2 – Comportamento das chuvas e da fração de água transpirável do solo (FATS) durante o experimento.

A temperatura do ar foi maior em 2007 do que em 2008, mas manteve-se abaixo da normal, apresentando valor médio de 27°C e valores máximos sempre abaixo dos 34°C (Figura 1). Mesmo a temperatura do ar em 2007 tendo se mantido sempre acima da observada em 2008, os valores observados durante o experimento foram consistentes com os limites suportados pela cultura da soja. Os valores ideais de temperatura do ar para o crescimento e desenvolvimento da soja são em torno de 30°C, mostrando efeitos adversos quando exposta a temperaturas acima dos 40°C (FARIAS et al., 2007). Embora no experimento de 2007 o regime térmico tenha ficado abaixo da normal, observaram-se temperaturas médias durante a maior parte do ciclo em torno de 0,4°C acima do observado em 2008.

O experimento de 2008 pôde ser considerado um ano normal comparado com a climatologia apresentando na maioria dos meses valores dentro do desvio observado na media. Em relação a 2007. Observou-se que em 2008 o total de chuvas atingiu 531 mm em março, e 314 mm em abril, com um total de 217 mm exatamente durante a fase de início de enchimento de grãos (R5), o qual foi favorável para uma boa produtividade (Tabela 2). Em 2007, entretanto, o volume de chuvas em abril chegou apenas a 130 mm,

o que pode ter sido responsável pela diferença observada na produção de biomassa entre os anos.

Durante a fase de enchimento de grãos (R5) o total de chuva neste ano foi de 61,6 mm, resultando em uma média diária de apenas 1,86 mm o qual é muito baixo para suprir a demanda da soja durante esta fase (Tabela 2). Por outro lado, a redução observada no índice de área foliar neste experimento pode ter reduzido a taxa evapotranspiratória como estratégia de proteção da cultura (MUCHOW; SINCLAIR, 1986). A precipitação total observada para todo o ciclo ficou em torno de 1.253 mm em 2008, e 410 mm em 2007, havendo uma redução de 67% em 2007, um valor bem próximo da demanda mínima exigida no ciclo da soja (FARIAS et al., 2007).

A diminuição observada na FATS de 2007 indica a ocorrência de um déficit de água no início de abril que se manteve até o final do ciclo (Figura 2). A FATS ficou em torno de 0,7 durante a fase vegetativa e apresentou uma redução acentuada a partir da fase R5. De acordo com Sinclair e Muchow (2001), a soja sofre efeitos fisiológicos severos quando valores de FATS caem para menos de 0,35 embora em muitos casos se observe um fechamento estomático precoce mesmo em estágios iniciais do secamento do solo como estratégia da planta para conservação da água do solo.

Por outro lado, nota-se a freqüente ocorrência de FATS acima da unidade em 2008, o que mostra o constante efeito de encharcamento do solo. Para o caso da soja, o efeito do excesso de água reduz a produção de biomassa e rendimento dependendo da duração do evento e da fase em que ocorre, sendo mais prejudicial quando acontece durante a fase reprodutiva (SCOTT et al., 1989; SCHOEFFEL et al., 2001). Becanamwo e Purcell (1999) encontraram uma redução na produção de biomassa aérea da soja de até 18% quando submetida a alagamento durante a fase R1. A redução na produtividade da soja pode ser reduzida em 18% quando o excesso de água ocorrer na fase V4 e em 26% quando acontece no florescimento pleno (SCOTT et al., 1989).

Tabela 2 – Total de chuva, temperaturas diárias máximas (T_{max}), mínimas (T_{min}) e médias (T_{med}), radiação global incidente média diária (S_{in}) e fotossinteticamente ativa (PAR) em cada estágio da soja

Fases	Duração (dias)		Chuva (mm)		T_{max} (°C)		T_{min} (°C)		T_{med} (°C)		S_{in} (MJ m ⁻²)		PAR (MJ m ⁻²)	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Vegetativo	44	40	184,2	401,8	31,2	30,9	22,1	21,8	25,3	25,0	20,0	18,9	9,5	8,4
Florescimento	11	16	36,0	397,0	31,1	30,4	22,4	21,9	25,4	24,6	18,5	17,2	8,9	7,2
Frutificação	17	10	105,2	72,2	30,8	30,6	22,1	21,5	25,2	24,8	18,7	18,5	9,0	7,5
Enchimento de grãos	33	46	61,6	289,5	31,4	31,1	21,8	22,2	25,7	25,2	19,9	18,1	9,6	7,2
Maturação	14	19	23,4	92,5	31,7	31,8	20,9	21,8	25,5	25,6	19,0	18,9	9,2	7,2

Durante todo o período de crescimento da soja no campo, as condições hídricas e térmicas foram apropriadas para o desenvolvimento da cultura. Apesar da disponibilidade de água ter sido reduzida em 2007, os valores de FATS estiveram sempre acima de 0,5 indicando que a restrição de água não foi suficiente para causar sérios impactos fisiológicos na cultura (SINCLAIR; MUCHOW, 2001). A radiação solar incidente média diária esteve sempre abaixo de 20 MJ m^{-2} durante todo o ciclo, com valores médios de radiação PAR em torno de $8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, embora valores diários de 12 MJ m^{-2} tenham sido observados em alguns dias, e raramente tenham atingido valores abaixo de 6 MJ m^{-2} (Tabela 1). Tais condições podem ser consideradas como não limitantes para o crescimento da soja quando comparadas a outras regiões do Brasil.

Em 2007, o regime radiativo foi maior do que o observado em 2008, em função do menor grau de nebulosidade como sugerido pelos baixos valores de precipitação em 2007. Por outro lado, a maior nebulosidade observada em 2008 pode ter aumentado a fração de radiação difusa que atinge a superfície, contribuindo para um aumento na eficiência do uso da radiação pela soja (ANDERSON et al., 2000). Com o aumento na fração de radiação difusa, há um aumento na produção de biomassa da cultura devido a contribuição relativa das folhas que ficam sombreadas, uma vez que as mesmas apresentam maior eficiência fotossintética (SINCLAIR et al., 1992a).

3.2. Índice de área foliar (IAF)

Tanto a produção de biomassa como o índice de área foliar foram superiores durante o experimento de 2008 (Figuras 3 e 4). As condições meteorológicas durante os dois experimentos foram bastante distintas devido à ocorrência de um déficit hídrico moderado durante a maior parte do ciclo cultural de 2007.

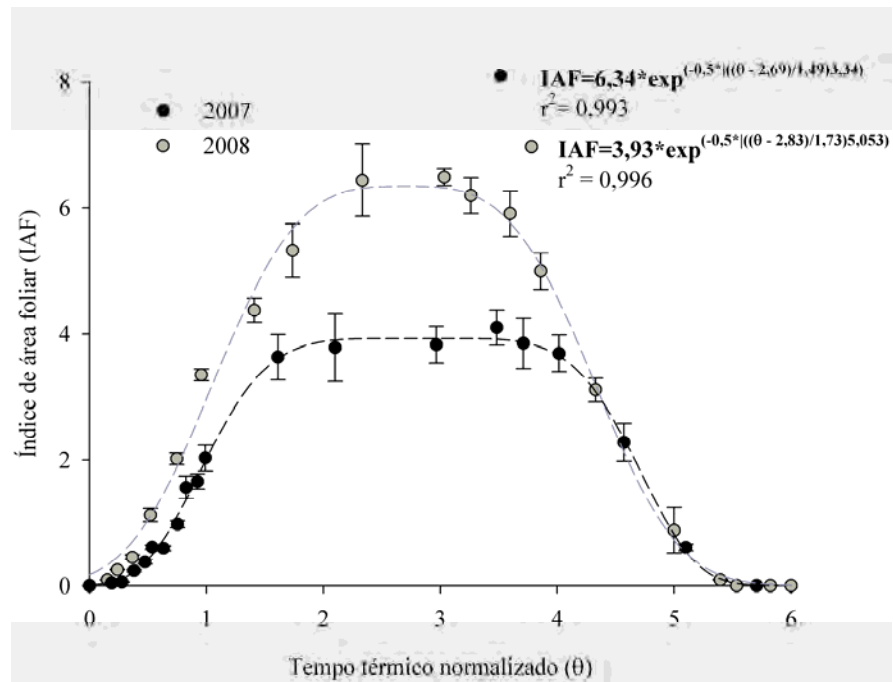


Figura 3 – Índice de área foliar durante o experimento em função do tempo térmico normalizado.

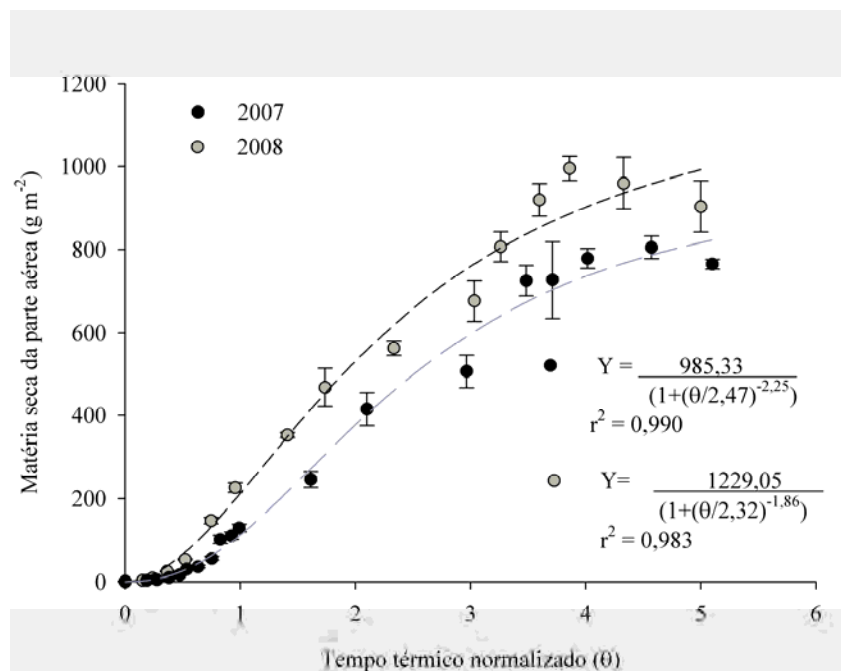


Figura 4 – Produção de matéria seca da parte aérea da soja até a maturação fisiológica (R7) em função do tempo térmico normalizado.

Antes dos 30 DAS ($\theta = 0,6$), a diferença na produção de biomassa e consequentemente na área foliar foi bem modesta, com valores de IAF em torno de $0,23 \pm 0,01$ e $0,45 \pm 0,04$ aos 18 DAS ($\approx \theta = 0,3$) em 2007 e 2008, respectivamente. Após os 50 DAS ($\theta \approx 1,6$), a soja começou a apresentar uma abrupta redução em sua produção de biomassa e área foliar, como uma provável consequência da menor disponibilidade hídrica ao qual ficou submetida durante os estágios de frutificação e início de enchimento de grãos em 2007 (Figura 3). Segundo Oya et al. (2004), o efeito do estresse hídrico tende a ser mais drástico quando ocorre durante a fase reprodutiva afetando diretamente a produtividade da soja.

O máximo IAF observado durante o experimento de 2007 foi apenas $4,1 \pm 0,28$ aos 3,5 θ (81 DAS) enquanto em 2008 tal valor foi de $6,49 \pm 0,13$ aos 3 θ (67 DAS). Embora o IAF tenha atingido seu máximo valor durante o período de enchimento de grãos, nota-se que seus valores estiveram próximos destes extremos logo após o início da frutificação ($\theta = 2,5$). Isto sugere que embora esta cultivar tenha hábito determinado de crescimento, sua produção de área foliar continua mesmo após o florescimento.

Reduções importantes no índice de área foliar da soja devido ao déficit de água foram também observados por Fontana et al. (1992) e Thomas e Costa (1994). Durante condições de secas severas ocorre uma considerável redução na condutância estomática das plantas o qual causa uma interrupção na assimilação de CO_2 , e sob tais condições as próprias reservas de água da planta podem ser consumidas podendo causar a morte da mesma (SINCLAIR, 2000). A redução no índice de área foliar observada em 2007 foi uma estratégia para reduzir a perda de água pela soja.

Um modelo empírico foi ajustado aos dados observados e a análise estatística da regressão linear dos valores observados versus simulados são mostrados na Tabela 3. O modelo empírico se ajustou muito bem aos dados observados, com coeficientes de determinação de 0,99 para ambos os anos, indicando uma ótima precisão dos valores simulados além de uma elevada exatidão (0,99 em 2007 e 0,98 em 2008) e baixos erros aditivos.

O modelo mostrou uma boa concordância com os dados observados e sugere que a função usada descreve o desenvolvimento da área foliar adequadamente em ambos os anos. Tais funções empíricas podem ser usadas para simular o IAF nesta região durante anos que apresentem condições meteorológicas similares as observadas nos dois anos, por exemplo, sob efeitos dos fenômenos de El Niño.

Tabela 3 – Estatística do desempenho do modelo empírico de índice de área foliar da soja

Ano	Parâmetros estatísticos							
	\bar{O} (m ² m ⁻²)	\bar{P} (m ² m ⁻²)	n	RMSE (m ² m ⁻²)	d	a	b	R ²
2007	1,62	1,62	21	0,09	0,999	0,008	0,996	0,996
2008	2,55	2,58	20	0,21	0,998	0,076	0,981	0,993

\bar{O} = média observada; \bar{P} = média simulada; n = número de dados.

3.3. Produção de matéria seca

Aos 25 DAS ($\theta \approx 0.5$), a soja apresentava em torno de $30,2 \pm 1,3$ g m⁻² de biomassa seca da parte aérea em 2007; e $53,3 \pm 2,1$ g m⁻² em 2008. A máxima produção de matéria seca antes da maturação fisiológica ($\theta = 5$) foi de $805 \pm 27,4$ e de $995 \pm 24,5$ g m⁻² em 2007 e 2008, respectivamente. Apesar desta diferença entre os anos, a biomassa total da parte aérea durante a colheita final ($\theta = 6$) não foi muito diferente, chegando a $691,7 \pm 30,7$ em 2007 e a $717,2 \pm 21,9$ em 2008.

A estatística da análise de regressão entre os valores observados e simulados de produção de biomassa encontram-se na Tabela 4. Apesar da função encontrada para 2008 apresentar um erro maior (RMSE = 48) comparado ao de 2007, os demais parâmetros mostram que o modelo empírico conseguiu simular muito bem a matéria seca. Mesmo com erros aditivos de 3,4 e 9,6 em 2007 e 2008 respectivamente, ambas as funções empíricas reproduziram precisamente a produção de biomassa da soja sob as condições ambientais da região Amazônica.

Tabela 4 – Estatística do desempenho do modelo empírico para a produção de biomassa da soja

Ano	Parâmetros estatísticos							
	\bar{O} (g m ⁻²)	\bar{P} (g m ⁻²)	n	RMSE (g m ⁻²)	d	a	b	R ²
2007	293,28	294,21	19	24,63	0,998	3,43	0,991	0,994
2008	447,27	445,20	16	48,53	0,996	9,64	0,980	0,973

\bar{O} = Média observada; \bar{P} = Média simulada; n = número de dados.

3.4. Crescimento do grão e produtividade da soja

O rendimento da soja apresenta forte dependência da taxa de acúmulo de matéria seca nos grãos e da duração do período de enchimento de grãos, os quais são funções do genótipo usado, da temperatura, do fotoperíodo e da deficiência hídrica (COSTA et al., 1991). O crescimento dos grãos descreveu uma função linear do tempo como observado por outros pesquisadores (SPAETH; SINCLAIR, 1983; SALADONAVARRO et al., 1985). Embora tenham sido encontradas diferenças no IAF e na produção de biomassa, o crescimento dos grãos não foi severamente afetado pelas condições meteorológicas observadas, apresentando rendimento final de 3,4 t ha⁻¹ em 2007 e de 3,7 t ha⁻¹, como ilustrado na Figura 5. Durante a maior parte do ciclo da soja, a biomassa dos grãos em ambos os anos apresentou comportamento semelhante, cujos valores estiveram dentro do intervalo de erro padrão.

O efeito do déficit de água tende a ser mais crítico para o rendimento da soja quando o mesmo ocorre durante o estágio reprodutivo, principalmente na fase de enchimento de grãos (DOSS et al., 1974; SIONIT; KRAMER, 1977). Resultados de Brown et al. (1985) mostraram que o déficit hídrico causou uma redução de 21 e 44% na produtividade da soja, quando este ocorreu durante as fases R2 e R4, respectivamente. Thomas e Costa (1994) encontraram uma redução de 52% no rendimento da soja no Rio Grande do Sul em consequência do déficit hídrico.

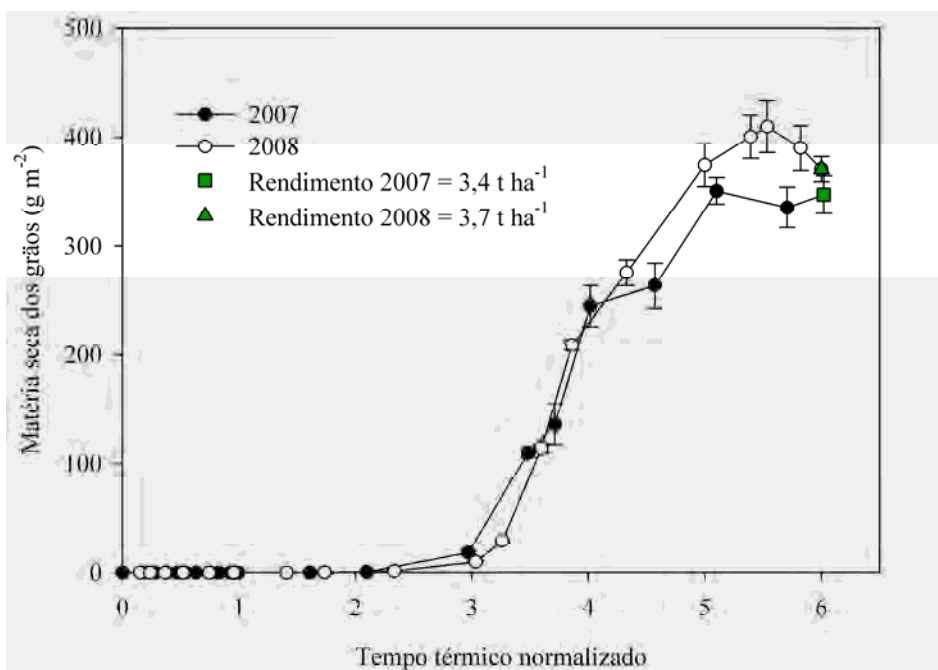


Figura 5 – Crescimento do grão de soja durante o experimento em função do tempo térmico normalizado.

Como discutido anteriormente, a redução encontrada na FATS de 2007 indicou a ocorrência de um déficit hídrico neste ano, o qual pode ter sido o principal responsável pelas diferenças encontradas no IAF e na produção de matéria seca. Apesar destas diferenças, o valor crítico de FATS comumente estabelecido para causar problemas fisiológicos em algumas culturas nunca foi atingido.

A despeito da considerável redução no IAF entre os dois experimentos, o coeficiente de extinção encontrado para a soja foi praticamente o mesmo (SOUZA et al., 2009b). Embora o máximo IAF obtido em 2008 tenha sido igual a 6,5 o valor crítico para 95% de interceptação da radiação ficou em torno de 4. Em 2007, o máximo valor de IAF encontrado foi de 4,1, mas de forma análoga ao ano de 2008, o IAF crítico para 95% de interceptação ficou em torno de 3,8. Este fato pode indicar que mesmo com reduzido IAF, a soja permaneceu interceptando radiação e fotossintetizando durante o ciclo de 2007 de forma análoga ao ocorrido em 2008, embora não tenha sido possível comprovar tal fato pela ausência de dados de fotossíntese.

Sinclair e De Wit (1976) sugeriram a teoria da autodestruição da soja uma vez que grande quantidade de nitrogênio e biomassa são translocados do material vegetativo

para os grãos para que seja suprido o crescimento dos mesmos durante o estágio reprodutivo. Os resultados encontrados sugerem que apesar das diferenças observadas no crescimento da soja devido à restrição hídrica decorrente do fenômeno El Niño, a produção de biomassa observada em ambos os anos foi suficiente para manter a taxa de crescimento dos grãos em níveis potenciais além de suprir a demanda de nitrogênio das sementes. Confalone e Dujmovich (1999) encontraram que o rendimento final dos grãos da soja não é afetado quando o estresse hídrico ocorre no início do período reprodutivo, entre R1 e R4, devido haver compensação na partição de assimilados.

O rendimento final em ambos os anos foi similar, corroborando esta hipótese. O peso médio de 100 grãos na colheita foi igual a $13,89 \pm 0,23$ g em 2007 e $14,41 \pm 0,21$ g em 2008, e apesar de não se ter medido o número de vagens por planta, o fato da fase de frutificação ter durado sete dias a mais em 2007 (ver Tabela 2) pode ter contribuído para uma maior produção do número de vagens, contribuindo para esta pequena diferença entre os anos. Apesar da duração do período de enchimento de grão ter sido maior em 2008 (33 dias em 2007 e 46 dias em 2008), alguns resultados têm mostrado que na ausência de déficit hídrico a taxa de acúmulo de matéria seca nos grãos é mais importante na determinação do rendimento do que o próprio tempo em que ocorre este acúmulo (COSTA et al., 1991). Isto ocorre devido à duração potencial do período de enchimento de grãos não ser afetada sob tais condições, havendo uma preponderância do acúmulo de assimilados nos grãos na maximização da produtividade.

Outro fato importante está relacionado ao efeito do alagamento do solo ($FATS > 1$) na fixação biológica de nitrogênio pela soja (BECANAMWO; PURCELL, 1999). Sob tais condições a quantidade de nitrogênio absorvida diariamente pela fixação biológica ocorre em uma taxa menor, fato este pouco freqüente no ano de 2007. De acordo com Becanamwo e Purcell (1999) a fixação de nitrogênio é mais sensível ao efeito do alagamento do solo do que a produção de biomassa, com uma diminuição mais rápida e pronunciada no primeiro processo do que no segundo.

Logo, pode-se inferir que embora tenha havido uma redução considerável na produção de biomassa e área foliar em decorrência do déficit de água em 2007, a menor freqüência de alagamentos neste ano pode ter mantido a taxa de fixação simbiótica em níveis adequados para a demanda dos grãos. Um dos primeiros trabalhos sobre efeito do alagamento no rendimento da soja no Brasil indica a fase de florescimento como sendo o período mais crítico para a ocorrência deste fenômeno pelo fato de reduzir

consideravelmente o número de flores e vagens jovens na soja (BARNI; COSTA, 1975).

4. CONCLUSÕES

A presença de um moderado estresse hídrico associado ao El-Niño ocorrido no experimento de 2007 ocasionou uma redução considerável no índice de área foliar (IAF) e na produção de matéria seca da parte aérea comparado com 2008 (considerado climatologicamente normal).

O máximo IAF alcançado no experimento de 2007 foi de 4,1 enquanto que em 2008 o IAF máximo foi de 6,5, ambos ocorrendo após o início da frutificação. A máxima produção de biomassa antes da senescência foi de 995 e 805 g m⁻² em 2007 e 2008, respectivamente.

Modelos empíricos ajustados as curvas de IAF e matéria seca conseguiram reproduzir satisfatoriamente os dados observados, podendo ser utilizados na simulação destes parâmetros da soja sob condições semelhantes ao deste estudo.

Apesar das diferenças encontradas no IAF e biomassa entre os anos, o rendimento final não foi muito diferente, o qual pode ter ocorrido devido a produção de biomassa e fixação de nitrogênio em 2007 terem sido suficientes para suprir a demanda dos grãos.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento da pesquisa através do projeto CTHIDRO. O primeiro autor também agradece à CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

6. REFERÊNCIAS

ALBERTO, C. M.; STRECK, N. A.; HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; MEDEIROS, S. L. P. Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 7, p. 1067-1075, 2006.

ANDERSON, M. C.; NORMAN, J. M.; MEYERS, T. P.; DIAK, G. R. An analytical model for estimating canopy transpiration and carbon assimilation fluxes based on canopy light-use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 101, p. 265-289, 2000.

ANDERSON, L. O.; ROJAS, E. H. M.; SHIMABUKURO, Y. E. Avanço da soja sobre os ecossistemas cerrado e floresta no Estado do Mato Grosso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 19-25.

BARNI, N. A.; COSTA, J. A. Efeitos de períodos de inundação do solo sobre o rendimento de grãos de soja. **Agronomia Sulriogradense**, v. 11, p. 207-222, 1975.

BECANAMWO, M.; PURCELL, L. C. Soybean dry matter and N accumulation responses to flooding stress, N sources and hypoxia. **Journal of Experimental Botany**, v. 50, n. 334, p. 689-696, 1999.

BENINCASA, M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. Jaboticabal: Funep, 2003. 41 p

BROWN, E. A.; CAVINESS, C. E.; BROWN, D. A. Response of selected soybean cultivars to soil moisture deficit. **Agron. J.**, v. 77, p. 274-278, 1985.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos-safra 2008/2009**. Brasília, 2009. 39 p.

CONFALONE, A.; DUJMOVICH, M.N. Influência do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, p. 183-187, 1999.

COSTA, J. A.; TEIXEIRA, M. C. C.; MARCHEZAN, E. Taxa e duração do acúmulo de matéria seca nos grãos de soja e sua relação com o rendimento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, p.1577-1582, 1991.

COSTA, M. H.; YANAGY, S. M. N; PONTE DE SOUZA, P. J. O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 34, 2007.

COSTA, L. C.; JUSTINO, F.; OLIVEIRA, L. J.; SEDIYAMA, G. C.; FERREIRA, W. P. M.; LEMOS, C. F. Potential forcing of CO₂, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. **Environmental Research Letter**, v. 4, 2009.

DOSS, B. D.; PEARSON, R.W.; ROGERS, H. T. Effect of soil water stress at various growth stages on soybean yield. **Agron. J.**, v. 66, p. 297-299, 1974.

EL-HUSNY, J. Desempenho da soja na safra de 2006/2007. In: REUNIÃO DE PESQUISA DA SOJA DA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL, 29, 2007, Campo Grande. **Relatório técnico...** Campo Grande, 2007.

EL-HUSNY, J. C.; ANDRADE, E. B.; SOUZA, F. R. S.; FILHO, A. S.; KEPLER, D.; ALMEIDA, L. A.; MEYER, M. C. **Recomendação de cultivares de soja para microrregião de Paragominas, Pará.** Belém: Embrapa-CPATU, 2003a. 6 p. (Comunicado técnico, 82).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido. Laboratório de Climatologia. **Normais climatológicas de Paragominas no período de 1980 a 1988.** Belém, 1988.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja:** região Central do Brasil. Brasília, 2008. 282 p. (Sistemas de produção, 12).

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja.** Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular técnica, 48).

FEARNSIDE, P. M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, v. 28, n. 1, p. 23-28, 2001.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development.** Ames: Iowa State University, 1977. (Special Report, 80).

FERREIRA, M. E.; ABREU, J. P. M.; BIANCO, V. V.; MONTEIRO, A. Predicting phasic development of green beans for processing using a model with high temperature reduction of thermal time accumulation. **Scientia Horticulturae**, v. 69, p. 123-133, 1997.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Alterações micrometeorológicas na cultura da soja submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 27, n. 5, p. 661-669, 1992.

HOMMA, A. K. O. Política agrícola ou ambiental para a prese(conse)rvação da Amazônia? **Revista de Política Agrícola**, v. 5, n. 4, p. 16-23, 1996.

IGREJA, A. C. M.; PACKER, M. F.; ROCHA, M. B. **A evolução da soja no Estado de Goiás e seu impacto na composição agrícola.** São Paulo: Instituto de Economia Agrícola, 1988. 20 p.

JENDIROBA, E.; CÂMARA, G. M. S. Rendimento agrícola da cultura da soja sob diferentes fontes de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n. 8, p. 1201-1209, 1994.

MIRAGAYA, J. Demanda mundial de carne bovina tem provocado o desmatamento na Amazônia. **T&C Amazônia**, ano 6, n. 14, jun. 2008.

MUCHOW, R. C.; SINCLAIR, T. R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. II. Field and model analyses. **Field Crop. Res.**, v. 15, p. 143-156, 1986.

MUELLER, C. C.; BUSTAMANTE, M. **Análise da expansão agrícola no Brasil**. Disponível em: <www.worldbank.org/rfpp/news/debates/mueller.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2006.

OYA, T.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; TOBITA, S.; ITO, O. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars: evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivars in the field. **Plant Produc. Sci.**, v. 7, n. 2, p. 129-137, 2004.

PENNING DE VRIES, F. W. T.; TIMSINA, J.; ALAGOS, M. J. C.; VELASCO, L.; PANDEY, R. K. Opportunities for soya beans after rice in the Philippines: an exploration by simulation. 1992. (CABO-DLO, Simulation Report, 25).

RAMBO, L.; COSTA, J. A.; PIRES, J. L. F.; PARCIANELLO, G.; FERREIRA, F. G. Rendimentos de grãos da soja em função do arranjo de plantas. **Ciência Rural**, v. 33, n. 3, p. 405-411, 2003.

SALADO-NAVARRO, L. R.; HINSON, K.; SINCLAIR, T. R. Nitrogen partitioning and dry matter allocation in soybeans with different seed protein concentration. **Crop Sci.**, v. 25, p. 451-455, 1985.

SCHNEIDER, R. R.; ARIMA, E.; VERISSIMO, A.; BARRETO, P.; SOUZA JUNIOR, C. **Amazônia sustentável: limitantes e oportunidades para o desenvolvimento rural**. Brasília: Banco Mundial; Belém: Imazon, 2000. (Série Parcelas, 1).

SCHOFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. Contribuição relativa da temperatura do ar no desenvolvimento de três cultivares de soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 2, p. 97-104, 2002.

SCHOFFEL, E. R.; SACCOL, A. V.; MANFRON, P. A.; MEDEIROS, S. L. P. Excesso hídrico sobre os componentes de rendimento da cultura da soja. **Ciência Rural**, v. 32, n. 1, p. 7-72, 2001.

SCOTT, H. D.; DEANGULO, J.; DANIELS, M. B. et al. Flood duration effects on soybean growth and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 631-636, 1989.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA – SAGRI. **Evolução da produção no estado do Pará por município de 1994 a 2008**. Disponível em: <www.sagri.pa.gov.br>. Acesso em: 12 maio 2009.

- SIMON, M. F.; GARAGORRY, F. L. The expansion of agriculture in the Brazilian Amazon. **Environmental Conservation**, v. 32, n. 3, p. 203-212, 2005.
- SINCLAIR, T. R. Model analysis of plant traits leading to prolonged crop survival during severe drought. **Field Crops Research**, v. 68, p. 211-217, 2000.
- SINCLAIR, T. R.; DE WIT, C. T. Analysis of the carbon and nitrogen limitations to soybean yield. **Agronomy Journal**, v. 68, p. 320-325, 1976.
- SINCLAIR, T. R.; MUCHOW, R. C. System analysis of plant traits to increasing grain yield on limited water supply. **Agronomy Journal**, v. 93, p. 263-270, 2001.
- SINCLAIR, T. R.; SHIRAIWA, T.; HAMMER, G. L. Variation in crop radiation-use efficiency with increased diffuse radiation. **Crop Sci.**, v. 32, p. 1281-1284, 1992a.
- SINCLAIR, T. R.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L. Comparison of vegetative development in soybean cultivars for low-latitude environments.. **Field Crops Research**, v. 92, p. 53-59, 2005.
- SIONIT, N.; KRAMER, P. J. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. **Agronomy Journal**, v. 69, p. 174-178, 1977.
- SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; TOTA, J.; PEZZI, L.; FISCH, G.; NOBRE, C. On the influence of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. **Acta Amazônica**, v. 30, n. 2, p. 305-318, 2000.
- SOUZA, P. J. O. P.; ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, A.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C. Impactos no albedo em consequência do avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, n. 1, p. 87-95, 2008a.
- SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P.; FARIAS, J. R. B.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. C.; SAMPAIO, L. Radiation use efficiency of soybean in the Amazon region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2009b (no prelo).
- SPAETH, S. C.; SINCLAIR, T. R. Linear increase in soybean harvest index during seed-filling. **Agronomy Journal**, v. 77, p. 207-211, 1983.
- THOMAS, A. L.; COSTA, J. A. Influencia do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, p. 1389-1396, 1994.
- TOURINO, M. C. C.; REZENDE, P. M.; SALVADOR, N. Espaçamento, densidade e uniformidade de semeadura na produtividade e características agrônômicas da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 8, p. 1071-1077, 2002.

VERA-DIAZ, M. C.; KAUFMANN, R. K.; NEPSTAD, D. C.; SCHLESINGER, P. An interdisciplinary model of soybean yield in the Amazon Basin: the climatic, edaphic, and economic determinants. **Ecological Economics**, v. 65, p. 420-431, 2008.

VIEIRA, C. R.; CABRAL, L. C.; DE PAULA, A. C. O. Composição centesimal e conteúdo de aminoácidos, ácidos graxos e minerais de seis cultivares de soja destinada à alimentação humana. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 1277-1283, 1999.

WILMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

CAPÍTULO 2

DESENVOLVIMENTO E EXIGÊNCIA TÉRMICA DA SOJA

1. INTRODUÇÃO

A temperatura é um elemento meteorológico diretamente relacionado à adaptação, desenvolvimento e a produção eficiente da cultura. Para todas as plantas, observa-se uma tolerância para uma temperatura mínima e máxima, passando por um valor ótimo. A estes limites denominamos temperatura mínima ou basal inferior, máxima ou basal superior, e temperatura ótima na qual o desenvolvimento é o melhor possível (BONHOMME, 2000). A teoria de graus-dia (ou tempo térmico) expressa a quantidade de calor, a qual a planta é submetida, acumulado durante o dia, ou o acúmulo diário de energia que se situa entre os limites suportados pela planta (OMETTO, 1986).

As taxas da maioria dos processos biológicos são acentuadamente afetadas pela temperatura, embora se saiba que o crescimento e o desenvolvimento das plantas sejam afetados por outros fatores como duração da luminosidade, disponibilidade de água e nutrientes (RUSSELE et al., 1984; DESCLAUX; ROUMET, 1996). Os erros associados aos processos de aproximação usados nas estimativas da taxa de desenvolvimento e na obtenção dos limites basais da planta, assim como a própria disponibilidade de dados também influenciam na capacidade preditiva desta teoria (HIGLEY et al., 1986; BONHOMME, 2000).

Apesar das limitações do fator térmico, muitos trabalhos justificam que a temperatura é a variável que melhor explica estatisticamente a duração fenológica das plantas (KISH et al., 1972; LALLUKKA et al., 1978; MASSIGNAM; ANGELOCCI, 1993; YANG et al., 1995). Além disso, alguns trabalhos têm sido realizados com o intuito de se incluir o efeito combinado de alguns elementos meteorológicos a fim de se tentar reduzir tais erros (VILLA NOVA et al., 1983; LEMOS FILHO et al., 1997).

De acordo com Sentelhas et al. (1994), assume-se nesta teoria que o desenvolvimento vegetal é influenciado tanto pelas temperaturas diurnas como pelas noturnas, e somente em casos de extremo ou prolongado estresse hídrico é que tais dados perdem sua confiabilidade. Devido a isso alguns trabalhos têm considerado modificações nesta teoria para incluir o efeito da restrição hídrica no desenvolvimento da planta (MASSIGNAM; ANGELOCCI, 1993).

A teoria de graus-dia deve ser estendida para outros fatores limitantes, como foi feito por Kish e Ogle (1980) que após considerar o teor de água no solo neste modelo, levou a uma estimativa mais precisa da data de colheita para o feijão. Lemos Filho et al. (1997) incluíram o efeito da duração do dia no cálculo do graus-dia e obtiveram elevados valores de R^2 para a cultura estudada.

Entretanto, o desenvolvimento de novas variedades menos sensíveis a elevadas temperaturas e principalmente ao fotoperíodo, tornou possível a expansão de algumas culturas para regiões de baixa latitude como foi o caso da soja na região Amazônica, mesmo com os altos valores de chuva, temperatura e luminosidade frequentes na região (SINCLAIR et al., 2005). Porém, na ausência de estresses hídricos severos, a temperatura do ar é reconhecidamente a principal variável reguladora do desenvolvimento de plantas insensíveis ao fotoperíodo (FERREIRA et al., 1997).

Os valores ideais de temperatura do ar para o crescimento e desenvolvimento da soja são em torno de 30°C, mostrando efeitos adversos quando exposta a temperaturas acima dos 40°C (FARIAS et al., 2007). Alguns trabalhos apresentam valores de temperatura base para soja no Brasil de 10°C (FARIAS et al., 2007), 11°C (SINCLAIR et al., 2005) e 14°C (CAMARGO et al., 1987).

Esta variação ocorre, pois ao se obter a temperatura base por linearização da regressão entre temperatura e taxa de desenvolvimento, o seu valor dependerá do range da curva em que é obtido (BONHOMME, 2000). Fisiologicamente, a temperatura base deveria ser a mesma para qualquer fase da planta, mas na prática observam-se diferentes

valores para diferentes fases e diferentes condições climáticas, pelo fato de sua determinação ser feita na maioria das vezes estatisticamente (YANG et al., 1995).

Devido às plantas se desenvolverem linearmente correlacionadas com a temperatura (BRUNINI et al., 1976), sob condições climáticas adversas com ocorrência de elevadas temperaturas, por exemplo, sua taxa de desenvolvimento frequentemente encontra-se no lado decrescente da relação, acima da temperatura ótima (FERREIRA et al., 1997). Pearson et al. (1994) sugerem o uso da temperatura efetiva para a obtenção do tempo térmico nestes casos uma vez que a temperatura diária (ou horária) oscila entre condições sub-ótimas e super-ótimas, sendo necessário considerar o efeito redutivo das elevadas temperaturas na taxa de desenvolvimento da cultura.

Algumas funções são usadas para descrever o efeito redutivo de elevadas temperaturas no desenvolvimento de plantas, como o modelo de dente de serra (GARCIA-HUIDOBRO et al., 1982), o método dos triângulos (OMETTO, 1986; SNYDER et al., 1999) e modelos não-lineares ou curvilíneos (YIN et al., 1995).

Embora esta teoria represente um modelo empírico baseado numa relação linear entre a temperatura e o desenvolvimento da cultura, sua utilização tem sido bastante difundida e aceita pela comunidade científica (SETIYONO et al., 2007). Modelos de crescimento e rendimento de culturas precisam simular fielmente o desenvolvimento da planta, uma vez que muitos processos envolvidos ocorrem em função das fases fenológicas (STRECK et al., 2009).

Para o caso da soja submetida às condições climáticas da Amazônia, o conhecimento de seu comportamento fenológico e de sua exigência térmica serve como uma excelente ferramenta de auxílio ao agricultor no manejo da cultura, principalmente na definição da data de semeadura uma vez que por coincidir com o início do período chuvoso, acaba tendo sua colheita ainda dentro da estação úmida em função do regime de chuvas existente na região. O objetivo deste estudo foi determinar a exigência térmica e analisar o desenvolvimento fenológico da soja exposta às condições térmicas super-ótimas da Amazônia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Experimento de campo

O experimento foi realizado na região nordeste do estado do Pará, a cerca de 320 km da cidade de Belém. O campo experimental ficou localizado em uma área com 200 ha de plantio de soja (latitude 2°59'08"S, longitude 47°19'57"W, altitude 122 m). O solo da região é classificado como latossolo amarelo argiloso de textura variando de franco-arenosa a muito argilosa (71% de argila) com conteúdo volumétrico de água de 0,43 m⁻³m⁻³ na capacidade de campo e de 0,19 m⁻³m⁻³ no ponto de murcha.

O solo foi convencionalmente preparado durante a estação chuvosa e posteriormente foi semeado mecanicamente com a cultivar BRS Tracajá (maturidade intermediária e hábito determinado) a qual é a cultivar mais recomendada para esta região (EL-HUSNY et al., 2003a). A população de plantas foi de 200.000 plantas ha⁻¹ a um espaçamento entre linhas de 0,50 m.

Antes da semeadura, as sementes foram preparadas adequadamente com inoculante (*rhizobium*), fungicida e inseticida. As datas de semeadura e colheita dos ensaios utilizados encontram-se na Tabela 1. A semeadura foi realizada a uma taxa de 26-28 sementes m⁻². Durante a semeadura realizou-se fertilização do solo com 2-20-18 de N, P e K a 350 kg ha⁻¹ de fertilizante químico. Em todos os experimentos, herbicidas e pesticidas foram utilizados quando necessário.

Tabela 1 – Manejo cultural da soja durante o experimento

Identificação	Semeadura	Colheita	População média (plantas.m ⁻²)
2007 ^a	18/01/07	25/05/07	22,4
2007 ^b	23/01/07	26/05/07	22,4
2007 ^c	02/02/07	29/05/07	22,4
2007 ^d	20/02/07	13/06/07	22,4
2007 ^e	23/02/07	21/06/07	22,4
2008	07/02/08	06/06/08	22,4

2.2. Medidas meteorológicas

Uma torre micrometeorológica de 3 metros de altura foi instalada no centro da área experimental, na qual foram instalados instrumentos meteorológicos conforme ilustrado na Tabela 2. Os sensores foram conectados a um datalogger CR10X (Campbell Scientific, Inc.) e a um multiplexador AM416 (Campbell Scientific, Inc.). As medidas dos dados durante o experimento foram realizadas a cada 10 segundos, fornecendo totais e médias a cada 10 minutos.

Tabela 2 – Lista de instrumentos, alturas e medições da estação meteorológica automática instalada no experimento da soja

Variável meteorológica	Instrumento usado, fabricante (modelo)	Alturas
Temperatura do ar	Vaisala thermohygrometer (HMP35A), PT100 resistors	0,5; 1; 2 (m)
Umidade relativa do ar	Vaisala thermohygrometer (HMP35A)	0,5; 1; 2 (m)
Chuva	Rain gauge TB4	3,9 (m)

2.3. Desenvolvimento fenológico

O desenvolvimento fenológico foi avaliado diariamente usando a escala descrita por Fehr e Caviness (1977). Utilizou-se um delineamento inteiramente casualizado com três repetições para cada tratamento (Tabela 1). Cada repetição consistiu de linhas de 2 metros de comprimento, contendo em média 20 plantas, as quais foram monitoradas continuamente a partir da emergência conforme Tabela 1A e Figura 1B apresentadas nos Apêndices A e B, respectivamente. Definiu-se como o início de um determinado estágio fenológico, o instante em que 50% das plantas + 1 ou mais plantas da linha atingiram a fase em questão.

Após o estágio vegetativo V10, decidiu-se por avaliar apenas o início do florescimento em diante, em virtude da maioria das parcelas observadas apresentar uma

variação muito grande nas fases dentro de uma mesma linha dificultando o acompanhamento do desenvolvimento da cultura.

2.4. Graus-dia efetivo

O tempo térmico foi calculado usando o modelo de “*dente de serra*” de acordo com FERREIRA et al., (1997), que considera o efeito redutivo de altas temperaturas. A temperatura efetiva pode ser obtida por meio de uma função redutiva da taxa máxima de desenvolvimento que se obtém à temperatura ótima para o desenvolvimento. Assim, no intervalo compreendido entre a temperatura ótima e a temperatura basal inferior e superior a taxa de desenvolvimento é reduzida, tornando-se nula para casos em que se observe temperatura do ar fora dos limites suportados pela cultura:

$$T_e = T_b + f(T)(T_o - T_b) \quad (1)$$

$$f(T) = \begin{cases} \frac{T_{ar} - T_b}{T_o - T_b} & T_b \leq T_{ar} \leq T_o \\ \frac{T_B - T_{ar}}{T_B - T_o} & T_o \leq T_{ar} \leq T_B \\ 0 & \text{Outros casos} \end{cases} \quad (2)$$

em que, T_e é a temperatura efetiva, T_b é a temperatura base inferior, T_o é a temperatura ótima, T_B é a temperatura base superior e T_{ar} a temperatura média do ar.

As temperaturas cardinais foram estimadas através na minimização do coeficiente de variação da diferença entre a data da ocorrência do florescimento realmente observada e a simulada para cada valor adotado de temperatura (YANG et al., 1995). Para isso utilizou-se informações de ocorrência de eventos (Emergência-Florescimento) e dados de temperatura do ar e através de uma rotina do Excel com a ferramenta “*solver*”, buscou-se minimizar o coeficiente de variação por meio de processo interativo que considera o efeito redutivo da temperatura do ar (MELLO-ABREU, comunicação pessoal).

Logo, o tempo térmico acumulado (τ_T) na escala diária foi calculado por meio da equação abaixo:

$$\tau_T = \sum_{i=1}^n (T_e - T_b) \quad (3)$$

A temperatura média do ar utilizada na equação 2 foi obtida através da temperatura máxima e mínima do dia por se considerar que os extremos diários são uma aproximação da tendência da temperatura diurna (SNYDER et al., 1999), descrevendo desta forma a amplitude térmica ao qual a planta foi submetida ao longo do dia. Alguns trabalhos adotam o efeito da tendência diurna da temperatura, simulada em função dos extremos, no cálculo do tempo térmico (CESARACCIO et al., 2001), entretanto não há ganho significativo no uso de dados horários principalmente em regiões em que o ciclo da cultura ocorre na estação quente (PURCELL, 2003). A correção de fotoperíodo não foi considerada pelo fato da cultivar usada ser adaptada a região norte do Brasil (SINCLAIR et al., 2005).

Os critérios estatísticos para análise da simulação do desenvolvimento da soja em função da teoria de graus-dia foram o coeficiente de determinação (R^2), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o índice de concordância desenvolvido por Wilmott (1985).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Temperaturas cardinais

A Figura 1 apresenta a determinação da temperatura base em função do menor coeficiente de variação entre a data observada e simulada do período emergência-florescimento (Em-Flor). O valor da temperatura base obtido para a soja foi de 4,9°C. Baseado no mesmo procedimento, a temperatura ótima e basal superior foram 23,3°C e 30,9°C respectivamente. O valor adotado para o cálculo do tempo térmico efetivo foi de 5°C, valor acima do normalmente considerado em trabalhos com soja realizados no sul e sudeste do Brasil (CAMARGO et al., 1987; SCHOFFEL; VOLPE, 2002).

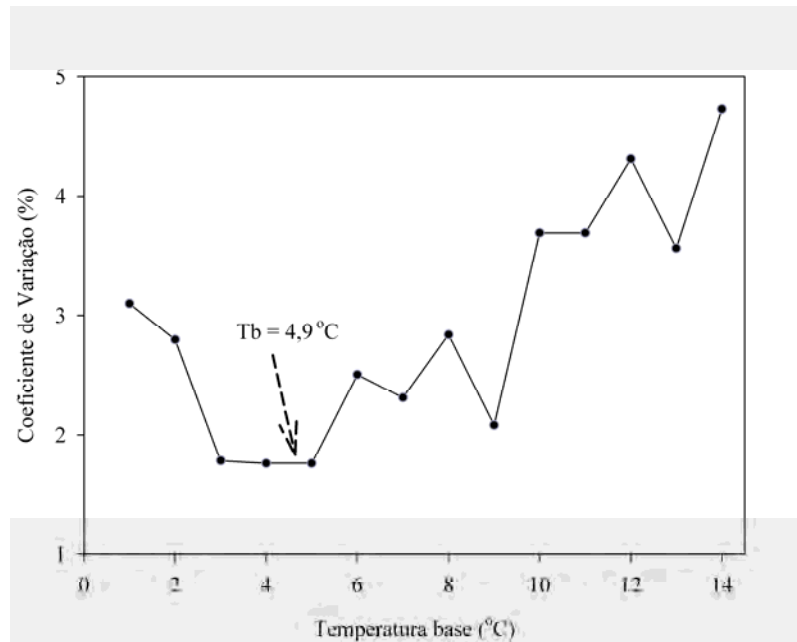


Figura 1 – Determinação da temperatura base da soja na Amazônia em função do menor coeficiente de variação entre a data de florescimento observada e simulada.

O uso de diferentes métodos associado a dados inconsistentes de fenologia levam a diferentes estimativas da temperatura base, devido à mesma ser definida através de critérios estatísticos ao invés de fisiológico (YANG et al., 1995). Olhando pelo lado biológico algumas enzimas desempenham papel importante no desenvolvimento da plantas, e no caso de plantas C3 como a soja, a enzima rubisco apresenta elevada eficiência mesmo em baixas temperaturas (BONHOMME, 2000). Isto sugere que o uso deste valor como temperatura base (5°C) para o acúmulo de graus-dia pela soja apresenta um significado fisiologicamente coerente.

Por outro lado, os valores das temperaturas base adotadas aqui são similares aos valores encontrados em outros trabalhos realizados com variedade de soja de ciclo curto (COBER et al., 2001), com soja de diferentes grupos de maturação (SETIYONO et al., 2007) e outras leguminosas (FERREIRA et al., 1997). Ressalta-se que a temperatura base da forma como normalmente é obtida representa apenas um valor estatístico, sendo muitas das vezes bem diferente da temperatura fisiológica na qual o desenvolvimento é nulo (BONHOMME, 2000).

3.2. Exigência térmica

O tempo térmico necessário para o florescimento da soja na Amazônia variou entre 388 e 455 °C d⁻¹ (Tabela 3). Para a colheita, a soja apresentou exigência térmica entre 1185 e 1227 °C d⁻¹. Schoffel e Volpe (2002) obtiveram para diferentes cultivares de soja e diferentes épocas de semeadura em Jaboticabal, exigências variando entre 1210 e 1598 desde a semeadura até a maturação fisiológica (R7). A diferença encontrada surge pelo fato dos autores trabalharem com cultivares de ciclo mais longo (112 a 148 dias) e considerarem o período pré-emergência até a maturação. Embora a temperatura média observada por Schoffel e Volpe (2002) nos diferentes subperíodos tenha variado entre 23,6 e 25,3°C ocorreram máximos de até 32,9°C indicando a necessidade de se usar a temperatura efetiva no cálculo dos graus-dia.

Tabela 3 – Graus-dia acumulado pela soja em cada tratamento para os períodos emergência-florescimento e emergência-colheita

Fases	Tempo térmico acumulado (°C dia ⁻¹)	
	(Emergência - Florescimento)	(Emergência - Colheita)
2007a	411,99(±17,29)	1185,76(±0,75)
2007b	422,14(±6,19)	1210,04(±3,11)
2007c	455,69(±0,004)	1194,72(±3,09)
2007d	403,04(±3,44)	1188,30(±3,37)
2007e	413,01(±3,31)	1193,89(±3,16)
2008a	388,80(±6,35)	1227,65(±0)

Resultados obtidos por Pereira (2002) sob diferentes condições de disponibilidade hídrica mostram que a soja completou o seu ciclo exigindo entre 1455 e 1600 graus-dia, com menor exigência quando submetido a estresse hídrico em ambos subperíodos, vegetativo e reprodutivo. Ressalta-se, porém que sob condições de estresse hídrico a teoria de graus-dia acumulados precisa ser modificada para se adequar a tais situações (KISH; OGLE, 1980; MASSIGNAM; ANGELOCCI, 1993), detalhe não considerado pelo autor.

Ao desconsiderar o efeito do estresse hídrico e possivelmente de elevadas temperaturas, assume-se que a relação linear existente entre a taxa de desenvolvimento e a temperatura permaneça crescente, quando o que se observa na realidade é o decréscimo desta taxa acima da temperatura ótima (HESKETH et al., 1973; FERREIRA et al., 1997).

Apesar das diferenças encontradas entre os diversos experimentos apresentados, o empirismo por trás da obtenção das temperaturas basais e a forte dependência desta teoria com o regime térmico ao qual a planta é submetida fazem com que só haja coerência em se comparar experimentos com condições térmicas similares (BONHOMME, 2000).

A Tabela 4 apresenta a exigência térmica média para cada fase da soja na Amazônia. Percebe-se que a maior variação é encontrada logo no início do desenvolvimento (fase Vc). Para atingir o florescimento nas condições climáticas da Amazônia a soja necessita em torno de 414 ± 25 graus-dia, e em média 1063 graus-dia para atingir a maturação fisiológica. Tais resultados podem ser utilizados em modelos de simulação do crescimento e produtividade da soja para esta região como identificadores do desenvolvimento da cultura.

Tabela 4 – Exigência térmica média para cada fase da soja na Amazônia.

Fases	Tempo térmico acumulado			
	Média	Desvio padrão	Erro padrão	CV (%)
Vc	30,59	15,73	4,20	51,41
V1	78,05	23,37	7,05	29,94
V2	107,55	25,97	8,21	24,15
V3	189,88	11,15	6,44	5,87
V4	234,67	16,04	9,26	6,83
V5	250,98	33,43	8,6	13,32
V6	289,61	17,91	10,34	6,18
R1	414,36	24,69	5,66	5,96
R2	460,14	15,61	5,20	3,39
R3	538,23	28,21	7,05	5,24
R4	624,84	22,48	9,18	3,59
R5	691,04	13,72	3,15	1,98
R6	934,42	22,05	5,06	2,36
R7	1063,29	31,45	7,21	2,96
R8	1201,39	16,36	3,75	1,36

3.3. Duração do ciclo

Muitos trabalhos mostram a forte dependência da fenologia da soja com as condições meteorológicas (DESCLAUX; ROUMET, 1996; CAMARA et al., 1997; COBER et al., 2001; ZHANG et al., 2001). A maioria deles trata do efeito combinado da temperatura do ar, fotoperíodo e do estresse hídrico na determinação das fases da cultura.

Menor fotoperíodo ou maior temperatura do ar tendem a antecipar o florescimento da soja (CAMARA et al., 1997) podendo ocorrer casos em que o florescimento é antecipado mesmo sob baixas temperaturas dependendo da sensibilidade diferencial das cultivares ao fotoperíodo (COBER et al., 2001).

A temperatura afeta o desenvolvimento das plantas, pois sob baixos valores as enzimas não são suficientemente flexíveis para causar as mudanças requeridas para determinadas reações, enquanto que em elevadas temperaturas estas enzimas coagulam tornando a nova estrutura incapaz de catalisar as reações (BONHOMME, 2000).

O efeito do fotoperíodo no desenvolvimento da soja acontece devido à indução floral decorrente de maior período de escuridão ao qual a planta é submetida, apresentando acelerado florescimento quando cultivada em regiões de dias curtos (FARIAS et al., 2007). Para regiões com maior fotoperíodo (ou com menor amplitude) o florescimento é atrasado afetando a produtividade e para estes casos, a adoção de cultivares com o chamado “período juvenil longo” tem sido a melhor estratégia, pois são insensíveis ao fotoperíodo, podendo apresentar florescimento precoce mesmo com elevado fotoperíodo (SINCLAIR et al., 2005).

A Figura 2 apresenta a duração observada nos subperíodos emergência-florescimento (Em-Flor) e emergência-colheita (Em-Mat) em função da temperatura do ar. Nota-se claramente o efeito redutivo de elevadas temperaturas na taxa de desenvolvimento uma vez que a cultivar trcajá utilizada é adaptada as condições de fotoperíodo da região. Apesar dos valores médios de temperaturas não ultrapassarem 28°C, máximos de até 35°C foram comumente observados em especial no início do ciclo. Hesketh et al. (1973) encontraram considerável redução na taxa de emergência de folhas em soja exposta a temperaturas acima de 30°C, atribuindo tal efeito a limitação no fornecimento de fotossintetizados para esta reação.

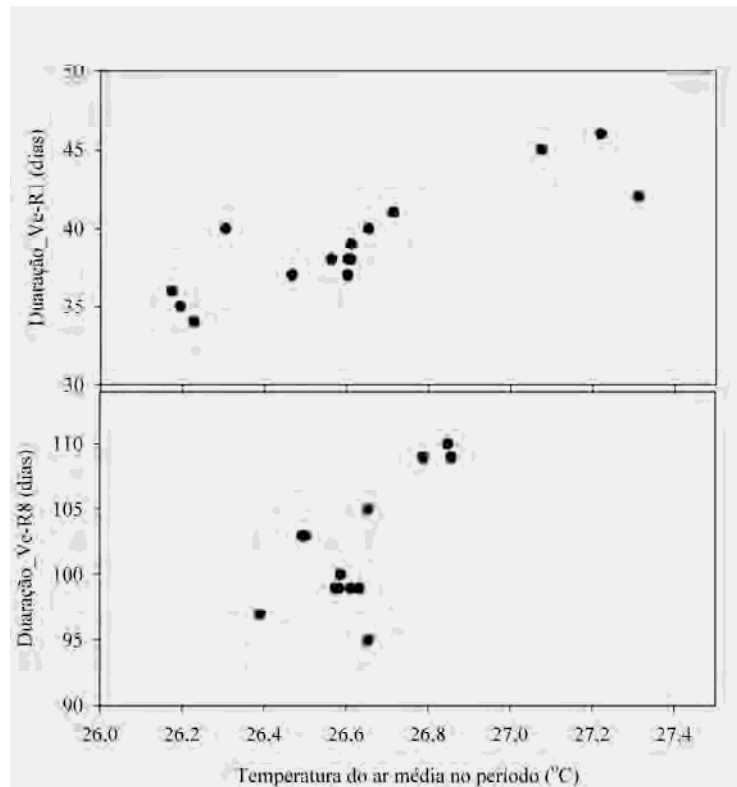


Figura 2 – Duração dos subperíodo emergência-florescimento e emergência-colheita em função da temperatura do ar.

A Figura 3 apresenta o efeito do atraso da semeadura da soja na duração de alguns subperíodos. Para semeaduras realizadas no início de janeiro, o florescimento ocorre entre 40 e 45 dias após a emergência (DAE), havendo uma redução na duração na medida em que ocorre o atraso na semeadura. Nota-se aqui o efeito combinado tanto de elevadas temperaturas como da redução na oferta hídrica na duração do ciclo.

Para semeaduras entre os 20 e 40 dia-Juliano, o continuo decréscimo nas chuvas acelera o desenvolvimento enquanto que semeaduras realizadas a partir de meados de fevereiro a constante ocorrência de temperaturas acima da temperatura ótima ao longo do ciclo ocasiona um leve aumento na duração de algumas fases apesar da ocorrência mais freqüente de déficits de água. Decréscimo no período pré-florescimento e pós-florescimento da soja em função do atraso na semeadura também foram observados por Setiyono et al. (2007), em Nebraska, Estados Unidos, embora neste caso o fotoperíodo tenha sido o principal controlador.

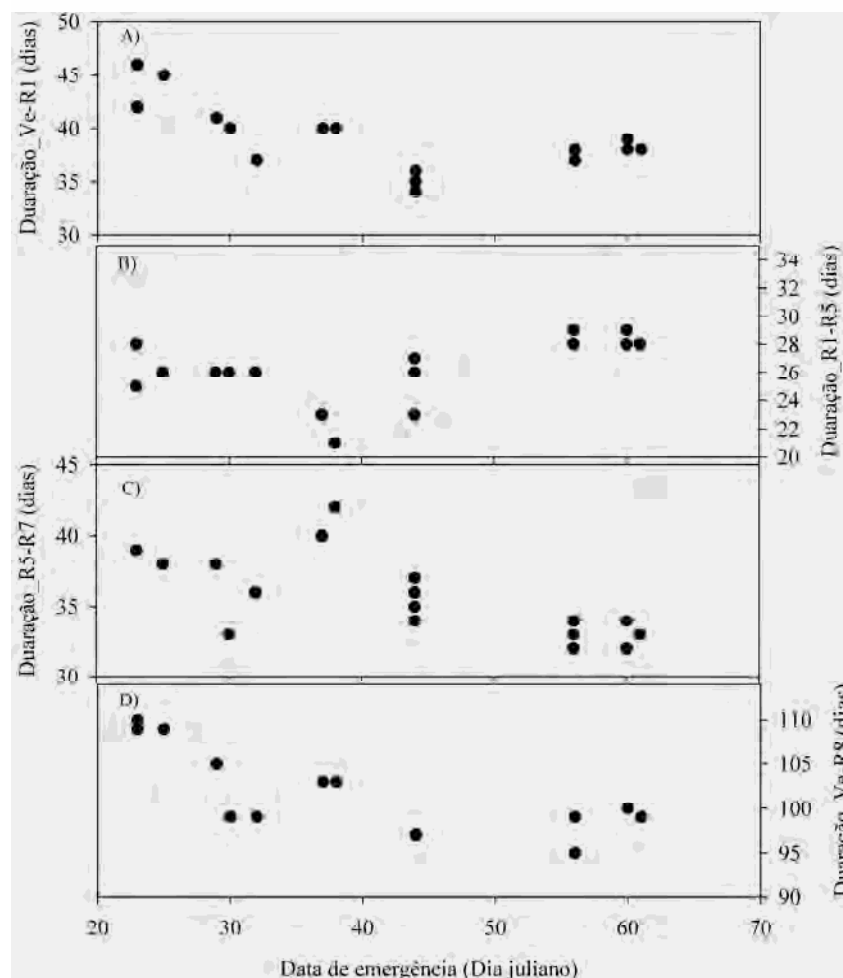


Figura 3 – Efeito da data de semeadura na duração dos subperíodos da soja na Amazônia.

Existem aqui dois fatores importantes a serem considerados pelo agricultor na tomada de decisão, pois ao decidir semear mais cedo propicia plantas maiores favorecendo a colheita mecanizada (Figura 3a), enquanto que ao atrasar a semeadura possibilita o florescimento precoce, mas em compensação diminui a duração do enchimento de grãos (Figura 3c) mesmo não havendo diferença na duração da formação de flores e vagens (Figura 3b).

Resultados semelhantes deste efeito no número de dias para a floração e maturação da soja foram encontrados no estado de Rondônia (VENTUROSO et al., 2009) e no Tocantins (FIDELIS et al., 2007). O número de dias necessários para que a soja atinja o florescimento no Tocantins variou de 46 dias após a semeadura (DAS) quando semeada no final de novembro para 37 DAS para semeaduras no início de

Janeiro (FIDELIS et al., 2007). Já em Rondônia, o ciclo total da soja foi encurtado de 113 para 110 dias para cultivares precoces e de 127 para 124 para cultivares de ciclo médio, quando semeadas em novembro e dezembro, respectivamente (VENTUROSOS et al., 2009).

A cultivar *Tracajá* quando semeada em novembro/dezembro no estado do Maranhão apresenta florescimento aos 40-42 DAS e ciclo total de 115-116 DAS, e no estado de Roraima floresce aos 39 DAS fechando o ciclo em 108 DAS quando semeada em maio (EL-HUSNY et al., 2003a). Vale lembrar que a definição do melhor período de semeadura para a soja deve considerar a disponibilidade de água durante as fases mais críticas da cultura uma vez que o estresse hídrico tende a reduzir o intervalo entre as fases fenológicas na soja, tornando as vagens maduras cerca de uma semana mais cedo quando sob estresse na fase de enchimento de grãos (DESCLAUX; ROUMET, 1996). De acordo com os autores esta reação da soja ocorre como estratégia de sobrevivência da cultura.

O período mais recomendado para a semeadura da cultivar na região nordeste do estado do Pará ocorre no mês de janeiro a fim de que a colheita seja realizada no final do período chuvoso da região (EL-HUSNY et al., 2003). No entanto, esta região apresenta índice de satisfação hídrica favoráveis para a semeadura da soja tanto em janeiro como em fevereiro, podendo haver risco climático a partir de abril (PACHECO et al., 2004). Os resultados encontrados corroboram isso, sugerindo que o melhor período para a semeadura da soja seja realmente até meados de fevereiro. No entanto, a disponibilidade hídrica nesta região tem efeito direto dos fenômenos climáticos El-Niño e La-Niña, havendo a necessidade de se considerar este fato na tomada de decisão (SOUZA et al, 2010, em preparação).

A Tabela 5 apresenta o tempo médio de ocorrência das fases da soja em Paragominas. Os resultados estão de acordo com os encontrados por El-Husny et al. (2003) para a cultivar *tracajá* no município de Paragominas entre 1998 e 2000. A ocorrência do florescimento acontece aos 39 ± 3 DAE, sendo necessários em média 101 ± 4 DAE para a maturação fisiológica e 113 ± 3 DAE para a colheita.

Tabela 5 – Duração média de ocorrência de algumas fases da soja em dias após a emergência

Fases	Duração média (dias após a emergência)		
	Média	Desvio Padrão	CV (%)
V ₁	8,18	1,86	22,79
V ₅	24,17	3,27	39,97
R ₁	39,00	2,90	35,45
R ₃	51,50	3,54	43,30
R ₅	65,25	2,53	30,95
R ₇	100,83	4,69	57,30
R ₈	113,67	3,21	39,20

3.4. Desempenho do modelo empírico

A simulação do desenvolvimento da soja em função de variáveis meteorológicas, seja por meio de modelos lineares simples ou mais complexos, tem sido feita de forma bastante eficiente e seus resultados são considerados satisfatórios na previsão da sua fenologia (QUEIROZ et al., 1996; COBER et al., 2001; SETIYONO et al., 2007; STRECK et al., 2009). Os valores de exigência térmica da soja (*cultivar tracajá*) obtidos em Paragominas foram utilizados na simulação da fenologia da soja e seus resultados são apresentados na Figura 4 e na Tabela 6.

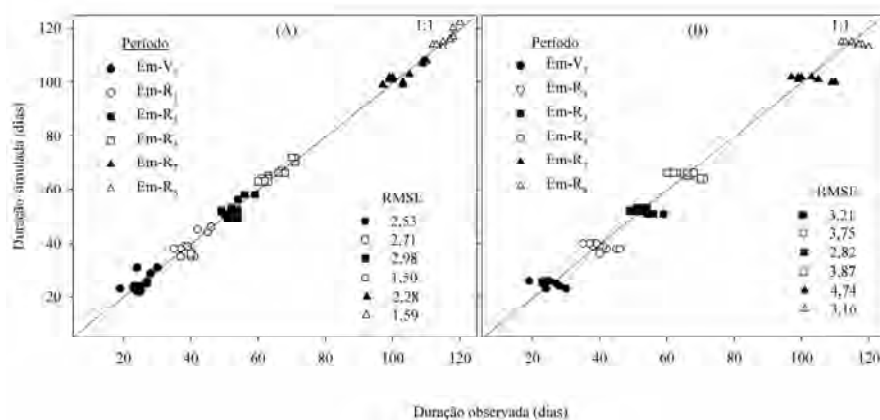


Figura 4 – Fenologia da soja observada e simulada através do modelo com efeito redutivo da temperatura (A) e sem considerar a temperatura efetiva (B). No caso (B), considerou-se a temperatura base normalmente utilizada (10°C).

Tabela 6 – Estatística do desempenho do modelo para a duração do ciclo

Período	Parâmetros estatísticos							
	\bar{O} (dias)	n	\bar{P} (dias)		d		R^2	
			MTE	MTA	MTE	MTA	MTE	MTA
Em-V ₅	24,80±0,65	15	24,80±0,8	25,26±0,28	0,74	0,07	0,34	0,32
Em-R ₁	40,07±0,59	19	38,86±0,82	38,66±0,33	0,78	0,07	0,35	0,32
Em-R ₃	52,47±0,67	19	52,46±0,65	52±0,15	0,66	0,23	0,19	0,06
Em-R ₅	66,33±0,68	19	66,66±0,59	65,46±0,19	0,94	0,15	0,82	0,55
Em-R ₇	102,53±0,91	19	102,46±0,66	101,46±0,19	0,89	0,21	0,72	0,71
Em-R ₈	114,80±0,68	19	115,86±0,69	114,53±0,69	0,90	0,00	0,71	0,82

\bar{O} = média observada ± erro padrão; \bar{P} = média simulada ± erro padrão; n = número de dados.

A fim de se avaliar a eficiência da inclusão da temperatura efetiva nesta teoria, o desenvolvimento da soja foi também simulado considerando apenas a temperatura do ar usando a temperatura base de 10°C. Nas discussões a seguir, chamaremos o modelo com temperatura efetiva de *MTE* e o modelo com temperatura do ar de *MTA*.

Nota-se que a inclusão do efeito redutivo da temperatura melhorou a simulação da fenologia da soja nas condições climáticas da Amazônia (Figura 4). O modelo *MTA* apresentou valores de RMSE superiores aos do modelo *MTE*, chegando a errar em quase cinco dias a determinação da maturação fisiológica. O modelo *MTA* confirmou ser insensível ao elevado regime térmico da região, apresentando dados discretos para as diferentes datas de semeadura adotadas na pesquisa. Embora, o modelo *MTE* tenha apresentado baixa eficiência na simulação do início de formação de vagem (d=0,66; $R^2=0,19$), seus resultados foram mais satisfatórios do que o modelo *MTA* (Tabela 6). Os erros gerados pelo modelo *MTE* variaram entre 1,5 e 2,98 dias, uma considerável melhora quando comparado ao modelo *MTA* (2,82-4,74).

Os resultados apresentados na Tabela 6 demonstram que a inclusão do efeito redutivo na simulação do desenvolvimento da soja nesta região em especial, representa uma melhora significativa nesta teoria. Streck et al. (2009) conseguiram melhorar o desempenho do modelo Soydev em simular o número de nós de soja, após calcular a função de resposta da temperatura como média dos extremos diários ao invés da temperatura média diária, obtendo reduções nas variações dos valores de RMSE de 1,9-2,3 para 0,5-1,4.

O modelo *MTE* conseguiu reproduzir muito bem a fenologia da soja, apresentando erros (RMSE) menores que três dias, próximos dos obtidos com modelos mais complexos para diferentes cultivares de soja (SETIYONO et al., 2007). Apesar dos baixos valores de coeficiente de determinação obtidos até a fase de formação de vagens, o modelo concordou em mais de 70% com a ocorrência destas fases, apresentando uma pequena subestimativa do florescimento de menos de 3% (Tabela 6). Ressalta-se, porém, que não é aconselhável o uso do R^2 como único medidor do desempenho do modelo pelo fato de sua magnitude não estar coerentemente relacionada com a precisão da simulação, pois muitas vezes não está associado ao tamanho das diferenças entre a observação e a previsão (WILMOTT, 1982).

A provável explicação para a menor precisão na simulação do período vegetativo e subperíodos reprodutivos (R1 e R3) pelo *MTE* pode estar associado ao fato destas fases sofrerem maior influência do clima como apresentado na Figura 3. Por outro lado, percebe-se que a ocorrência do período de enchimento de grãos foi reproduzida de forma satisfatória, apresentando baixíssimos erros e alto índice de concordância.

Este é um detalhe muito importante para o auxílio no manejo da cultura, uma vez que a fase mais crítica da soja ocorre neste período, quando eventos de déficit hídrico podem afetar a produtividade. Além disso, uma boa estimativa desta fase pelo modelo torna-se importante, pois alguns modelos de crescimento e rendimento da soja adotam esta fase como um ponto de partida para o crescimento dos grãos através do aumento linear do índice de colheita. Logo, quanto mais precisa a simulação mais preciso será a duração do enchimento dos grãos, contribuindo para uma melhor estimativa da produtividade final da soja.

4. CONCLUSÕES

A duração dos subperíodos da soja apresentou dependência da época da semeadura, havendo uma redução na duração de cada fase com o atraso na semeadura. Por outro lado, a soja demonstrou ser sensível a elevadas temperaturas aumentando seu ciclo com o aumento da temperatura do ar.

A soja necessita entre 1.185 e 1.227 graus-dia para ser colhida considerando uma temperatura base de 5°C. A inclusão do efeito redutivo de elevadas temperaturas mostrou ser um método bastante eficiente para as condições térmicas da Amazônia.

A simulação da fenologia da soja foi melhorada com o uso da temperatura efetiva no lugar da temperatura média do ar, reduzindo de 4,7 para 2,3 dias o erro (RMSE) na determinação da maturação fisiológica da soja.

5. REFERÊNCIAS

BONHOMME, R. Bases and limits to using “degree.day” units. **European Journal of Agronomy**, v. 13, p. 1-10, 2000.

BRUNINI, O.; LISBÃO, R. S.; BERNARDI, J. B.; FORNASIER, J. B.; PEDRO JUNIOR, M. J. Temperatura-base para alface cultivar “White Boston”, em um sistema de unidades térmicas. **Bragantia**, v. 35, p. 215-219, 1976.

CAMARA, G. M. S.; SEDIYAMA, T.; DOURADO-NETO, D.; BERNARDES, M. S. Influence of photoperiod and air temperature on the growth, flowering and maturation of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). **Scientia Agricola**, v. 54, p. 149-154, 1997.

CAMARGO, M. B. P.; BRUNINI, O.; MIRANDA, M. A. C. Temperatura-base para cálculo dos graus-dia para cultivares de soja em São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 2, p. 115-121, 1987.

CESARACCIO, C.; SPANO, D.; DUCE, P.; SNYDER, R. L. An improved model for determining degree-day values from daily temperature data. **International Journal of Biometeorology**, v. 45, p. 161-169, 2001.

COBER, E. R.; STWEART, D. W.; VOLDENG, H. D. Photoperiod and temperature responses in early-maturing, near-isogenic soybean lines. **Crop Science**, v. 41, p. 721-727, 2001.

DESCLAUX, D.; ROUMET, P. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. **Field Crops Research**, v. 46, p. 61-70, 1996.

EL-HUSNY, J. C.; ANDRADE, E. B.; SOUZA, F. R. S.; FILHO, A. S.; KEPLER, D.; ALMEIDA, L. A.; MEYER, M. C. **Recomendação de cultivares de soja para microrregião de Paragominas, Pará**. Belém: Embrapa-CPATU, 2003a. 6 p. (Comunicado técnico, 82).

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular técnica, 48).

FEHR, W.R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. (Special Report, 80).

- FERREIRA, M. E.; ABREU, J. P. M.; BIANCO, V. V.; MONTEIRO, A. Predicting phasic development of green beans for processing using a model with high temperature reduction of thermal time accumulation. **Scientia Horticulturae**, v. 69, p. 123-133, 1997.
- FIDELIS, R. R.; SILVA, J. C.; PELUZIO, J. M.; CAPPELLARI, D.; BARROS, H. B.; CARVALHO, G. L. Performance de cultivares de soja, em diferentes épocas de semeadura na região sul do estado do Tocantins, safra 2006/07. **Amazônia, Ciência & Desenvolvimento**, v. 3, p. 163-175, 2007.
- GARCIA-HUIDOBRO, J.; MONTEITH, J. L.; SQUIRE, G. R. Time, temperature and germination of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. and H.). I. Constant temperature. **Journal of Experimental Botany**, v. 33, p. 288-296, 1982.
- HESKETH, D. L.; MYHRE, D. L.; WILLEY, C. R. Temperature control of time intervals between vegetative and reproductive events in soybeans. **Crop Science**, v. 13, p. 250-254, 1973.
- HIGLEY, L.G.; PEDIGO, L.P.; OSTLIE, K. R. Degday: a program for calculating degree-days, and assumptions behind the degreeday approach. **Environmental Entomology**, v. 15, p. 999-1016, 1986.
- KISH, A. J.; OGLE, W. L. Improving the heat unit system in predicting maturity date of snap beans. **HortScience**, v. 15, p. 140-141, 1980.
- KISH, A. J.; OGLE, W. L.; LOADHOLT, C. B. A prediction technique for snap bean maturity incorporating soil moisture with the heat unit system. **Agricultural Meteorology**, v. 10, p. 203-209, 1972.
- LALLUKKA, U.; RANTANEN, O.; MUKULA, J. The temperature sum requirements of barley varieties in Finland. **Ann. Agric. Fenn.**, v. 17, p. 185-191, 1978.
- LEMOS FILHO, J. P.; VILLA NOVA, N. A.; PINTO, H. S. A model including photoperiod in degree days for estimating Hevea bud growth. **International Journal of Biometeorology**, v. 41, p. 1-4, 1997.
- MASSIGNAM, A. M.; ANGELOCCI, L. R. Relações entre temperatura do ar, disponibilidade hídrica no solo, fotoperíodo e duração de subperíodos fenológicos do girassol. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 1, p. 63-69, 1993.
- OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. Rio de Janeiro: Broch, 1986. 448 p.
- PACHECO, N. A.; BASTOS, T. X.; EL-HUSNY, J. C. Identificação de risco climático para semeadura da soja no município de Paragominas, PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBMET, 2004.

PEARSON, S.; HADLEY, P.; WHELDON, A. E. A model of the effects of temperature on the and development of cauliflower (*Brassica oleracea* L. botrytis). **Scientia Horticulturae**, v. 59, p. 91-106, 1994.

PEREIRA, C. R. **Análise do crescimento e desenvolvimento de soja sob diferentes condições ambientais**. 2002. 305 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PURCELL, L. C. Comparison of thermal units derived from daily and hourly temperatures. **Crop Science**, v. 43, p. 1874-1879, 2003.

QUEIROZ, E. F.; MOLION, L. C. B.; GAUDÊNCIO, C. A.; GARCIA, A. Um modelo matemático de previsão da data de ocorrência de estádios fenológicos de três cultivares de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, p. 533-542, 1996.

RUSSELE, M. P.; WILHELM, W. W.; OLSON, R. A.; POWER, J. F. Growth analysis based on degree days. **Crop Science**, v. 24, p. 28-32, 1984.

SCHOFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. Contribuição relativa da temperatura do ar no desenvolvimento de três cultivares de soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 2, p. 97-104, 2002.

SENTELHAS, P. C.; NOGUEIRA, S. S. S.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; SANTOS, R. R. Temperatura-base e graus-dia para cultivares de girassol. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 2, p. 43-49, 1994.

SETIYONO, T. D.; WEISS, A.; SPECHT, J.; BASTIDAS, A. M.; CASSMAN, K. G.; DOBERMANN, A. Understand and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, v. 100, p. 257-271, 2007.

SINCLAIR, T. R.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L. Comparison of vegetative development in soybean cultivars for low-latitude environments.. **Field Crops Research**, v. 92, p. 53-59, 2005.

SNYDER, R. L.; SPANO, D.; CESARACCIO, C.; DUCE, P. Determining degree-day thresholds from field observation. **International Journal of Biometeorology**, v. 42, p. 177-182, 1999.

STRECK, N. A.; PAULA, G. M.; OLIVEIRA, F. B.; SCHWANTES, A. P.; MENEZES, N. L. Improving node number simulation in soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 661-668, 2009.

VENTUROSOSO, L. R.; CARON, B. O.; SCHMIDT, D.; BERGAMIN, A. C.; VALADÃO JUNIOR, D. D.; JAKELAITIS, A. Efeito da época de semeadura sobre caracteres agrônômicos em cultivares de soja em Rolim de Moura-RO. **Bioscience Journal**, v. 25, p. 73-81, 2009.

VILLA NOVA, N. A.; CARRETEIRO, M. V.; SCARDUA, R. Um modelo de avaliação do crescimento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), em termos da ação combinada do fotoperíodo e da temperatura média do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2, 1983, Campinas. **Anais...** Campinas, 1983. p. 31-48.

WILMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 3, n. 7, p. 1309-1313, 1982.

WILMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

YANG, S.; LOGAN, J.; COFFEY, D. L. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree-days. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 74, p. 61-74, 1995.

YIN, X.; KROPFF, M. J.; McLAREN, G.; VISPERAS, R. M. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 77, p. 1-16, 1995.

ZHANG, L.; WANG, R.; HESKHET, J.D. Effects of photoperiod on growth and development of soybean floral bud in different maturity. **Agronomy Journal**, v. 93, p. 944-948, 2001.

CAPÍTULO 3

EXIGENCIA HÍDRICA DA SOJA

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os maiores produtores de soja são os Estados Unidos, o Brasil, a Argentina e a China, que juntos são responsáveis por 80% da produção mundial. Os três primeiros são responsáveis por 90% da comercialização mundial da oleaginosa, sendo o Brasil o segundo maior exportador (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2008). Dos 21,7 milhões de hectares cultivados com soja no Brasil, 45,5% localiza-se na região centro-oeste, com 5,6 milhões apenas no estado do Mato Grosso, e menos de 500 mil nos estados Amazônicos da região Norte do Brasil (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2009).

O mercado da soja no Brasil apresenta boas perspectivas de crescimento nos próximos anos, devido a fatores como o aumento do consumo de farelo de soja, ao potencial uso da soja para a indústria de biodiesel e principalmente pelo fato de países produtores como EUA, China e Índia estarem com suas fronteiras agrícolas quase ou totalmente esgotadas, tornando o Brasil como um dos grandes supridores da demanda mundial (EMBRAPA, 2008).

No entanto, algumas pesquisas realizadas no Brasil têm mostrado que o rendimento da soja é influenciado por fatores como déficit hídrico (THOMAS; COSTA, 1994; ALBERTO et al., 2006), excesso hídrico (SCHOFFEL et al., 2001), temperatura

(SCHOFFEL; VOLPE, 2002) e a disponibilidade de nitrogênio (JENDIROBA; CÂMARA, 1994). Dentre estes fatores, o regime de chuvas é sem dúvida o principal responsável pela variabilidade do rendimento da soja encontrada em várias regiões do Brasil (FARIAS et al., 2001).

O consumo de água pela soja varia com o desenvolvimento vegetal e em função das condições ambientais, havendo sérios impactos no rendimento quando esta demanda não é suprida, principalmente durante o período reprodutivo (OYA et al., 2004), em especial na fase de enchimento de grãos (SIONIT; KRAMER, 1977).

Resultados de Brown et al. (1985) mostraram que o déficit hídrico causou uma redução de 21 e 44% na produtividade da soja, quando este ocorreu durante as fases R2 e R4, respectivamente. Thomas e Costa (1994) encontraram uma redução de 52% no rendimento da soja no Rio Grande do Sul em consequência do déficit hídrico.

Apesar dos altos níveis pluviométricos, altas temperaturas e do favorecimento à proliferação de pragas e doenças dificultarem o avanço da soja na Amazônia (BENCHIMO et al., 2005), o desenvolvimento de novas variedades menos sensíveis a elevadas temperaturas e principalmente ao fotoperíodo, tornou possível a expansão da sojicultura nesta região (SINCLAIR et al., 2005).

O cultivo da soja (*Glycine Max* (L.) Merrill) na Amazônia iniciou-se na década de 2000, com uma área de plantio de 73 mil ha, área considerada restrita ao restante do País. No estado do Pará, por exemplo, a área plantada era de apenas 1.200 ha em 2000, mas a região já vinha recebendo incentivos do governo desde 1994 para estimular o aumento da produção de grãos principalmente nas regiões de Santarém e Paragominas (MUELLER; BUSTAMANTE, 2006). A área plantada em 2008, no estado, já chegava a 71 mil ha, com produtividade média de 3 t ha⁻¹, valor considerado satisfatório comparado a outras regiões do País (SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA – SAGRI, 2009).

Alguns trabalhos sobre exigência hídrica da soja têm mostrado que a mesma apresenta máximo consumo em torno de 7,5 mm por dia entre o florescimento e enchimento de grãos (BERLATO et al., 1986). Dependendo da região do Brasil e da cultivar utilizada a exigência hídrica de todo o ciclo da soja para a obtenção de bons níveis de rendimentos varia entre 450 e 800 mm (FARIAS et al., 2007). Nos Estados Unidos a soja apresentou exigência hídrica no ciclo de 452 mm quando cultivada com irrigação e de 431 mm quando cultivada em sequeiro (SUYKER; VERMA, 2009).

No caso da região Amazônica onde o regime de chuvas chega a ultrapassar o limite máximo exigido pela soja durante o ciclo, a obtenção das necessidades hídricas ao longo do ciclo da cultura poderá auxiliar no planejamento da produção contribuindo para a redução de perdas devido por exemplo, ao excesso hídrico comum na região, apesar de existirem frequentemente ocorrências de anomalias negativas de chuva durante episódios do fenômeno El-Niño (SOUZA et al., 2000).

Logo, torna-se importante estudar o comportamento hídrico neste novo tipo de ecossistema na região como estratégia de manejo buscando melhorar a produção na Amazônia. Este estudo teve por objetivo analisar a exigência hídrica da soja ao longo do sistema de produção na região Amazônica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área experimental

O experimento foi conduzido durante a safra de 2007/2008 no município de Paragominas, situado na região nordeste do Estado do Pará. Esta região foi escolhida pelo fato de ter apresentado uma grande expansão do cultivo da soja nos últimos anos. A área experimental com plantio de soja foi de 200 ha com as coordenadas geográficas 02°59'08" de latitude Sul e 47°19'57" de longitude Oeste. Toda a área foi plantada mecanicamente com a cultivar Tracajá (ciclo intermediário) em fileiras espaçadas de 0,5 m e espaçamento entre plantas de 0,1 m. A semeadura foi realizada em 23 de fevereiro e a colheita foi feita em 21 de junho do mesmo ano.

2.2. Dados

Uma torre instrumentada de 3 metros de altura foi montada no centro da área contendo sensores micrometeorológicos (Tabela 1). Todos os sensores foram ligados a um datalogger CR10X (Campbell Scientific, Inc.) e um multiplexador AM416 (Campbell Scientific, Inc.).

Tabela 1 – Lista de instrumentos, alturas e medições da estação meteorológica automática instalada no experimento da soja

Variável meteorológica	Instrumento usado, fabricante (modelo)	Nível dos sensores
Radiação global incidente e refletida	Pyranometers Kipp & Zonen (CMP3)	2,45 (m)
Saldo de radiação	NR Lite (Campbell Sci.)	2,45 (m)
Temperatura do ar	Vaisala thermohygrometer (HMP35A), PT100 resistors	0,5; 1; 2 (m)
Umidade relativa do ar	Vaisala thermohygrometer (HMP35A),	0,5; 1; 2 (m)
Umidade do solo	Soil Reflectometers (CS615)	10; 20; 0 to 30 (cm de profundidade)
Velocidade do vento	Cup Anemometers vector R.M. Young ()	0,5; 1; 2 (m)
Chuva	Rain gauge TB4	3,9 (m)
Fluxo de calor no solo	Flux plates Hukseflux (HFP01SC-L)	10; 10 (cm de profundidade)

A análise do desenvolvimento e crescimento da soja foi feita diariamente usando a classificação dos estádios proposta por Fehr e Caviness (1977) conforme Tabela 1A e Figura 1B apresentadas nos Apêndices A e B, respectivamente, em um experimento inteiramente casualizado, com quatro repetições. A análise da área foliar se deu pela amostragem aleatória de plantas nas linhas do plantio. Para isso, um conjunto de plantas foi coletado em um metro de comprimento da linha contendo seis repetições a cada amostragem. A área foliar foi obtida por meio de coleta de 30 discos foliares por repetição e estimada de acordo com a metodologia proposta por Benincasa (2003). O índice de área foliar (IAF) foi então estimado considerando estas medidas e o peso seco das folhas amostradas.

2.3. Evapotranspiração

A evapotranspiração real (ET_r) foi obtida por intermédio do método da razão de Bowen (β), em função do fluxo de calor latente entre a superfície e a atmosfera (LE):

$$ET_c = \frac{LE}{\lambda} \quad (1)$$

em que LE representa a energia gasta na evapotranspiração no intervalo de tempo estabelecido, e λ é o calor latente de evaporação:

$$\lambda = \left[(2,501 \times 10^6) - (2,361 \times 10^3 T) \right] \text{ (J/kg)} \quad (2)$$

O componente LE foi obtido por meio da razão de Bowen (β) medida através das relações do transporte vertical de calor e vapor d'água, assumindo que exista igualdade nos coeficientes de transporte turbulento (K_H e K_{LE}) (ARYA, 1998):

$$LE = \frac{Rn - G}{(1 + \beta)} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{C_p \Delta T}{\lambda \Delta q} = \frac{C_p P}{\lambda \cdot 0,622} \frac{\Delta T}{\Delta e} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (4)$$

em que, C_p é o calor específico à pressão constante ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), P é a pressão atmosférica (Kpa), γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{Kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$), ΔT e Δe são as diferenças de temperatura do ar ($^\circ\text{C}$) e de pressão de vapor d'água (Kpa) entre dois níveis consecutivos, respectivamente.

Para evitar problemas associados ao efeito de áreas adjacentes nas medidas, os instrumentos foram instalados de forma que apresentassem suficiente bordadura na direção predominante do vento (de 900 a 1.000 m) obedecendo a razão 1:100 exigida. Além disso, alterou-se frequentemente o nível dos sensores com o crescimento da cultura, mantendo-se sempre o mesmo intervalo do perfil (0,5-1-2m) garantindo que os mesmos permanecessem dentro da camada limite de equilíbrio (ROSEMBERG et al., 1983).

Diferentes critérios são utilizados para a eliminação de dados não confiáveis deste método, como valores de β iguais a -1, β menores que -0.75, valores de β entre -0.7 e 0.7, ou valores de β compreendidos entre -1.3 e -0.7 (ORTEGA-FARIAS et al., 1996; UNLAND et al., 1996).

Adotou-se a metodologia proposta por Perez et al. (1999) onde é sugerido um método analítico para determinar a consistência dos sinais observados na relação fluxo-gradiente entre as componentes e de quais valores de β próximos de -1 podem ser desprezados, baseado nas medidas do gradiente de pressão de vapor d'água e na resolução dos sensores utilizados, resultando em um intervalo em torno de -1 que varia

para diferentes condições. A evapotranspiração da soja foi então obtida pela soma dos valores positivos de LE no intervalo de 06 e 18 horas.

O déficit de pressão de vapor foi usado nas análises e foi calculado pela diferença entre a pressão de saturação de vapor d'água e a pressão atual de vapor d'água entre as 10 e 15 horas local. Utilizou-se o fator de desacoplamento proposto por Jarvis e McNaughton (1986) a fim de se avaliar a sensibilidade da evapotranspiração da soja em função do controle climático e biológico para o mesmo período, conforme a equação 5:

$$\Omega = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma \cdot (1 + g_a / g_c)} \quad (5)$$

em que Δ é a declividade da curva de pressão de saturação do vapor versus a temperatura; g_a e g_c são as condutâncias aerodinâmicas e da superfície, respectivamente.

A condutância aerodinâmica foi calculada de acordo com Allen et al. (1998) e a condutância da superfície estimada através da resistência estomática (r_c) de acordo com Costa (2008):

$$r_c = \left[28,11 \cdot \exp\left(\frac{10,5 \cdot DPV \cdot T_{ar}}{R_{in}}\right) \right] \quad (6)$$

em que DPV é o déficit de pressão de vapor (Kpa), T_{ar} a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e R_{in} a radiação solar incidente (W m^{-2}).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Condições meteorológicas e área foliar

O município de Paragominas possui um clima do tipo Am (classificação de Köppen), clima úmido com temperaturas acima de 18 graus e com pequena estação seca, apresentando um período chuvoso compreendido pelos meses de janeiro a meados de junho, e o restante do ano considerado como o período menos chuvoso, com um total anual de 1.801 mm. A temperatura média do ar varia entre 25,6 $^{\circ}\text{C}$ no período chuvoso a

27°C no período menos chuvoso, alcançando máximos de 34°C nos meses de outubro e novembro. A mínima temperatura não chega a menos que 20,8°C (EMBRAPA, 1988).

Durante o período de crescimento da soja, a temperatura do ar manteve-se sempre próxima ou abaixo da média, com máximos de até 33°C (Figura 1). O período de entressafra foi cerca de 2°C mais quente que o regime observado durante o ciclo em função da redução da cobertura vegetal e ausência de chuvas. No entanto, a média para este período não diferiu da média climatológica (27,03°C).

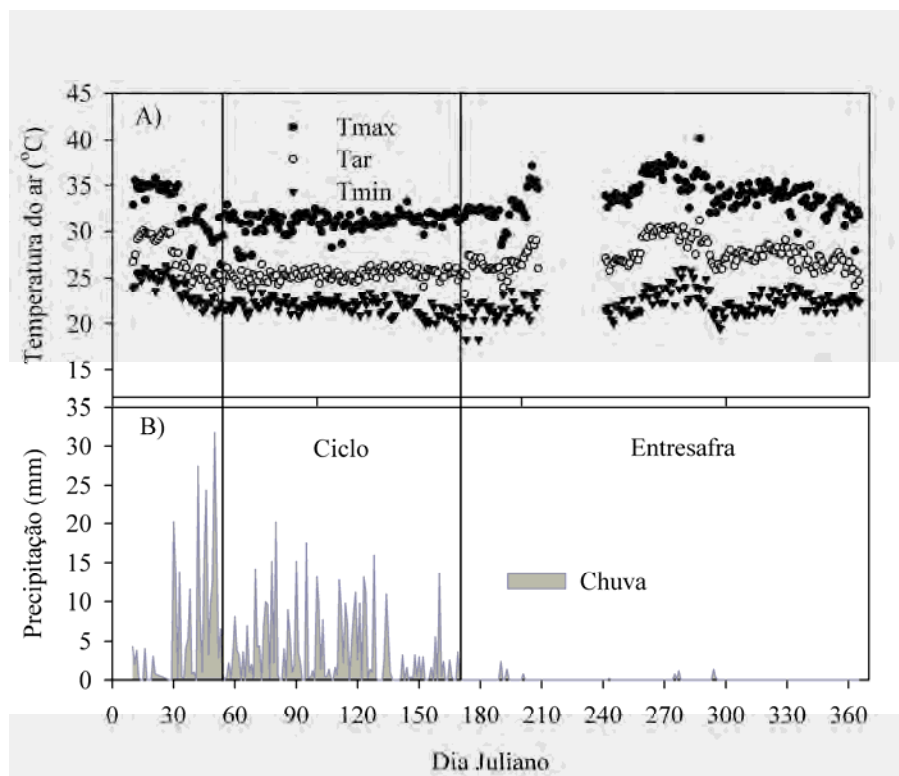


Figura 1 – Condições meteorológicas ao longo do ciclo de produção da soja em 2007. regime térmico (A) e regime hídrico (B).

O regime de chuvas esteve sempre abaixo da média histórica, apresentando total durante o período chuvoso (janeiro a junho) 51% abaixo da média (710 mm), dos quais 410 mm ocorreram durante o ciclo da soja. Ressalta-se, porém que mesmo com esta significativa redução na quantidade de chuvas, o volume total durante o crescimento da soja esteve muito próximo da exigência mínima observada para todo o ciclo da cultura (FARIAS et al., 2007). Durante a entressafra (julho e dezembro) a redução nas chuvas foi ainda mais brusca, apresentando um total de apenas 8,6 mm, valor expressivamente inferior à média no período (280 mm).

A produção de área foliar foi levemente afetada pela redução no volume de chuvas, com máximo IAF igual 4,1 aos 85 dias após a semeadura (DAS), mantendo-se próximo deste valor durante grande parte do subperíodo reprodutivo (Figura 2). Reduções importantes no índice de área foliar da soja foram também observados por Fontana et al. (1992) e Thomas e Costa (1994) atribuídas ao déficit de água. De acordo com Oya et al. (2004), a redução da área foliar na soja pode ser interpretada como um mecanismo de tolerância à seca, funcionando como uma estratégia para reduzir a perda de água.

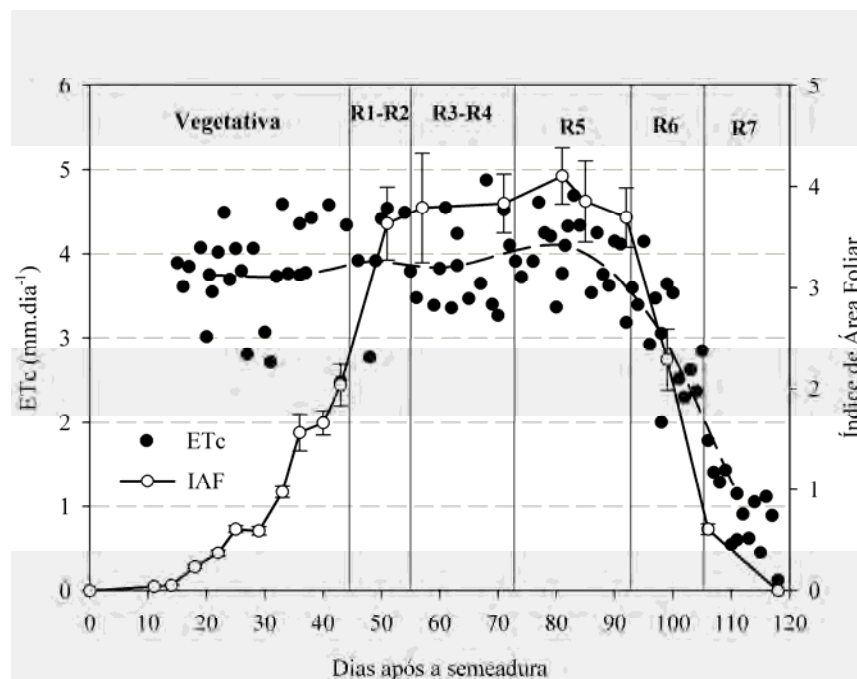


Figura 2 – Variação sazonal da evapotranspiração da soja.

Muchow e Sinclair (1986) observaram que a redução na área foliar da soja ocasiona uma diminuição na taxa de evapotranspiração, a fim de manter tanto a retirada de água do solo como a taxa de fixação de nitrogênio a níveis satisfatórios para não comprometer o seu rendimento. Suyker e Verma (2009) verificaram durante dois anos de experimento (2002 e 2004) picos de IAF para a soja de 4,4 e 5,7 quando irrigada, e de 3,1 e 4,4 quando em sequeiro, respectivamente.

3.2. Evapotranspiração

A Figura 2 apresenta a perda de água pelo ecossistema e a mudança no IAF ao longo do ciclo da soja. Nota-se que mesmo antes do florescimento da soja a evapotranspiração manteve-se em níveis elevados com valores diários oscilando entre 2,8 e 4,5 mm. Mesmo com IAF em torno de 1, a soja já apresentava evapotranspiração média de 3,8 mm.

Sauer et al. (2007) verificaram uma evapotranspiração média para a soja nos Estados Unidos de $4,9 \text{ mm dia}^{-1}$ quando a mesma possuía IAF igual a 1,86. O máximo consumo de água acompanhou a tendência do IAF, ocorrendo entre o período de florescimento e enchimento de grãos, estando de acordo com a maioria dos trabalhos já realizados com soja (BERLATO et al., 1986; SAKURATANI, 1987; SAUER et al., 2007; SUYKER; VERMA, 2008).

A máxima evapotranspiração ocorreu durante o período de enchimento de grãos, com um valor médio de $4,1 \pm 0,4 \text{ mm}$. Berlato et al. (1986) encontraram para a soja cultivada no Rio Grande do Sul evapotranspiração máxima de 7,5 mm durante este período. Suyker e Verma (2008) obtiveram picos de ETc de 7,3 mm e de 6,5 mm para a soja com IAF máximo de 5,7 e 4,4, respectivamente.

Tais diferenças ocorrem devido a evapotranspiração ser influenciada não apenas pela disponibilidade de água, demanda atmosférica e energia disponível como também pelo IAF (SAKURATANI, 1987). Alguns autores sugerem um limite no IAF da soja entre 3 e 4 a partir do qual a evapotranspiração deixa de sofrer efeito direto da cobertura foliar, explicado pelo fato de não haver aumento relativo na interceptação da radiação (SUIKER; VERMA, 2008).

Nota-se na Figura 2 que a evapotranspiração da soja na região amazônica parece ser mais sensível aos fatores climáticos do que fisiológicos, em especial durante o período vegetativo. Fatores como elevada disponibilidade de água e maior demanda atmosférica neste período parecem ter mantido a perda de água a níveis elevados mesmo com baixo IAF (Figura 3A e 3C). Tais resultados, embora com diferentes dimensões, concordam com os encontrados por Berlato et al. (1986), os quais verificaram uma evapotranspiração média entre a fase V2 e o florescimento da soja de 6,3 mm, ou seja, ainda no período vegetativo.

Percebe-se pela Figura 3 que durante todo o ciclo cultural da soja a quantidade de água esteve sempre próxima e em alguns casos acima da capacidade de campo do local (Figura 3a). Apesar da redução observada nas chuvas, o volume disponibilizado foi suficiente para manter o solo em condições adequadas durante quase todo o ciclo.

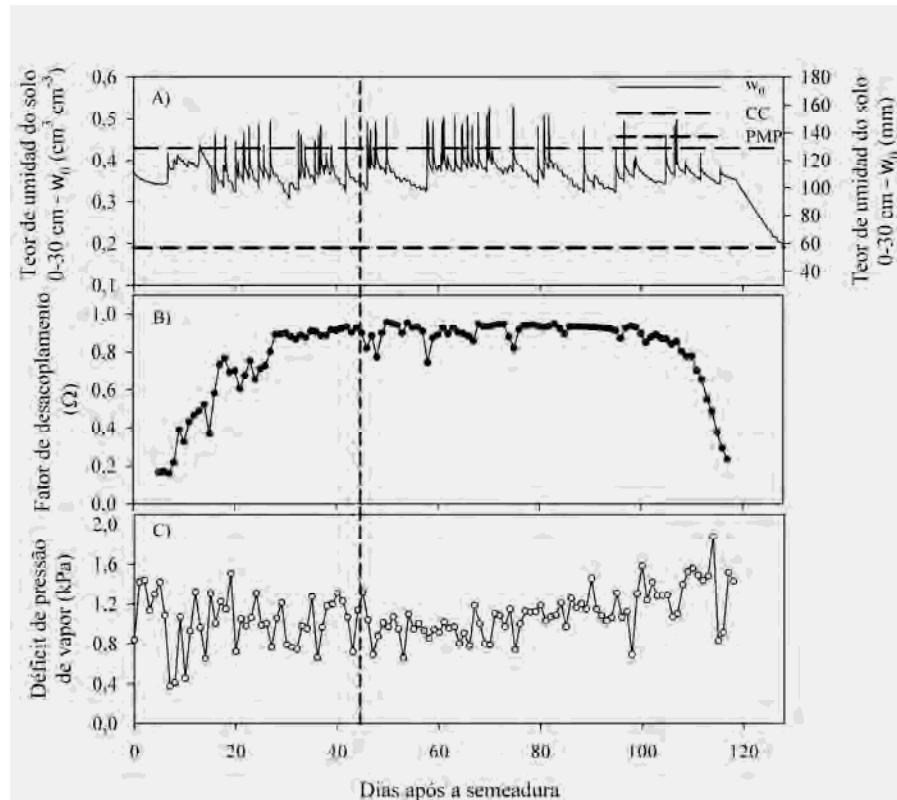


Figura 3 – Variação sazonal do conteúdo de umidade no solo (A), e da média ao meio dia do fator de desacoplamento (B) e do déficit de pressão de vapor (C) durante o ciclo da soja. A média ao dia representa o intervalo entre 10 e 15 horas local. A linha tracejada indica a ocorrência do florescimento.

Mesmo com fechamento incompleto do dossel, a evapotranspiração média neste período foi de 3,7 mm por dia (Tabela 2). Tais resultados sugerem que durante este período ($\text{IAF} < 1$) pode estar havendo contribuição significativa da evaporação na perda de água pela superfície. Entretanto, resultados de Sakuratani (1987) indicam que a transpiração na soja chega a representar mais que 50% do processo, mesmo com IAF próximo de 1, particularmente em casos com diminuição no conteúdo de água do solo, onde a evaporação torna-se primeiramente afetada. Sauer et al. (2007) encontraram uma

transpiração da soja de 3,2 mm, a qual representou 65% da evapotranspiração medida quando a mesma apresentava IAF de 1,86.

Tabela 2 – Média diária da evapotranspiração da soja em diferentes fases da cultura na Amazônia.

Fases	ETc (mm.d ⁻¹)	IAF	DPV diurno (kPa)	Rn (MJ m ⁻² d ⁻¹)	LE/Rn	Chuva total (mm)	ETc total (mm)
V1-V5	3,75±0,47	0,32	0,73	11,46(±0,61)	0,82	91,0	59,19
V5-Vn	3,74±0,77	1,36	0,72	11,39(±0,82)	0,83	60,4	62,12
R1-R2	3,92±0,65	3,63	0,70	11,06(±0,82)	0,83	36	56,24
R3-R4	3,86±0,52	3,81	0,65	10,97(±0,47)	0,81	105,2	41,39
R5	4,10±0,38	3,98	0,80	11,69(±0,47)	0,82	43,8	61,34
R6	3,05±0,67	2,99	0,89	11,13(±0,39)	0,67	17,8	39,72
R7-R8	1,15±0,64	0,20	0,96	11,45(±0,27)	0,21	23,4	14,95

Analisando o fator de desacoplamento (Ω) apresentado na Figura 3b, percebe-se que até em torno dos 28 DAS, os baixos valores de Ω sugerem haver um maior controle da vegetação no processo de evapotranspiração, o qual parece diminuir com o aumento do IAF. Apesar dos menores valores de Ω neste período, o suposto controle estomático sugerido, ocorre efetivamente pela ausência de cobertura vegetal e não por conta de menor condutância estomática como a teoria pressupõe. Como discutido anteriormente, durante esta fase a perda de água sofre forte efeito da evaporação de água do solo, confirmando esta hipótese. A partir dos 28 DAS, o IAF da soja aproxima-se da unidade (IAF>1 aos 33 DAS), sugerindo então que com o fechamento do dossel, o processo de transpiração supere a evaporação diretamente do solo, conforme também observado por Sakuratani (1987).

Após os 30 DAS, os valores de Ω demonstram que o dossel da soja encontra-se totalmente desacoplado da atmosfera, sendo a evapotranspiração influenciada diretamente pela energia disponível uma vez que a elevada quantidade de água manteve a condutância estomática em níveis elevados durante o experimento (SOUZA et al., 2009a). Sakai et al. (2004) obtiveram resultados semelhantes para o cultivo do arroz na Amazônia, onde a evapotranspiração se manteve completamente dominada pela forçante radiativa. Em alguns casos a partir do florescimento (45-58-75 DAS), nota-se

que após uma leve redução no conteúdo de água do solo o controle estomático apresenta certa importância na evapotranspiração (Figuras 3a e 3b).

Tais resultados demonstram que a limitação da ET_c máxima em valores próximos de 4 mm dia^{-1} , pode ter sido em consequência direta da redução na produção de área foliar neste ano. Conforme discutido anteriormente, outros autores encontraram valores máximos de ET_c da soja variando entre $4,9$ e $7,5 \text{ mm dia}^{-1}$ para diferentes valores de IAF, entre $4,4$ e $5,7$ (BERLATO et al., 1986; SAUER et al., 2007; SUYKER; VERMA, 2008). A partir da fase V5 até o início da frutificação, nota-se que o volume de água perdido em cada subperíodo esteve levemente acima ou abaixo do volume de chuvas, o que pode ter inibido a formação de área foliar, corroborando esta hipótese (Tabela 2).

A soja apresentou tal comportamento pelo fato da energia disponível durante quase todo o ciclo ser consumida em grande parte como LE, estando sempre acima dos 80% (Tabela 2). Apesar do saldo de radiação resultante neste ecossistema ser inferior ao observado nas florestas (SOUZA et al., 2009a), a partição desta energia pela soja se deu preferencialmente pela evapotranspiração. Alguns resultados obtidos em ecossistemas florestais na Amazônia indicam haver um consumo médio com LE entre 74 e 77% no período chuvoso e entre 54 e 74% no período menos chuvoso (MALHI et al., 2002; RANDOW et al., 2004).

Os resultados indicam que neste novo modelo de uso da terra na Amazônia a evapotranspiração resultante supera o processo existente na floresta, pelo menos durante grande parte do ciclo da soja. A evapotranspiração média obtida em diferentes ecossistemas florestais na Amazônia durante o período chuvoso chegou a $3,16 \text{ mm dia}^{-1}$ na Reserva de Cuieras (MALHI et al., 2002); a 3 mm dia^{-1} na reserva Duke (WERTH; AVISSAR, 2004) ambos no Amazonas; a $2,9 \text{ mm dia}^{-1}$ na Flona de Caxiuanã no Pará (SOUZA FILHO et al., 2005) e a $3,6 \text{ mm dia}^{-1}$ na Reserva Jarú em Rondônia (ALVES et al., 1998).

O consumo total de água pela soja desde a fase V1 até a colheita foi de 335 mm com um total de chuva de 377 mm no mesmo período (Tabela 2). Suyker e Verma (2009) obtiveram, em um experimento sob condições naturais de campo, um consumo total de água pela soja desde a semeadura até a sua colheita de 420 mm, com IAF máximo de $4,4$ e total de chuva de 311 mm. No mesmo ano, os autores obtiveram com o uso de irrigação um consumo um pouco maior pela soja (430 mm) apesar do máximo

IAF não ter sido diferente (4,4) e o volume de água (chuva + irrigação) ter sido maior (443 mm).

Isto leva a crer que a evapotranspiração pela soja na Amazônia poderia ter sido maior neste ano se não houvesse a inibição de área foliar uma vez que a quantidade de água nesta época do ano na região é climatologicamente não limitante. A redução no total de chuvas em 2007 pode ter sido causada por uma anomalia positiva na temperatura da superfície do oceano Pacífico observada entre outubro de 2006 e abril de 2007, indicando a ocorrência do fenômeno El Niño (www.cptec.inpe.br/enos/). Em outros anos, porém, a produção de área foliar da soja apresenta comportamento diferenciado, com máximo IAF de até 6,5 (SOUZA et al., 2008b).

Apesar de se esperar que a evapotranspiração em áreas de cultivo de soja em anos sem influência do El-Niño possa ser ainda maior do que o observado na floresta Amazônica, o grande problema do sistema de produção da soja reside no modelo empregado nesta região quando logo após a colheita o solo é deixado em pousio com restos culturais e com vegetação rasteira crescendo. Outro detalhe importante é que o ciclo da cultura representa 1/3 do ciclo anual, sendo o restante representado pela entressafra, podendo ser um sério problema para o balanço hidrológico anual.

Durante a entressafra nesta região ocorre uma considerável redução no fluxo de calor latente representando um impacto negativo de quase 80% em relação ao valor normalmente observado na floresta (SOUZA et al., 2009a). Como consequência, ocorre um aumento considerável na energia consumida na forma de calor sensível (+85%).

3.3. Entressafra

A Figura 4 apresenta a evapotranspiração real e a evapotranspiração de referência obtida de acordo com Allen et al. (1998) durante o período de entressafra da soja. A partir da fase de enchimento pleno do grão (R6) ocorre um rápido declínio na evapotranspiração, atingindo valores menores do que 1 mm dia^{-1} próximo da colheita (Figura 2). Esta característica também foi observada por Suyker e Verma (2008), quando encontraram valores de evapotranspiração na soja da ordem de 1 a 2 mm dia^{-1} causada pelo processo de senescência. Após a colheita, nota-se uma redução significativa na perda de água pela superfície, cujos valores mantiveram-se próximos de 1 mm dia^{-1} (Figura 4).

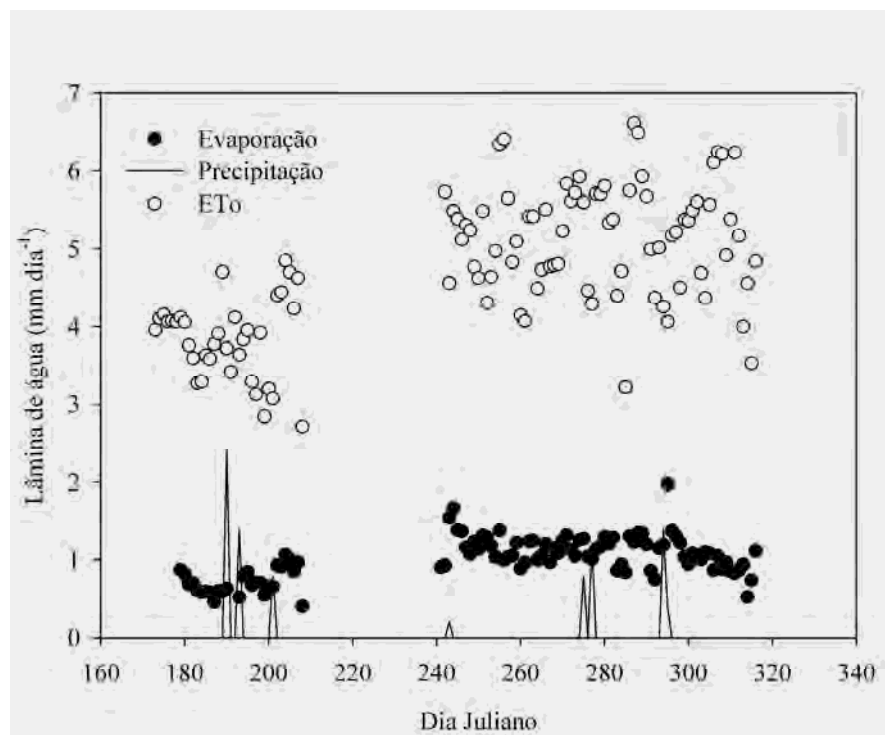


Figura 4 – Evaporação durante a entressafra da soja na Amazônia.

Esta brusca redução no processo de evapotranspiração é uma das principais conseqüências do uso da terra para agricultura, devido à diminuição no período de crescimento vegetal comparado às espécies vegetais nativas (CHEN et al., 2009). Resultados obtidos em uma sequência de diferentes usos da terra na Amazônia mostram uma mudança na evapotranspiração média de $2,2 \text{ mm dia}^{-1}$ com o solo coberto com pastagem, para $1,9 \text{ mm dia}^{-1}$ quando o mesmo encontrava-se em pousio (solo descoberto) até um valor de $2,7 \text{ mm dia}^{-1}$ com o plantio de arroz (SAKAI et al., 2004).

Tamanha redução na evapotranspiração após a colheita está diretamente associada à ausência de cobertura vegetal e redução significativa na precipitação (Figura 4). Nota-se que a evapotranspiração de referência para este período atinge em média 4 mm dia^{-1} logo após a colheita, chegando a mais de 5 mm dia^{-1} após 100 dias. Isto sugere o quanto de água poderia ser lançado na atmosfera caso houvesse cobertura vegetal durante este período. Se por um lado este sistema de produção adotado na Amazônia reduz consideravelmente a evapotranspiração durante a entressafra, existe a possibilidade de manutenção da água do solo em função dos resíduos da cultura (HORTON et al., 1996), principalmente ao se adotar o plantio direto em safras futuras.

Outro detalhe é que com a adoção de práticas de manejo adequadas existe uma grande possibilidade de se aumentar a quantidade de carbono armazenado no solo através da agricultura (SAUERBECK, 2001; WEST; MARLAND, 2002). Sakai et al. (2004) observaram que o uso do solo para agricultura na Amazônia ocasionou um seqüestro de 3.100 kg C ha⁻¹ durante o ciclo do arroz, após um período de emissão de 900 kg C ha⁻¹ quando o solo permaneceu descoberto por dois meses.

No caso da soja, no entanto, Bernacchi et al. (2005), encontraram uma baixa eficiência no seqüestro do carbono, mesmo com adoção do plantio direto, sendo um emissor de 938 kg C ha⁻¹, após considerar que grande parte do carbono absorvido torna-se removido do campo através dos grãos, retornando de alguma forma para a atmosfera posteriormente.

Logo, a utilização de outras culturas durante o período de entressafra, caso haja viabilidade econômica, auxiliaria na redução do impacto gerado pela agricultura embora a decisão de qual cultura adotar gere impactos tanto no balanço hidrológico como no seqüestro de carbono da atmosfera.

4. CONCLUSÕES

A cultura da soja apresentou consumo máximo de água durante o período reprodutivo, com pico máximo de 4,1 mm dia⁻¹ durante o enchimento de grãos.

Durante o período vegetativo a perda de água pelo ecossistema ocorre em taxas elevadas, mesmo havendo menor área foliar. Tal fato ocorre devido a elevada disponibilidade de água e energia na região, influenciando a evaporação da água do solo.

A redução da área foliar observada neste ano pode ter sido a responsável por manter a evapotranspiração da soja próxima de 4 mm dia⁻¹, diferente dos valores já encontrados no Brasil durante máxima cobertura.

Embora a soja tenha apresentado maior consumo de água em relação ao ecossistema natural amazônico, durante o período de entressafra a evapotranspiração manteve-se em torno de 1 a 2 mm dia⁻¹ devido ao efeito combinado da ausência de vegetação e redução das chuvas no período.

O uso de outros tipos de culturas financeiramente viáveis durante o período da entressafra poderia minimizar consideravelmente a brusca mudança que ocorre no

processo de trocas gasosas entre a superfície e atmosfera da região logo após a colheita da soja.

5. REFERÊNCIAS

ALBERTO, C. M.; STRECK, N. A.; HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; MEDEIROS, S. L. P. Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 7, p. 1067-1075, 2006.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVES, F. S. M.; FISCH, G.; VENDRAME, I. F. Modificações do microclima e regime hidrológico devido ao desmatamento na Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 29, p. 395-409, 1998.

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. New York: Academic Press, 1998. 307 p.

BENCHIMO, R. L.; EL-HUSNY, J. C.; FILHO, A. S.; BARRIGA, J. P. **A mela da soja no estado do Pará nas safras de 2003 e 2005**. Belém: Embrapa-CPATU, 2005. 4p. Comunicado Técnico, 152.

BENINCASA, M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. Jaboticabal: Funep, 2003. 41 p

BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja, relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação de tanque “classe A” e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 243-259, 1986.

BERNACCHI, C. J.; HOLLINGER, S. E.; MEYERS, T. The conversion of the corn/soybean ecosystem to no-till agriculture may result in a carbon sink. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1867-1872, 2005.

BROWN, E. A.; CAVINESS, C. E.; BROWN, D. A. Response of selected soybean cultivars to soil moisture deficit. **Agron. J.**, v. 77, p. 274-278, 1985.

CHEN, S.; CHEN, J.; LIN, G.; ZHANG, W.; MIAO, H.; WEI, L.; HUANG, J.; HAN, X. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 129, p. 1800-1809, 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos-safra 2008/2009**. Brasília, 2009. 39 p.

CORREIA, F. W. S.; MANZI, A. O.; CANDIDO, L. A.; SANTOS, R. M. N.; PAULIQUEVIS, T. Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 39-43, 2007.

COSTA, J. P. R. **Modelagem e simulação das interações biosfera-atmosfera em plantio de soja na Amazônia**. 2008. 127 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido. Laboratório de Climatologia. **Normais climatológicas de Paragominas no período de 1980 a 1988**. Belém, 1988.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja: região Central do Brasil**. Brasília, 2008. 282 p. (Sistemas de produção, 12).

FARIAS, J. R. B.; ASSAD, E. D.; ALMEIDA, I. R.; EVANGELISTA, B. A.; LAZZAROTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular técnica, 48).

FEHR, W.R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. (Special Report, 80).

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Alterações micrometeorológicas na cultura da soja submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 27, n. 5, p. 661-669, 1992.

HORTON, R.; BRISTOW, K. L.; KLUITENBERG, G. J.; SAUER, T. J. Crop residues effects on surface radiation and energy balance – review. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 54, p. 27-37, 1996.

JARVIS, P. G.; McNAUGHTON, K. G. Stomatal control of transpiration-scaling up from leaf to region. **Advances in Ecological Research**, v. 15, p. 1-49, 1986.

JENDIROBA, E.; CÂMARA, G. M. S. Rendimento agrícola da cultura da soja sob diferentes fontes de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n. 8, p. 1201-1209, 1994.

MALHI, Y. R.; PEGORARO, E.; NOBRE, A. D.; PEREIRA, M. G. P.; GRACE, J.; CULF, A. D.; CLEMENT, R. The energy and water dynamics of a central Amazonian rain Forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 10, 2002.

MUCHOW, R. C.; SINCLAIR, T. R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. II. Field and model analyses. **Field Crop. Res.**, v. 15, p. 143-156, 1986.

MUELLER, C. C.; BUSTAMANTE, M. **Análise da expansão agrícola no Brasil**. Disponível em: <www.worldbank.org/rfpp/news/debates/mueller.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2006.

ORTEGA-FARIAS, S.; CUENCA, R. H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 81, p. 131-143, 1996.

OYA, T.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; TOBITA, S.; ITO, O. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars: evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivars in the field. **Plant Produc. Sci.**, v. 7, n. 2, p. 129-137, 2004.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141-150, 1999.

RANDOW, C. V.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M.; GASH, J.; ELBERS, J. A.; WATERLOO, M. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 5-26, 2004.

ROCHA, E. J. P. **Balanço de umidade e a influência das condições de contorno na precipitação da Amazônia**. 2001. 210 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.

ROSEMBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment**. 2.ed. New York: John Wiley, 1983. 495 p.

SAKAI, R. K.; FITZJARRALD, D. R.; MORAES, O. L. L.; STAEBLER, R. M.; ACEVEDO, O. C.; CZIKOWSKY, M. J.; SILVA, R.; BRAIT, E.; MIRANDA, V. Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in an Amazonian agricultural field. **Global Change Biology**, v. 10, p. 895-907, 2004.

SAKURATANI, T. Separate estimation of transpiration and evaporation from soybean field without water shortage. **Journal of Agricultural Meteorology**, v. 42, p. 309-317, 1987.

SAUER, T. J.; SINGER, J. W.; PRUEGER, J. H.; DESUTTER, T. M.; HATFIELD, J. L. Radiation balance and evaporation partitioning in a narrow-row soybean canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 145, p. 206-214, 2007.

SAUERBECK, D. R. CO₂ emissions and C sequestration by agriculture – perspective and limitations. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 60, p. 253-266, 2001.

SCHOFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. Contribuição relativa da temperatura do ar no desenvolvimento de três cultivares de soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 2, p. 97-104, 2002.

SCHOFFEL, E. R.; SACCOL, A. V.; MANFRON, P. A.; MEDEIROS, S. L. P. Excesso hídrico sobre os componentes de rendimento da cultura da soja. **Ciência Rural**, v. 32, n. 1, p. 7-72, 2001.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA – SAGRI. **Evolução da produção no estado do Pará por município de 1994 a 2008**. Disponível em: <www.sagri.pa.gov.br>. Acesso em: 12 maio 2009.

SINCLAIR, T. R.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L. Comparison of vegetative development in soybean cultivars for low-latitude environments.. **Field Crops Research**, v. 92, p. 53-59, 2005.

SIONIT, N.; KRAMER, P. J. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. **Agronomy Journal**, v. 69, p. 174-178, 1977.

SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; TOTA, J.; PEZZI, L.; FISCH, G.; NOBRE, C. On the influence of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. **Acta Amazônica**, v. 30, n. 2, p. 305-318, 2000.

SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; BISPO, C. J. C.; LOUREIRO, R. S.; SAMPAIO, L. S.; ROCHA, E. J. P. Análise do crescimento da soja na Amazônia. 2008. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15, 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2008b.

SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Impactos do avanço do plantio de soja no balanço de energia na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16, 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2009a.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 417-427, 2008.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 443-452, 2009.

THOMAS, A. L.; COSTA, J. A. Influencia do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, p. 1389-1396, 1994.

UNLAND, H. E.; HOUSER, P. R.; SHUTTLEWORTH, W. J.; WANG, Z. L. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 82, p. 119-153, 1996.

WERTH, D.; AVISSAR, R. The regional evapotranspiration of the Amazon. **Journal of Hydrometeorology**, v.5, p. 100-109, 2004.

WEST, T. O.; MARLAND, G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. **Agricultural, Ecosystems and Environment**, v. 91, p. 217-232, 2002.

CAPÍTULO 4

BALANÇO DE RADIAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia foi cenário durante anos de diversos estudos sobre o uso da terra e seus impactos socioeconômicos (SOARES-FILHO et al., 2005), hidrológicos (SANTIAGO, 2005) e climáticos (HENDERSON-SELLERS; GORNITZ, 1984; NOBRE et al., 1991).

Alguns resultados mostram que a substituição da floresta por áreas de pastagem na Amazônia ocasiona sérios impactos como aumento na temperatura do ar (NOBRE et al., 1991), aumento no albedo da superfície (RANDOW et al., 2004), redução da evapotranspiração (SANTIAGO, 2005). No entanto, maior parte destes trabalhos considera que a mudança de uso da terra se deu para o plantio de pastagem.

Com o avanço da fronteira agrícola nesta região, considerada como potencial fator para a mudança de cobertura e uso do solo, outro enfoque vem ganhando espaço e preocupando a comunidade ante as prováveis mudanças ambientais decorrentes do avanço da monocultura da soja na região (MUELLER; BUSTAMANTE, 2006; DANTAS; FONTELES, 2006; D'ÁVILA, 2006).

A rápida expansão de plantios da soja no país foi uma consequência do apoio do governo Brasileiro e das condições edafoclimáticas favoráveis ao seu desenvolvimento (MUELLER, 1992). Na região Amazônica, no entanto, este tipo de

atividade veio crescendo lentamente, mas começou a ganhar espaço devido a existência de condições favoráveis para a expansão da lavoura, aproveitando-se de áreas de transição cerrado-floresta ou mesmo em terras desmatadas ou degradadas já existentes (MUELLER; BUSTAMANTE, 2006).

A partir da década de 90 a soja chegava à Amazônia, mas seu cultivo (73 mil ha) em relação ao restante do país era ainda insignificante (MUELLER; BUSTAMANTE, 2006). No estado do Pará, a área plantada era de apenas 1,2 mil ha⁻¹ em 2000, mas a região já vinha recebendo incentivos governamentais desde 1994 para o aumento da produção de grãos, principalmente nas regiões de Santarém e Paragominas. No ano de 2006, a quantidade de área plantada no estado já chegava a 90 mil ha (SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA – SAGRI, 2009).

O desmatamento do ecossistema de floresta, para a produção de pasto, tem como consequência uma mudança no albedo de 12,9% para 18,4%, respectivamente (CULF et al., 1995; CULF et al., 1996; RANDOW et al., 2004). Randow et al. (2004) encontraram para a região sudoeste da Amazônia, valores de albedo de 13 e 20% para a floresta e pastagem, respectivamente. No entanto, a mudança da cobertura vegetal de floresta para o cultivo de soja, e mesmo o reaproveitamento de áreas de pastagem para o plantio da soja, ocasiona mudanças mais drásticas devido à sua fisiologia e à mudança na arquitetura que a cultura apresenta ao longo de seu ciclo (SOUZA et al., 2008a; SOUZA et al., 2009a).

Resultados de Costa et al. (2007) mostram que a substituição da floresta Amazônica para o plantio da soja ocasiona uma redução muito maior na precipitação da região quando comparado ao uso da terra para a pecuária, devido ao elevado albedo da soja. Considerando todo o ciclo da soja, Souza et al. (2008a) observaram um aumento médio relativo no albedo de 93% devido a este tipo de mudança no uso da terra, o que contribuiu sobremaneira para a redução no saldo de radiação.

Logo, é muito importante se avaliar e estudar o comportamento radiativo neste novo tipo de ecossistema Amazônico, uma vez que tais informações possibilitarão um melhor entendimento de como o clima local/regional poderá ser afetado pelo avanço do plantio de soja na Amazônia. O objetivo desta pesquisa foi quantificar os componentes do balanço de radiação em uma área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização

O experimento foi conduzido no município de Paragominas, situado na região nordeste do Estado do Pará cuja sede localiza-se a 320 km da cidade de Belém, capital do Estado. A escolha do município de Paragominas para a realização do estudo se deveu ao fato desta região ter sofrido uma grande expansão do cultivo da soja nos últimos anos.

O experimento foi realizado em 2006 e 2007, sendo utilizadas as variedades *Candeia* (ciclo tardio) e *Tracajá* (ciclo intermediário), respectivamente. Embora a variedade mais recomendada para região seja a Tracajá (EL-HUSNY et al., 2003a), utilizada no experimento de 2007, em 2006 usou-se a *Candeia* por ser uma nova variedade desenvolvida pela EMBRAPA, com boa aceitabilidade por parte dos produtores. A área experimental com plantio de soja ocupou uma extensão de cerca de 200 ha, localizada a 02°59'08" de latitude sul e 47°19'57" de longitude oeste.

No experimento de 2006 toda a área foi plantada mecanicamente, utilizando a técnica de plantio direto, em fileiras espaçadas de 0,45 m resultando em uma densidade de cerca de 222.000 plantas ha⁻¹. Em 2007, foi realizado plantio convencional mudando-se o espaçamento entre linhas para 0,50 m, o que resultou em uma densidade 200.000 plantas ha⁻¹. A semeadura foi realizada no dia 05 de fevereiro em 2006 e em 23 de fevereiro em 2007, a uma taxa de 26-28 sementes por metro quadrado e a colheita feita nos dias 15 e 21 de junho em 2006 e 2007, respectivamente.

Uma torre instrumentada de 3 metros de altura foi montada no centro da área, na qual foram instalados vários instrumentos meteorológicos ligados a um *datalogger* CR10X (Campbell Scientific, Inc.) e um multiplexador AM416 (Campbell Scientific, Inc.). A frequência de leitura de dados foi de 10 segundos com médias e totais sendo gravados a cada 10 minutos. O período de coleta de dados utilizado no estudo ficou compreendido entre os meses de fevereiro e junho de 2006 e 2007.

Na área onde os sensores foram instalados, foi realizado o plantio manual, obedecendo ao mesmo espaçamento e adubação do plantio mecanizado. Aos 20 dias após a semeadura, foi feito o desbaste da área interna dos sensores, com o objetivo de obedecer à mesma população do restante da área. Em ambos os experimentos foram realizados aplicação de herbicida e inseticida quando necessário.

2.2. Balanço de radiação

A radiação solar global foi monitorada usando-se um piranômetro CMP3 (Kipp & Zonen, Campbell Scientific) e a componente refletida da radiação solar foi medida utilizando-se um piranômetro invertido. O sensor foi instalado a 2,5 m de altura.

A radiação global transmitida ao solo foi medida continuamente por um tubo solarímetro (TSL, Delta-T Devices Ltda.) instalado diagonalmente entre as linhas conforme sugerido por Pengelly et al. (1999). Desta forma, a radiação interceptada pela cobertura torna-se mais representativa do intervalo diário do que quando se realizam medidas pontuais próximo ao meio dia solar (SINCLAIR; HORIE, 1989).

O saldo de radiação de ondas longas (Bol) foi obtido como resíduo do balanço de radiação da superfície:

$$Bol = R_{net} - (Q_g - Q_r) \quad (1)$$

em que Q_g é a radiação global incidente e Q_r é a radiação global refletida e R_{net} o saldo global de radiação, o qual foi monitorado continuamente por meio de um saldo radiômetro (NR-Lite, Campbell Scientific).

2.3. Avaliação do desenvolvimento

A determinação das fases fenológicas da soja foi feita pelo monitoramento diário seguindo a escala de Fehr e Caviness (1977), conforme Tabela 1A e Figura 1B apresentadas nos Apêndices A e B, respectivamente, em um experimento inteiramente casualizado. Após a fase vegetativa V10, decidiu-se por avaliar apenas o início do florescimento em diante, devido à maioria das parcelas observadas apresentarem uma variação muito grande nas fases dentro de uma mesma linha, dificultando o acompanhamento do desenvolvimento da cultura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Condições meteorológicas durante o experimento da soja

A Tabela 1 apresenta a disponibilidade hídrica e a temperatura média do ar em cada fase do ciclo da soja nos dois anos do experimento. Durante o experimento de 2007 verificou-se uma redução nos totais de chuva, a qual foi responsável pela redução na área foliar em relação ao experimento de 2006.

Tabela 1 – Condições meteorológicas durante o ciclo da soja

Fases	Duração (dias)		Chuva (mm)		Tar (°C)		Tmin (°C)	
	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007
Vegetativa	47	44	336,0	184,2	27,2	25,2	24,13	22,14
Florescimento	11	11	135,1	36,0	26,5	25,4	24,06	22,40
Frutificação	11	17	175,0	105,2	26,9	25,2	23,71	22,06
Enchimento de grãos	45	33	336,8	61,6	26,8	25,7	23,53	21,81
Maturação	16	14	29,3	23,4	27,2	25,5	21,88	20,96
Total/média	130	119	1012,2	410,4	26,9	25,4	23,5	21,90

A redução nos totais de chuva em 2007 pode ter sido causada por uma anomalia positiva na temperatura do oceano pacífico observado entre outubro de 2006 e abril de 2007, indicando a ocorrência de um evento de El Niño (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE, 2007). Apesar de ter ocorrido mais chuvas durante o ciclo de 2006, a temperatura média do ar esteve sempre acima da observada em 2007.

A causa provável para a discordância na temperatura entre os dois ciclos de produção da soja pode estar associada a dois fatores; a ocorrência de menores temperaturas mínimas em 2007 em resposta a menor nebulosidade e maior perda radiativa na forma de onda longa verificada neste ano, que pode ter contribuído para uma menor média diária; e outro ponto importante e o mais provável, é que o experimento de 2007 foi realizado a 12 km de distância do sítio anterior, existindo nesta nova área um rio com uma mata ciliar há cerca de 2 km do local, no quadrante de

predominância do vento, fazendo com que a temperatura observada apresentasse uma redução de cerca de 1,5°C em relação ao primeiro sítio.

3.2. Balanço de ondas curtas

3.2.1. Dias parcialmente nublados

3.2.1.1. Radiação incidente

Durante todo o experimento de ambos os anos o céu apresentou-se parcialmente nublado ou completamente nublado, não havendo condições de céu claro devido o ciclo coincidir com o período chuvoso da região. No experimento de 2006 sob condições de céu parcialmente nublado a radiação global apresentou picos entre 910 e 1050 W.m⁻² durante todo o ciclo da cultura (Figura 1).

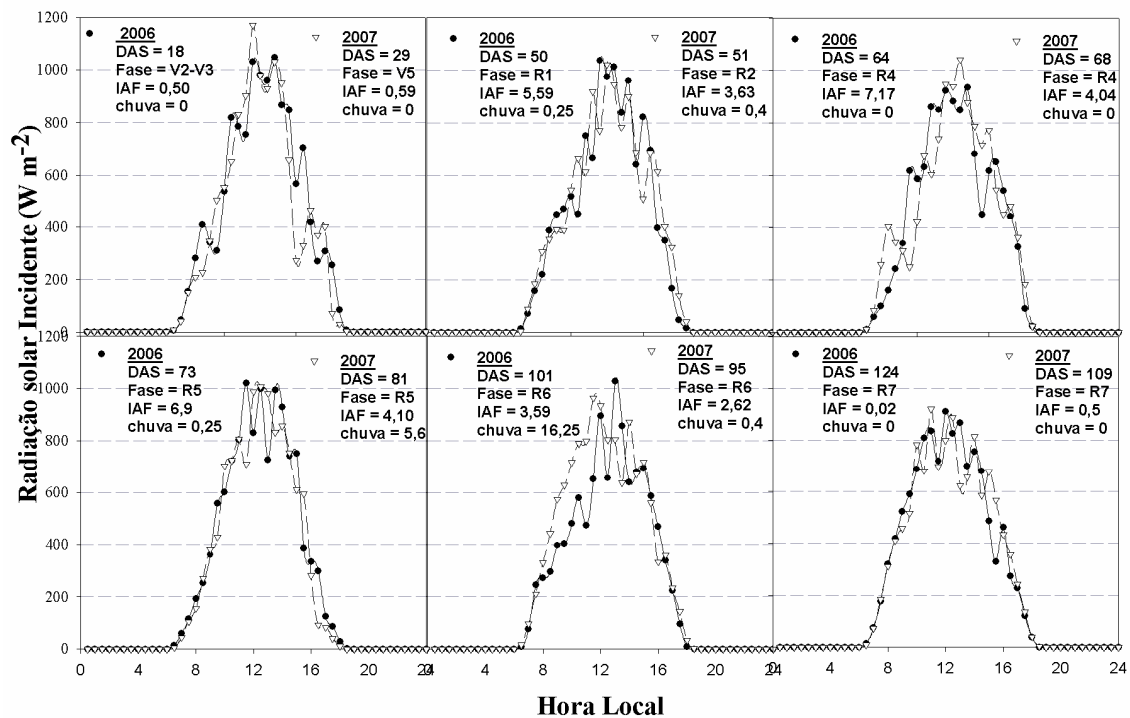


Figura 1 – Ciclo diário da radiação solar incidente em diferentes fases da soja em dias com pouca nebulosidade (círculo: 2006, triângulo: 2007).

Apesar de haver menos chuva e menor grau de nebulosidade em 2007, durante dias parcialmente nublados a radiação global apresentou comportamento semelhante ao observado em 2006, com picos variando de 920 a 1.170 W.m⁻² durante todo o ciclo (Figura 1). No entanto, a redução na quantidade de chuvas influenciou diretamente o desenvolvimento foliar da cultura alterando a transmissão de radiação ao longo do dossel.

3.2.1.2. Radiação interceptada

Nota-se uma considerável mudança na radiação que atinge o solo em função do desenvolvimento da cultura (Figura 2). Durante o ano de 2006 cerca de 97% da radiação incidente atingia o solo no início da fase vegetativa (18 DAS e IAF = 0,50). Com o aumento da cobertura vegetal, a fração da radiação que atinge o solo reduziu para 18,5% durante o florescimento (IAF = 5,59), permanecendo abaixo de 10% até o final da fase de enchimento de grãos quando o IAF já havia atingido seu máximo valor e iniciava uma progressiva redução (IAF = 6,9).

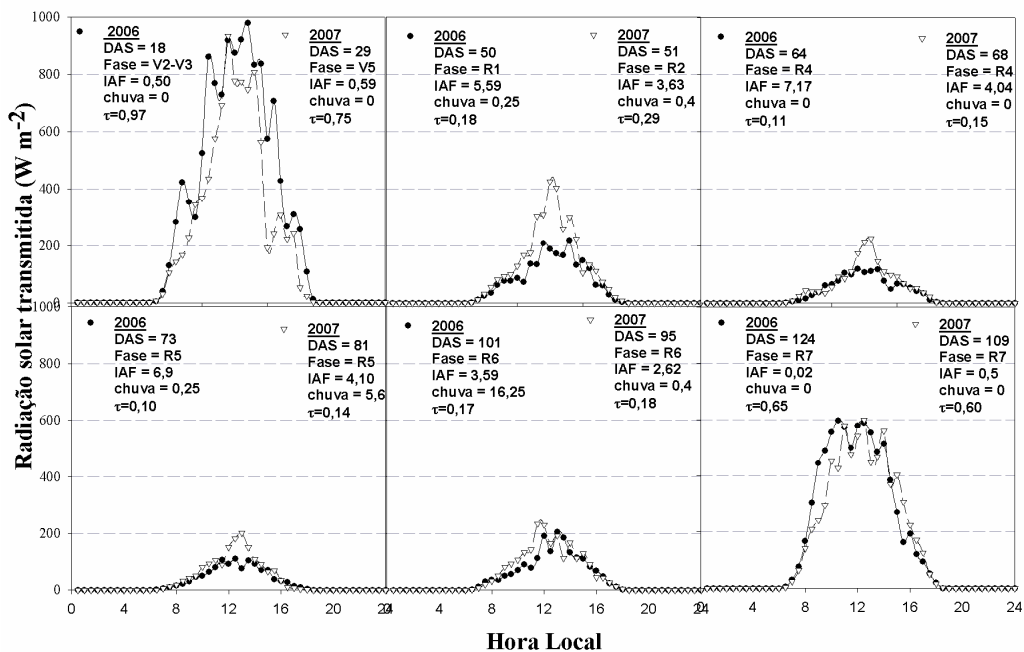


Figura 2 – Ciclo diário da radiação transmitida ao solo em diferentes fases da soja em dias com pouca nebulosidade (círculo: 2006, triângulo: 2007).

Somente durante a maturação é que se observa um aumento na fração da radiação que atinge o solo (65,4%), valor menor do que durante o início vegetativo, mesmo com IAF próximo de zero. Esta característica é atribuída à diferença que existe na interceptação da radiação quando a planta ainda é jovem apresentando menor porte com folhas verdes e quando a mesma, com maior porte, começa a perder folhas até apresentar apenas material senescente (SAUER et al., 2007).

Em 2007, cerca de 74% da radiação atingia o solo durante a fase vegetativa com IAF de 0,59 (fase V5), mas na fase de florescimento quando o IAF era de 3,63 a radiação que chegava ao solo ainda representava 29% da global, indicando pouca interceptação da radiação pela cultura neste ano. A partir da frutificação até a fase de vagem cheia a soja continuou interceptando apenas entre 82 e 86% da radiação global, diferente de 2006 quando se observou interceptação de até 90% durante a fase de enchimento de grãos. Apesar desta diferença causada pela restrição hídrica, durante a maturação o comportamento foi similar ao de 2006, apresentando 60,6% de radiação atingindo o solo.

3.2.1.3. Radiação refletida

Da mesma forma que a radiação transmitida ao solo, a radiação refletida pela cultura apresentou uma importante variação ao longo do ciclo sendo diretamente dependente da evolução na cobertura vegetal (Figura 3). O albedo da soja variou de 16% durante a fase vegetativa para valores de 22% quando o dossel encontrava-se totalmente fechado sob condições de céu parcialmente nublado. Maiores detalhes sobre a evolução e características do albedo da soja podem ser encontrados em Souza et al. (2009c).

Mesmo com a redução na chuva em 2007 a radiação refletida não apresentou muita diferença do comportamento encontrado em 2006. No entanto, com a redução na área foliar neste ano, o albedo durante a fase de vagem cheia (R6) permaneceu elevado devido à exposição precoce do solo que estando mais seco, contribuiu para uma maior reflexão (17,9% em 2006 e 22,1% em 2007). De acordo com Dalmolin et al. (2005), quanto maior o teor de umidade nos solos eles se tornam mais escuros reduzindo, assim, a reflexão da superfície.

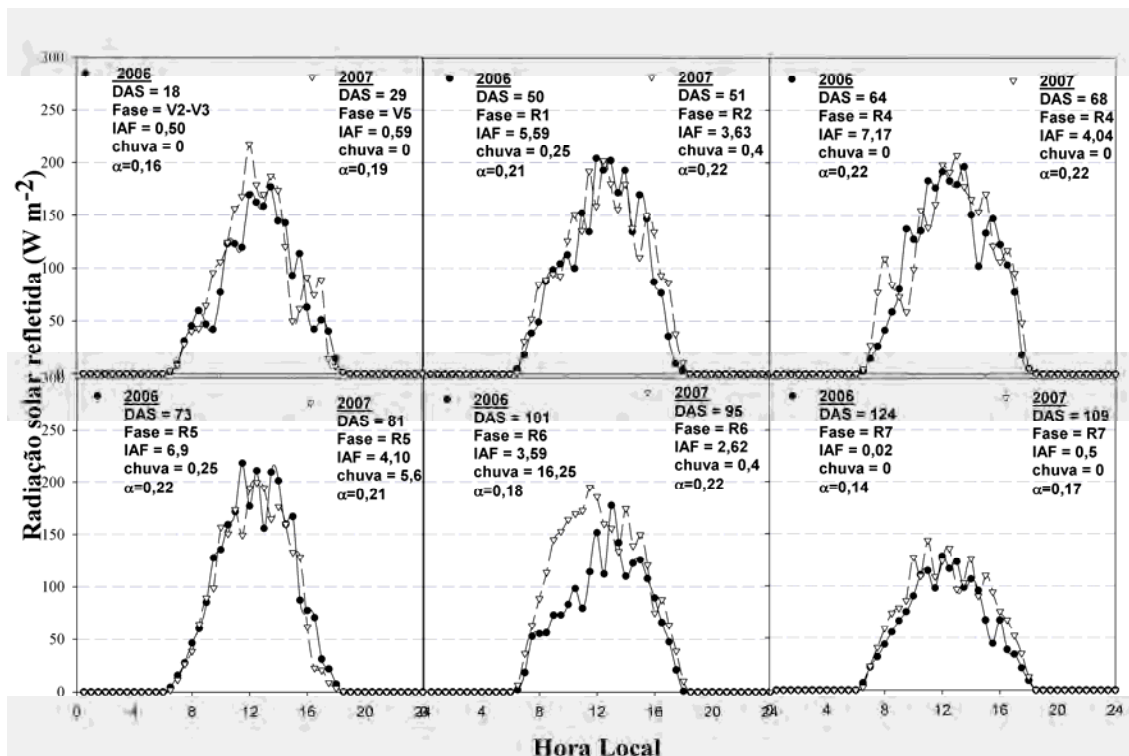


Figura 3 – Ciclo diário da radiação refletida em diferentes fases da soja em dias com pouca nebulosidade (círculo: 2006, triângulo: 2007).

3.2.2. Dias nublados

3.2.2.1. Radiação incidente

Em 2006 durante dias nublados a radiação incidente apresentou maior variabilidade ao longo do dia, oscilando de 400 até no máximo 800 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, uma redução de 57% no valor médio diário observado em dias menos nublados no mesmo ano (Figura 4).

Em decorrência do experimento de 2007 ter sido menos chuvoso em relação ao de 2006, percebe-se que o ciclo diário da radiação global apresentou menor variação mesmo em dias considerados nublados, com máximos oscilando entre 600 e 800 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, e devido a maior simetria na curva diária apresentou valores médios diários acima dos encontrados em 2006 para as mesmas condições de nebulosidade (Tabela 2).

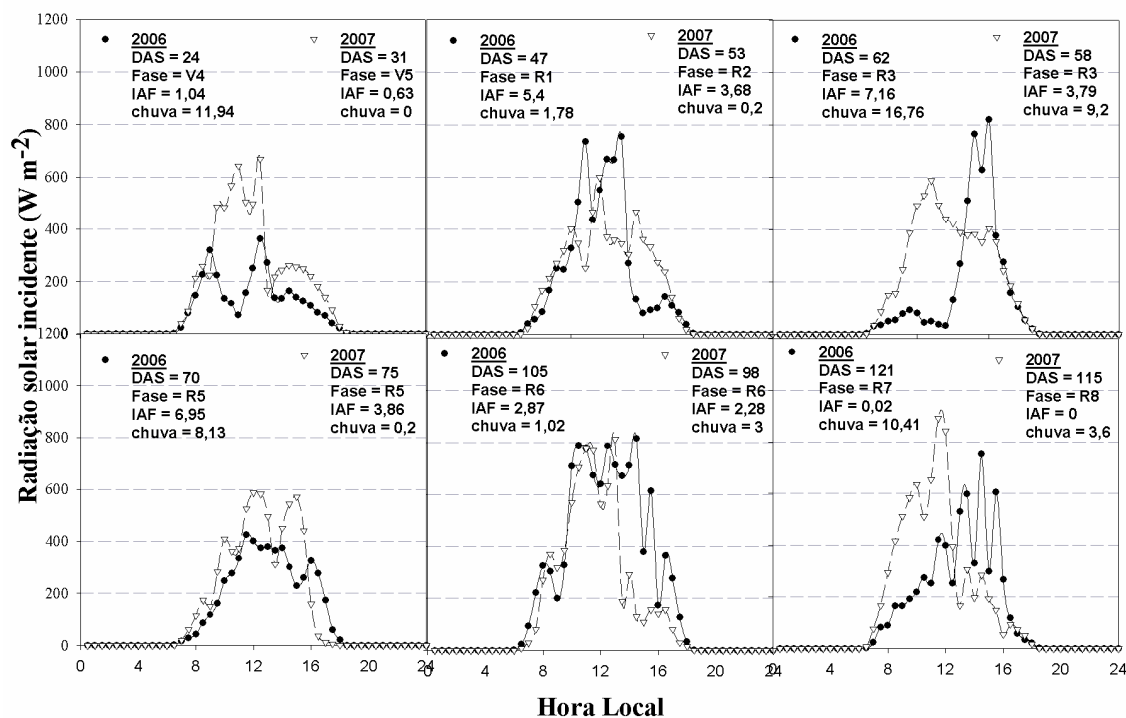


Figura 4 – Ciclo diário da radiação solar incidente em diferentes fases da soja em dias nublados (circulo: 2006, triângulo: 2007).

Tabela 2 – Média diária dos componentes do balanço de radiação na soja na Amazônia

Fases	Q_g (MJ m ⁻² d ⁻¹)		Q_r (MJ m ⁻² d ⁻¹)		Q_{trans} (MJ m ⁻² d ⁻¹)		R_{net} (MJ m ⁻² d ⁻¹)		Bol (MJ m ⁻² d ⁻¹)	
	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007
Vegetativa	17,9 (±0,3)	19,3 (±0,4)	3,0 (±0,1)	3,3 (±0,1)	13,1 (±0,3)	15,7 (±0,3)	10,6 (±0,2)	12,0 (±0,3)	-4,2 (±0)	-4,1 (±0,1)
Florescimento	17,2 (±0,7)	18,5 (±0,7)	3,7 (±0,1)	3,7 (±0,1)	2,8 (±0,1)	6,2 (±0,3)	10,5 (±0,5)	11,0 (±0,4)	-3,0 (±0)	-3,7 (±0,1)
Frutificação	18,2 (±0,6)	18,7 (±0,6)	4,1 (±0,1)	4,0 (±0,1)	2,0 (±0,1)	3,3 (±0,1)	11,1 (±0,4)	10,9 (±0,4)	-2,9 (±0,1)	-3,9 (±0,1)
Enchim. grãos	16,2 (±0,3)	20,1 (±0,5)	3,4 (±0,1)	4,4 (±0,1)	1,6 (±0)	2,7 (±0,1)	9,8 (±0,2)	11,5 (±0,3)	-3,0 (±0)	-4,2 (±0,1)
Vagem cheia	17,8 (±0,4)	19,5 (±0,6)	3,0 (±0,1)	4,1 (±0,1)	5,8 (±0,2)	4,9 (±0,2)	11,7 (±0,3)	11,1 (±0,4)	-3,7 (±0)	-4,2 (±0,1)
Maturação	19,3 (±0,4)	18,9 (±0,6)	2,7 (±0,1)	3,1 (±0,1)	12,5 (±0,3)	11,2 (±0,4)	11,3 (±0,3)	11,3 (±0,4)	-5,2 (±0,1)	-4,5 (±0,1)

3.2.2.2. Radiação interceptada

Apesar de haver pouca radiação incidindo sobre a cultura nos dias nublados, menos irradiância era transmitida ao solo durante a fase vegetativa em 2006 (72%). Durante a mesma fase em dias menos nublados esta fração foi de 92% mesmo com uma diferença bem pequena no IAF. Isto mostra a importância da componente difusa na interceptação da radiação pelas culturas (Figura 5).

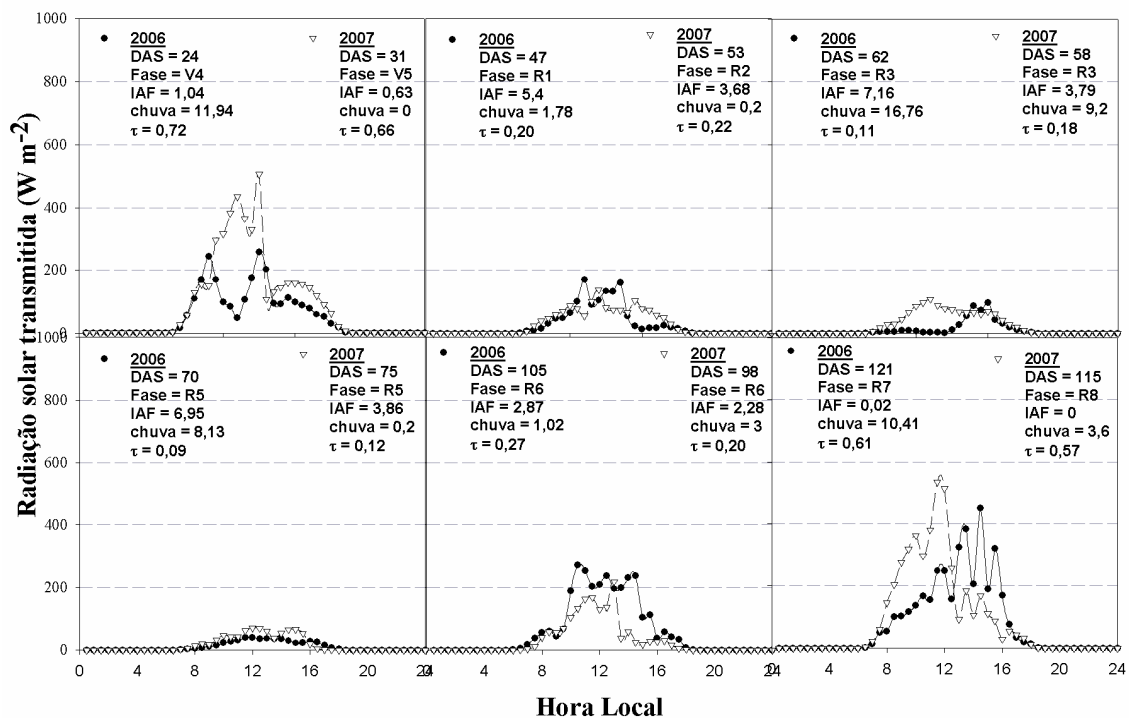


Figura 5 – Ciclo diário da radiação transmitida ao solo em diferentes fases da soja em dias nublados (círculo: 2006, triângulo: 2007).

A partir do florescimento até a fase de enchimento de grãos, a fração de radiação que atinge o solo apresentou variação semelhante aos dias parcialmente nublados, decrescendo gradativamente de 19,9 a 9,27%. Durante estas fases o IAF apresentou-se sempre acima de 5, sugerindo que sob condições de dossel fechado a soja apresenta a mesma característica em interceptar a radiação, independente do grau de nebulosidade. Na fase de maturação a fração de radiação que chega ao solo aumentou para 60,7%, um pouco menor do que o observado para a mesma fase em dias parcialmente nublados (65%) como consequência do maior grau de radiação difusa.

Apesar do menor grau de nebulosidade em 2007, portanto menor quantidade difusa da radiação em relação ao experimento de 2006, nos dias considerados nublados, observou-se característica semelhante entre os anos na interação da soja com a radiação solar sob condições de dossel incompleto em comparação aos dias parcialmente nublados. Durante a fase vegetativa cerca de 66% da radiação atingia o solo, enquanto que em dias parcialmente nublados esta fração era de 74%, redução também observada em 2006.

Em 2007, no entanto, a redução da área foliar causada pela diminuição da oferta hídrica modificou toda a interação com a radiação durante as fases em que se esperava que o dossel estivesse completo (R1 até R5). Durante este período, observou-se comportamento semelhante ao observado em 2006, mas levemente diferente do encontrado durante cobertura incompleta.

Em ambos os anos, em dias nublados, menos radiação atingia o solo devido à penetração de mais radiação difusa. Mas em 2007, porém, em dias parcialmente nublados, a soja interceptou menos radiação mesmo durante período de elevado IAF, diferentemente do observado em 2006 quando a soja apresentou característica similar em interceptar a radiação independente do grau de nebulosidade.

3.2.2.3. Radiação refletida

Em dias nublados a radiação refletida pela cultura foi maior entre as fases de florescimento e enchimento de grãos (IAF >5) em comparação aos dias parcialmente nublados. Durante a fase vegetativa, vagem cheia e de maturação, quando a cobertura estava incompleta, o albedo apresentou valores menores do que em dias parcialmente nublados (Figura 6).

Novamente percebe-se a importância do fechamento do dossel na interação da cultura com a radiação solar, pois durante dias nublados a radiação solar incidente além de apresentar redução em intensidade apresenta uma alteração na sua qualidade, fazendo com que algumas superfícies apresentem reflexão diferenciada em função do espectro da radiação incidente (BLAD; BACKER, 1972). Em dias nublados, a soja apresentou albedo variando de 14,4% durante a fase vegetativa para valores de 23,9% durante a fase de enchimento de grãos em ambos os anos.

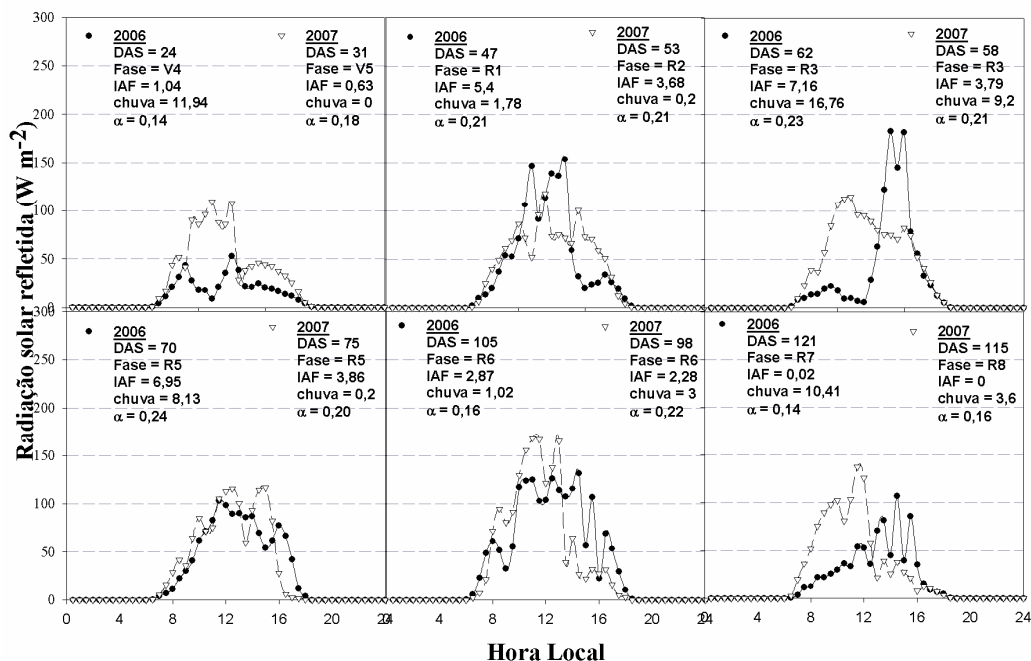


Figura 6 – Ciclo diário da radiação refletida em diferentes fases da soja em dias nublados (círculo: 2006, triângulo: 2007).

3.3. Balanço de ondas longas

3.3.1. Dias parcialmente nublados

A cobertura foliar teve efeito direto no balanço de ondas longas (Figura 7). Nos dois ciclos da soja o saldo de ondas longas apresentou a mesma variação ao longo do dia durante fechamento incompleto do dossel. Nota-se a ocorrência de picos instantâneos próximos de 150 w m^{-2} em torno do meio dia solar como resultado do efeito da temperatura da superfície na emissão de radiação.

Durante o período noturno, o saldo de ondas longas variou entre 25 e 30 w m^{-2} , independente da fase da cultura. A predominância de valores negativos no saldo de ondas longas sugere que a perda radiativa pela superfície foi sempre superior à contra-irradiação, sendo dependente, neste caso, da evolução da cobertura foliar semelhante ao encontrado por Fontana et al. (1991a).

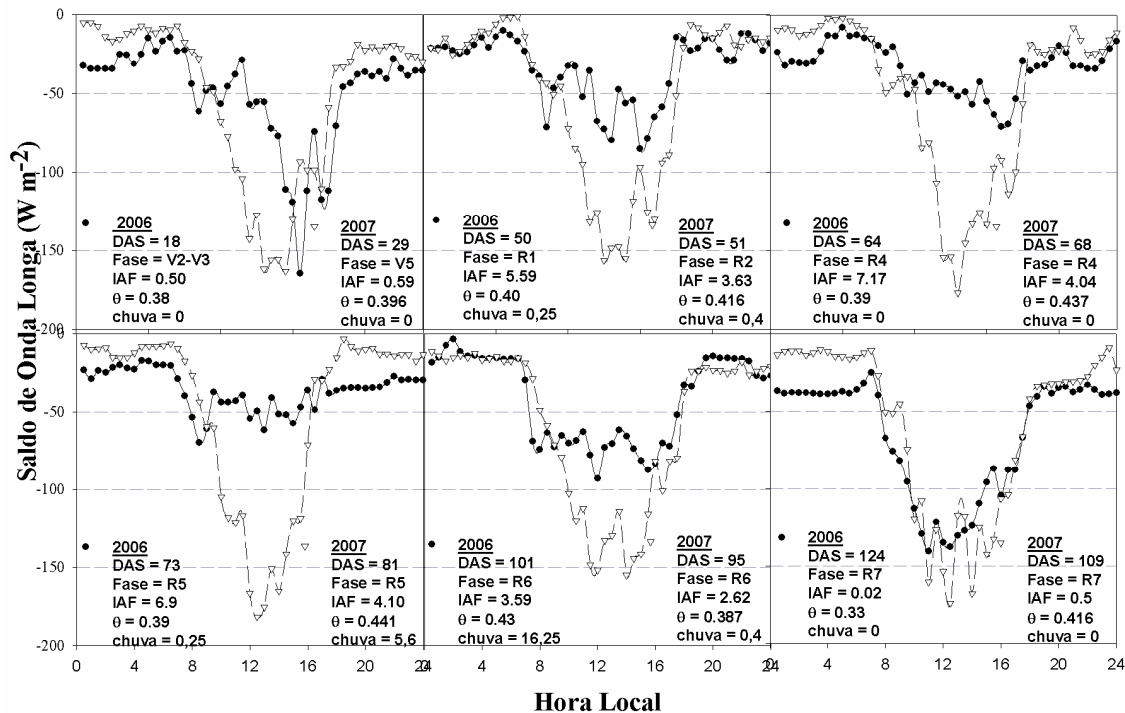


Figura 7 – Ciclo diário do saldo de onda longa ao longo do ciclo da soja em dias com pouca nebulosidade (círculo: 2006, triângulo: 2007).

Com o fechamento do dossel, nota-se uma redução no saldo de ondas longas em decorrência da diminuição da perda radiativa pela superfície. Com o aumento da área foliar e menor exposição do solo, há um aumento na energia gasta na evapotranspiração, contribuindo para uma redução na temperatura da superfície o que influencia diretamente a emissão de ondas longas (SOUZA et al., 2007). Outro fato é que com o aumento da área foliar, aumenta-se a radiação refletida reduzindo a quantidade disponível na forma de ondas curtas (SOUZA et al., 2009c).

No entanto, durante o experimento de 2007 não foi observado o mesmo efeito da cobertura foliar no saldo de ondas longas. Embora com menor área foliar, o comportamento durante as fases de cobertura plena em 2007 foi semelhante ao observado durante períodos com cobertura incompleta, com picos instantâneos da mesma magnitude (150 w.m^{-2}). Este comportamento pode estar associado tanto a redução na área foliar como a restrição hídrica ocorridas neste ano, o que pode ter afetado a emissão de ondas longas pela soja.

3.3.2. Dias nublados

Durante dias nublados o saldo de ondas longas apresentou o mesmo comportamento observado em condições de menor cobertura de nuvens, mas com menor magnitude (Figura 8). Este fato é decorrente do aumento esperado na contra-irradiação que contribuiu para uma redução média de 17,7% no saldo médio diário de ondas longas durante o ciclo de 2006 e de 31,8% no ciclo de 2007.

O aumento na cobertura foliar teve o mesmo efeito na redução da emissão radiativa. Durante fechamento incompleto do dossel, o ciclo diário do saldo de ondas longas apresentou características semelhantes durante os dois ciclos da soja (2006 e 2007).

Durante as demais fases fenológicas da soja, nota-se uma leve redução nos valores instantâneos do saldo de onda longa, especialmente sob boas condições de disponibilidade de água (2006). Todavia, esta pequena diferença observada até antes da maturação, sugere que em dias nublados o efeito da contra-irradiação exerce um papel importante no controle do saldo de radiação de ondas longas ao longo do ciclo da cultura, atribuindo ao desenvolvimento do dossel um papel secundário neste controle.

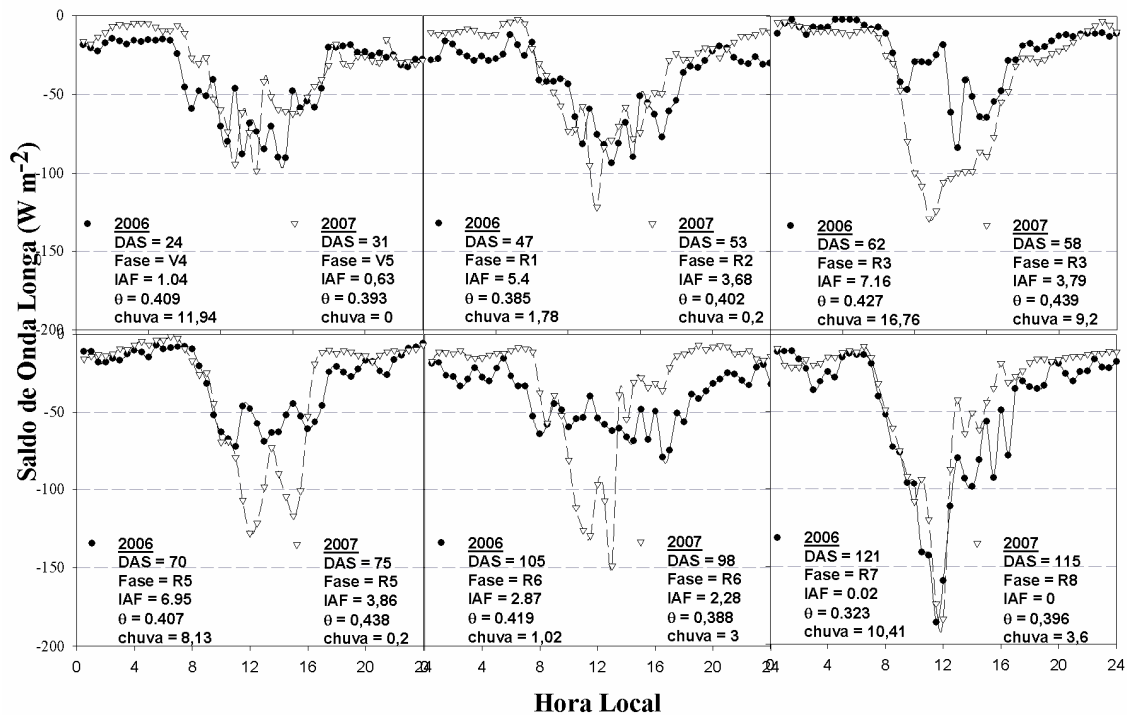


Figura 8 – Ciclo diário do saldo de onda longa ao longo do ciclo da soja em dias nublados (círculo: 2006, triângulo: 2007).

3.4. Balanço global de radiação

Apesar de todas as particularidades observadas entre dias nublados e menos nublados, percebe-se que o saldo de radiação entre os anos não foi muito diferente (Tabela 2). Embora o ano de 2007 tenha sido mais seco comparado a 2006, o saldo de radiação resultante em algumas fases foi superior, principalmente no período vegetativo e durante o período de enchimento de grãos. A provável causa pode estar ligada a maior incidência de radiação global em 2007 já que durante estas fases a energia perdida por reflexão foi muito maior do que em 2006.

Ressalta-se, no entanto, que independente das diferenças encontradas decorrente das distintas condições meteorológicas entre os anos, há uma pequena variação ao longo do ciclo no valor médio diário do saldo de energia. Esta mudança ao longo do ciclo é função direta da arquitetura do dossel e da fisiologia da cultura da soja, a qual intercepta, reflete e emite radiação diferentemente em cada fase fenológica.

A questão relacionada ao uso da terra para fins agrícolas na Amazônia é que existe uma constante mudança no albedo e na perda por ondas longas ao longo do ciclo da cultura, ao contrário do que ocorre na pastagem. Espera-se como consequência desta característica da soja um impacto muito maior nos processos de troca entre superfície e atmosfera durante um único período do ano.

4. CONCLUSÕES

O monocultivo da soja na Amazônia ocasiona uma alteração na interação entre a radiação e o ecossistema, tendo como consequência uma redução na energia disponível ao longo do ciclo devido o aumento na reflexão da superfície e na emissão de ondas longas. O continuo aumento no albedo da superfície foi o principal controlador do saldo de radiação na soja.

Em dias nublados o efeito da emissão de ondas longas pela superfície se torna secundário no controle do saldo de ondas longas, havendo maior importância da contra-radiação.

A soja apresenta comportamento semelhante na interceptação da radiação durante período de cobertura plena da superfície independente da cobertura de nuvens.

Durante fechamento incompleto do dossel a soja intercepta mais radiação durante dias nublados mesmo com menor radiação incidente, sugerindo a importância da componente difusa neste processo.

5. REFERÊNCIAS

BLAD, B. L.; BACKER, D. G. Reflected radiation from a soybean crop. **Agronomy Journal**, v. 64, p. 277-280, 1972.

COSTA, M. H.; YANAGY, S. M. N.; PONTE DE SOUZA, P. J. O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 34, 2007.

CULF, A. D.; FISCH, G.; HODNETT, H. G. The albedo of Amazonian forest and ranch land. **Journal of Climate**, Washington, v. 8, p. 1544-1554, 1995.

CULF, A. D.; ESTEVES, J. L.; MARQUES FILHO, A. O.; ROCHA, H. R. Radiation temperature and humidity over forest and pasture in Amazônia. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C.; ROBERTS, J.; VICTORIA, R. L. (Eds.). **Amazonian deforestation and climate**. Chichester: John Wiley, 1996. p. 175-191.

DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 481-489, 2005.

DANTAS, T. M.; FONTELES, L. V. **Avanço da fronteira agrícola na Amazônia**. Disponível em: <<http://www.oktiva.net/sispub/anexo/9168>>. Acesso em: 15 out. 2006.

D'AVILA, N. **Desmatamento na Amazônia: o novo nome da soja**. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/agronegocio/14.shtml>>. Acesso em: 2 maio 2006.

EL-HUSNY, J. C.; ANDRADE, E. B.; SOUZA, F. R. S.; FILHO, A. S.; KEPLER, D.; ALMEIDA, L. A.; MEYER, M. C. **Recomendação de cultivares de soja para microrregião de Paragominas, Pará**. Belém: Embrapa-CPATU, 2003a. 6 p. (Comunicado técnico, 82).

FEHR, W.R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. (Special Report, 80).

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 3, p. 403-410, 1991a.

HENDERSON-SELLERS, A.; GORNITZ, V. Possible climatic impacts of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation. **Climatic Change**, v. 6, p. 231-257, 1984.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. **Monitoramento e previsão do fenômeno El-Niño**. Disponível em: <www.cptec.inpe.br/enos>. Acesso em: 15 jul. 2007.

MUELLER, C. C. **Dinâmica, condicionantes e impactos sócio-ambientais da evolução da fronteira agrícola no Brasil**. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza, 1992. (Documento de trabalho, 7).

MUELLER, C. C.; BUSTAMANTE, M. **Análise da expansão agrícola no Brasil**. Disponível em: <www.worldbank.org/rfpp/news/debates/mueller.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2006.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, Washington, v. 4, n. 10, p. 957-987, 1991.

PENGELLY, B. C.; BLAMEY, F. P. C.; MUCHOW, R. C. Radiation interception and accumulation of biomass and nitrogen by soybean and three tropical annual forage legumes. **Field Crops Res.**, v. 63, p. 99-112, 1999.

RANDOW, C. V.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M.; GASH, J.; ELBERS, J. A.; WATERLOO, M. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 5-26, 2004.

SANTIAGO, A. V. **Simulações dos efeitos da cobertura vegetal no balanço hídrico da bacia do rio Ji-Paraná, RO**. 2005. 70 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

SAUER, T. J.; SINGER, J. W.; PRUEGER, J. H.; DESUTTER, T. M.; HATFILED, J. L. Radiation balance and evaporation partitioning in a narrow-row soybean canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 145, p. 206-214, 2007.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA – SAGRI. **Evolução da produção no estado do Pará por município de 1994 a 2008**. Disponível em: <www.sagri.pa.gov.br>. Acesso em: 12 maio 2009.

SINCLAIR, T. R.; HORIE, T. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. **Crop Science**, v. 29, p. 90-98, 1989.

SOARES-FILHO, B. S.; NEPSTAD, D. C.; CURRAN, L.; CERQUEIRA, G.; GARCIA, R. A.; RAMOS, C. A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; VOLL, E.; McGRATH, D. Cenários de desmatamento para Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 54, p. 138-152, 2005.

SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C.; SOUSA, A. M. L. Balanço de energia na soja em áreas de fronteira agrícola na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007, Aracaju. **CD-ROM...** Aracaju: SBAGRO, 2007.

SOUZA, P. J. O. P.; ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, A.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C. Impactos no albedo em consequência do avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, n. 1, p. 87-95, 2008a.

SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Impactos do avanço do plantio de soja no balanço de energia na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16, 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2009a.

SOUZA, P. J. O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C. Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, 2009c (no prelo).

CAPÍTULO 5

ALBEDO DA SOJA

(Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 1, p.65-73, 2010)

ALBEDO DA CULTURA DA SOJA EM ÁREA DE AVANÇO DA FRONTEIRA AGRÍCOLA NA AMAZÔNIA¹

Paulo J. de O. P. de Souza², Aristides Ribeiro², Edson J. P. da Rocha³, Renata S. Loureiro³, Carlos J. C. Bispo³ & Adriano M. L. Sousa³

Resumo: O avanço da fronteira agrícola na Amazônia pode acarretar graves impactos ambientais, constituindo a mudança no albedo da superfície um dos principais forçantes. Avaliou-se, neste trabalho, o albedo da soja (*Glycine Max* (L.) Merrill), plantada em condições naturais de campo, na cidade de Paragominas, PA, região com grande avanço da fronteira agrícola na Amazônia, e se observou relação direta entre o albedo da soja e o seu índice de área foliar, valor máximo diário variando entre 0,24 e 0,25 associado a um IAF de 7,17 correspondente a 1297,62 graus-dia acumulados. Em termos médios, encontrou-se que a o estágio fenológico mais crítico da cultura, tendo como base a mudança no albedo, é o estágio fenológico de frutificação na qual a mesma apresenta um albedo médio máximo de 23,3% ($\pm 0,0007$). Modelos empíricos foram ajustados para simular a variação diária do albedo em função do IAF e umidade do solo, ao longo do ciclo, e a variação diurna do albedo na elevação solar, para cada estágio fenológico da soja.

Palavras-chave: Mudança no uso da terra, Refletância, Monocultura.

¹ Parte integrante de tese de Doutorado do primeiro autor.

² DEA/UFV - Av. P.H. Rolfs, s/n - CEP 36570-000, Viçosa, MG. Fone: (31) 3891-6483. e-mail: paulo.jorge@ufra.edu.br e ribeiro@ufv.br.

³ DM/UFPA - Av. Augusto Corrêa, 1 - Guamá - CEP 66075-110, Belém, PA. Fone: (91) 3272-8743. e-mail: eprocha@ufpa.br, renatasloureiro@hotmail.com, ccapela@ufpa.br e marlison@hotmail.com.

SOYBEAN ALBEDO IN AN AREA OF ADVANCEMENT OF THE AGRICULTURAL FRONTIER IN THE AMAZON

Abstract: The soybean expansion in the Amazonia has been increasing considerably in last years, whose consequences can be serious environmental impacts. In this paper the soybean albedo (*Glycine Max* (L.) Merrill) was evaluated, which was planted in natural field conditions in Paragominas city (PA), a region representative of agricultural expansion in Amazonia. It was observed a direct relationship between soybean albedo and its foliar area index (FAI), showing a daily maximum value between 0.24 and 0.25 associated to a LAI of 7.17, when soybean has accumulated 1297.62 Degree-days. It was found that the most critical phase of the crop based on change in surface albedo, is the fructification phase, when albedo shows a maximum mean value of 0.23 (± 0.0007). Empiric models were fit to simulate the daily variation of the albedo in function of FAI and soil humidity during the cycle, and to simulate the diurnal variation of the albedo in function of solar elevation, for each soybean phase.

Keywords: Land use change, Reflectance, Monoculture.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o avanço da fronteira agrícola na Amazônia vem-se estendendo a olhos vistos, deixando toda a sociedade sobressaltada em relação a possíveis mudanças no padrão das trocas de superfície, tendo como principal atrativo a monocultura da soja (DANTAS; FONTELES, 2006; D'ÁVILA, 2006; MUELLER; BUSTAMANTE, 2006). Segundo Mueller (1992), a rápida expansão da soja no Brasil foi consequência de dois fatores importantes: do apoio do governo brasileiro e das condições edafoclimáticas favoráveis ao seu desenvolvimento.

A cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) foi introduzida no País em torno de 1882, no estado da Bahia, vinda dos Estados Unidos; uma década depois, foi testada nas condições de São Paulo, mas sua expansão só obteve considerável êxito quando foi levada para o Rio Grande do Sul, em 1900, cujas condições climáticas eram similares às da região de origem (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2005).

De acordo com Igreja et al. (1988), a partir da década de 80 a soja se expandiu para outras regiões, como os estados de Goiás, Oeste de Minas Gerais, Sul do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul; em alguns casos, como no cerrado, a expansão da soja ocorreu devido ao tipo de relevo da região, à fácil correção química do solo e ao apoio técnico-científico oferecido pelo Governo (ANDERSON et al., 2003).

Na década de 2000 a soja chegava à Amazônia mas seu cultivo (73 mil ha) em relação ao restante do País, era ainda insignificante (MUELLER; BUSTAMANTE,

2006). No estado do Pará, mais especificamente, a área plantada era de apenas 1,2 mil ha no ano de 2000, porém a região já vinha recebendo incentivos governamentais desde 1994, para o aumento da produção de grãos, principalmente nas regiões de Santarém e Paragominas (SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA – SAGRI, 2008). Em 2005, a quantidade de área plantada no estado já chegava a 68 mil ha, com produtividade média de 3 t ha⁻¹.

Muitos trabalhos sobre as prováveis alterações hidrológicas (SANTIAGO, 2005) e climáticas na Amazônia (ENDERSON-SELLERS; GORNITZ, 1984; NOBRE et al., 1991) devido à substituição da floresta por áreas de pastagem, mostram que a conversão ocasionaria sérios impactos, como aumento na temperatura do ar (NOBRE et al., 1991), aumento no albedo da superfície (RANDOW et al., 2004) e redução da evapotranspiração (SANTIAGO, 2005); no entanto, maior parte desses trabalhos sobre mudança do uso do solo na região considera apenas a pastagem em substituição à cobertura original.

Resultados de Costa et al. (2007), baseados em dados preliminares deste estudo, mostram que a substituição da floresta Amazônica para o plantio da soja ocasiona uma redução muito maior na precipitação da região, quando comparada com a substituição da floresta por áreas de pastagem, principalmente pelos altos valores do albedo da cultura da soja.

Ante o exposto, buscou-se apresentar neste trabalho as variações do albedo durante o ciclo da cultura da soja, em uma área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia, para fornecer informações com fins a uma correta parametrização dos modelos de simulação climática e de impactos ambientais, pelo fato do albedo ser considerado um dos mais importantes controladores da convecção nos trópicos (BERBET; COSTA, 2003).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área experimental

O experimento foi conduzido no município de Paragominas, situado na região nordeste do Estado do Pará cuja sede se localiza a 320 km da cidade de Belém, capital do Estado. O sitio experimental foi montado em uma área de plantio de soja com

extensão contínua de cerca de 200 ha, localizada entre as latitudes 03°01'47" e 03°02'35"S e longitudes 47°17'23" e 47°18'35"W.

A escolha do município de Paragominas para a realização do estudo se deveu por se tratar de uma região que sofreu uma grande expansão do cultivo da soja nos últimos anos. A variedade de soja escolhida foi a *Candeia* por ser uma nova variedade desenvolvida pela Embrapa, com boa aceitabilidade por parte dos produtores. Toda a área foi plantada mecanicamente utilizando-se a técnica de plantio direto, em fileiras espaçadas a 0,45m com espaçamento médio entre plantas de 0,10 m, resultando em uma densidade de cerca de 222.000 plantas ha⁻¹. O plantio foi realizado em 05 de fevereiro e a colheita em 15 de junho.

Uma torre instrumentada de 3 m de altura foi montada no centro da área e se instalaram vários instrumentos meteorológicos, ligados a um datalogger CR10X (Campbell Scientific, Inc.) e um multiplex AM416 (Campbell Scientific, Inc.); enfim, a torre ficou localizada nas coordenadas 03°02'15"S e 47°17'56"W.

A frequência de leitura de dados foi de 10 s com médias e totais gravados a cada 10 min; todo o sistema foi alimentado por um painel solar enquanto o período de coleta de dados utilizado no estudo se manteve entre os meses de janeiro e junho de 2006.

A Radiação Solar Global foi monitorada através de um piranômetro (Campbell Scientific, Inc.) e a componente refletida da radiação solar foi medida com um piranômetro invertido. A Tabela 1 apresenta a lista de variáveis meteorológicas e instrumentação utilizadas neste estudo, tal como sua localização em relação ao nível do solo.

Tabela 1 – Variáveis meteorológicas utilizadas

Variáveis	Sensor	Nível
Radiação solar incidente	Piranômetro CMP3 (Kipp & Zonen)	2,45 (m)
Radiação solar refletida	Piranômetro CMP3 (Kipp & Zonen)	2,45 (m)
Umidade do solo	Reflectômetro CS615 (Campbell Sci.)	0-30 (cm solo)
Velocidade do ar	Anemômetro R.M. Young (Campbell Sci.)	1 (m)

2.2. Determinação do albedo

Obteve-se o albedo (α) como sendo a razão entre as componentes refletida (Rr) e incidente (Rg) da Radiação Global:

$$\alpha = \frac{Rr}{Rg} \quad (1)$$

Um modelo empírico foi ajustado aos dados médios diários através de regressão linear múltipla entre o albedo, o índice de área foliar (IAF) e a umidade do solo. Para os dados médios horários ajustou-se um modelo exponencial para descrever a variação diurna do albedo, em função da elevação solar. A performance dos modelos foi avaliada através de métodos gráficos e estatísticos e como critério estatístico, se usaram o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e o índice de concordância (d) desenvolvido por Wilmott et al. (1985), obtido por:

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

em que P_i é o albedo predito; O_i , albedo observado; e \bar{O} , albedo médio observado.

2.3. Avaliação do desenvolvimento

Fez-se o acompanhamento dos estádios fenológicos da soja diariamente, segundo a escala de Fehr e Caviness (1977) conforme Tabela 1A e Figura 1B apresentadas nos Apêndices A e B, respectivamente. Além da avaliação diária, avaliou-se o estágio fenológico da planta durante a coleta semanal de biomassa; após o estágio vegetativo V10, decidiu-se por avaliar apenas o início do florescimento em diante, em virtude de a maioria das parcelas observadas apresentar uma variação muito grande nas fases, dentro de uma mesma linha, dificultando o acompanhamento do desenvolvimento da cultura.

2.4. Determinação do índice de área foliar (IAF)

Medidas de IAF da cultura da soja também foram realizadas e usadas nas análises. A área foliar foi estimada através do método dos discos, segundo metodologia proposta por Benincasa (2003). Semanalmente selecionaram-se, de forma aleatória, seis parcelas representadas por linhas de 1 metro de comprimento das quais eram coletadas todas as plantas. Cada parcela era representada por uma média de 10-12 plantas, resultando em uma amostragem com seis repetições.

Com base nessas amostras de biomassa coletava-se cerca de 30 discos das folhas de cada parcela, que foram pesadas e levadas à estufa durante 48 horas até atingir peso constante.

De posse dos valores do peso seco dos discos de cada parcela, a área foliar foi então estimada conforme a equação 3.

$$Af = \left(\frac{Ad * (Pd + Pf)}{Pd} \right) \quad (3)$$

$$Ad = (\pi.R^2) * nd$$

em que Af é a área foliar; Ad, área dos discos; Pd, peso seco dos discos; Pf, peso seco do resto das folhas; e nd, número de discos.

De posse da área foliar obteve-se o Índice de Área Foliar (IAF) por meio da equação 4.

$$IAF = \left(\frac{Af}{As} \right) = \left(\frac{Af}{D_{planta} * D_{linha}} \right) \quad (4)$$

em que As é a área do solo; $D_{plantas}$, distância média entre plantas (≈ 10 cm); e D_{linha} , distância média entre linhas (≈ 45 cm).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Segundo Blad e Backer (1972), o albedo da soja, como de qualquer outra cultura, pode ser influenciado por vários fatores, dentre os quais se destacam o grau de

cobertura vegetal, a condição hídrica do solo e do vegetal, a cobertura de nuvens e o ângulo de incidência dos raios solares; um outro aspecto que pode influenciar no grau de reflexão da cultura é a velocidade do vento, haja vista que ocasiona reclinção da cobertura (SONG, 1998); assim, esses conceitos foram considerados para a análise da variação do albedo, nas diferentes fases de crescimento da cultura.

3.1. Fatores intervenientes

3.1.1. Elevação solar

A Figura 1 apresenta a variação do albedo em função da elevação solar; pode-se observar, na Figura 1a, uma grande variação nos valores de albedo associada aos baixos valores de elevação solar em razão de que, durante o início e o final do dia, momentos de menor elevação solar, os raios incidem paralelamente sobre a cobertura vegetal ocorrendo, então, pouco aproveitamento da radiação e sendo a maior parte refletida pela superfície. Resultados semelhantes foram verificados por Fontana et al. (1991b).

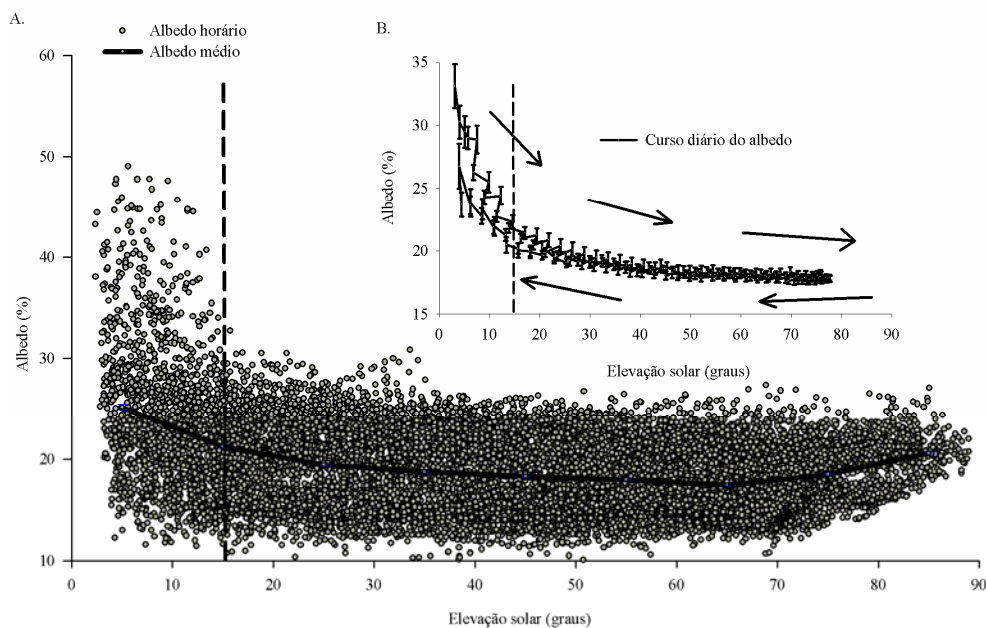


Figura 1 – Variação do albedo (1A) e curso diário do albedo (1B) em função do ângulo de elevação solar. Barra vertical na Figura 1b corresponde ao erro padrão.

A Figura 1b apresenta o ciclo diurno do albedo, em que se observam maiores valores no início da manhã e no final da tarde, associados à baixa elevação solar; próximo do meio-dia solar, período de maior elevação solar (90°), se encontram os menores valores de albedo associados ao ângulo de incidência da radiação que, neste momento, com maior elevação facilita sua penetração ao longo do dossel (MOURA et al., 1999). Percebe-se que, após o momento de máxima elevação solar, o qual corresponde ao período do meio-dia, o albedo apresenta leve redução e um incremento próximo ao final do dia.

Esta variação diária no albedo ocorre por dois motivos básicos; durante dias nublados a radiação solar incidente reduz em intensidade, além de apresentar alteração na sua qualidade e, segundo, pelo fato de algumas superfícies apresentarem reflexão diferenciada, dependendo do espectro da radiação que incide sobre ela (BLAD; BACKER, 1972). Conforme os autores, os maiores valores aqui observados no início do dia em comparação com o final da tarde, podem estar associados ao murchamento momentâneo das folhas na parte da tarde, decorrente do intenso aquecimento.

Moura et al. (1999) constataram que a variação anual no albedo diário da pastagem apresenta forte correlação com a elevação solar ao meio-dia, com altos valores de albedo durante o mês de junho, quando a elevação solar é mínima. A Figura 2 apresenta a variação temporal do albedo da cultura da soja e da elevação solar ao meio-dia, de onde é possível concluir que a elevação solar não teve qualquer correlação com os valores de albedo médio diário, ao longo do ciclo, como a teoria sugere. Um fator que contribui para isto pode estar associado à baixa latitude do local (3°S), fazendo com que se tenha uma amplitude de no máximo 20° na elevação máxima, ao longo do ciclo da soja; outro aspecto importante é que, pelo fato da região apresentar bastante nebulosidade durante esta época do ano, a elevação solar deixa de ter grande importância já que grande parte da radiação incidente chega em forma difusa, indicando que existem outros fatores mais significativos na determinação do albedo diário da cultura, embora haja, também, grande importância da elevação na variação horária do albedo, conforme constatado por Leitão et al. (2002).

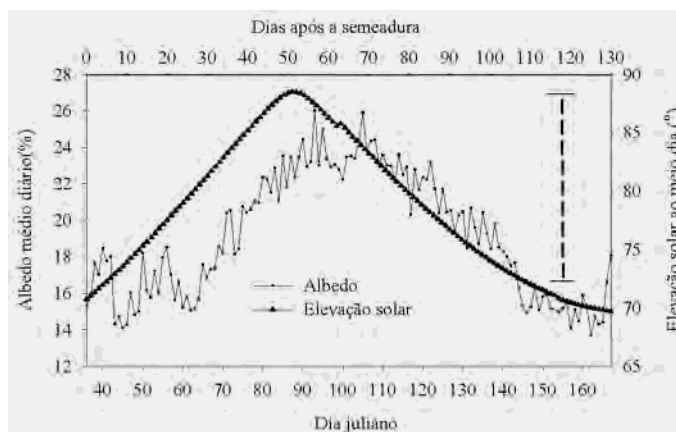


Figura 2 – Série temporal do albedo médio diário e elevação solar ao meio-dia ao longo do ciclo da soja.

3.1.2. Índice de área de foliar

Observa-se, na Figura 3, estreita relação entre o albedo e o IAF da soja. No início do plantio, quando o solo se encontra parcialmente coberto (pequeno IAF), o albedo da soja ficou em torno de 0,16-0,17, representando uma combinação entre o solo nu e a cultura. Durante este estágio se nota que o valor médio diário do albedo é susceptível à influência de outros parâmetros o que explica a oscilação no albedo até próximo dos 30 dias após a semeadura (DAS) causado pela variação na umidade do solo, decorrente da chuva. Sempre que a cultura se estabelece e indica um aumento no IAF, tem-se efeito direto no albedo da mesma, atingindo um valor máximo em torno de 0,24 próximo dos 70 DAS, associado a um IAF máximo de 7,17; esses resultados estão coerentes com os valores encontrados por Fontana et al. (1991b), em que o albedo atingiu cerca de 0,24 durante o maior IAF (7,70). Blad e Baker (1972) encontraram, para a cultura soja, um albedo médio diário variando de 0,24 a 0,27 quando a cultura cobria totalmente o solo.

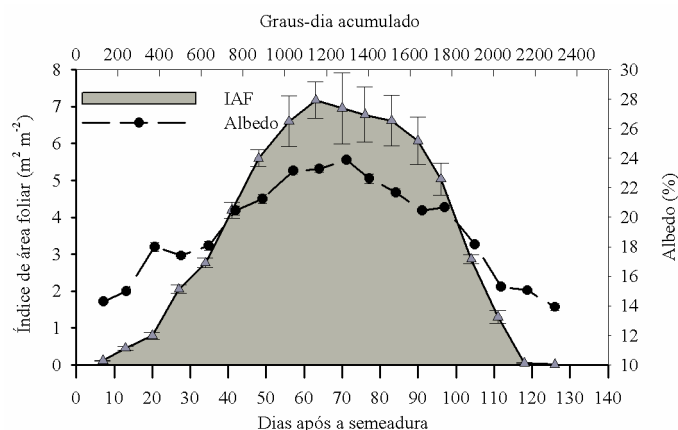


Figura 3 – Variação do albedo médio diário e índice de área foliar ao longo do cultivo da soja. Barras verticais correspondem ao erro padrão.

Com o declínio do IAF e início da senescência, a redução no albedo da cultura atingiu um valor de 0,14 no final do plantio, cuja dependência do albedo em função do IAF também foi encontrada por Galvani et al. (2000) para a cultura do pepino, ao encontrarem, para condição de campo, valores mínimos de albedo de 0,11 no início do ciclo e máximos de 0,25 associados a valores máximos de IAF de 2,30. Resultados de Blad e Baker (1972) mostram que, na medida em que a soja cobre o solo, o albedo da superfície, que antes era 0,10%, apresenta aumento a uma taxa de 1,3% para um aumento de 10% na cobertura do solo.

3.1.3. Umidade do solo

De acordo com Dalmolin et al. (2005), quanto maior o teor de umidade nos solos eles se tornam mais escuros reduzindo, assim, a reflexão da superfície. Leitão e Oliveira (2000) comparando o albedo de uma superfície arenosa coberta com cultura de amendoim em dias com e sem irrigação, concluíram que o molhamento da superfície ocasionou, devido à irrigação, uma redução no albedo de cerca de 9%; este aspecto pode ser observado na Figura 4, que apresenta a variação do albedo, juntamente com o teor de umidade do solo.

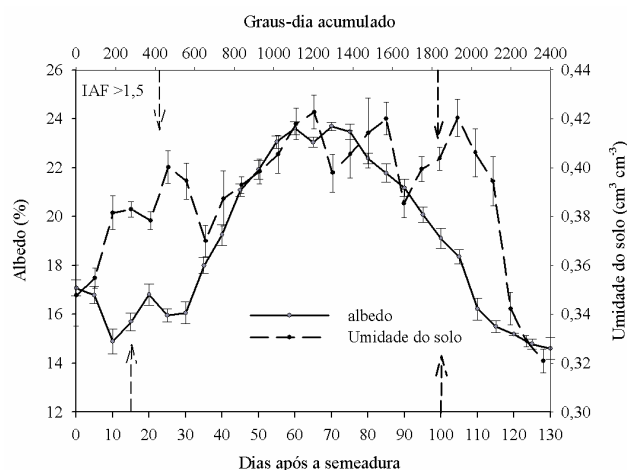


Figura 4 – Variação do albedo médio diário e da umidade do solo nos primeiros 30 cm do solo, ao longo do ciclo da soja. Barras verticais correspondem ao erro padrão.

Percebe-se, pela Figura 4 que, durante o estágio inicial, o albedo apresenta comportamento inverso ao do teor de umidade no solo, o que é explicado pelo fato de que, durante esta fase e até aproximadamente IAF igual a 1,5 (\approx DAS 26), a soja não cobre todo o solo, havendo uma mistura entre o albedo da cobertura vegetal e o do solo. Resultados semelhantes foram verificados por Blad e Baker (1972) para a cultura da soja.

Em torno dos 100 DAS (1840 GD), quando a soja se aproximava do seu estágio de vagem plena (R6) observou-se, no campo, queda das folhas e, desta forma, o solo começa a perder a cobertura vegetal que antes existia, apesar da soja apresentar IAF acima de 2, neste momento (Figura 3); em razão disto, observa-se declínio no albedo, também associado aos valores elevados de umidade no solo.

3.1.4. Velocidade e direção do vento

Muitos modelos de transferência de radiação consideram simétrico o ciclo diurno do albedo, mesmo seguindo uma parábola, porém a assimetria encontrada algumas vezes no ciclo do albedo não é explicada pelos fatores comumente conhecidos podendo, então, haver uma forte relação entre as condições predominantes do vento e esta variação no albedo (SONG, 1998).

Resultados encontrados pelo mesmo autor mostram que o albedo do trigo e do milho apresentou maiores valores durante a manhã que durante a tarde, em toda a ocorrência de ventos cuja predominância causa inclinação na vegetação em direção ao oeste; o inverso, menor albedo pela manhã, foi encontrado com a ocorrência de predominância de ventos de oeste, causando inclinação da planta para o leste.

Durante a maior parte do experimento a direção predominante do vento foi de leste, com pequena mudança para sudeste nos últimos dois meses do experimento. Mesmo com predominância na direção do vento, não foi possível perceber tendência no albedo em função do aumento na velocidade do ar; pode-se dizer, então, que a assimetria encontrada no ciclo diurno do albedo observado na Figura 1B, é função de outro fator e não do vento.

3.1.5. Albedo durante o ciclo da soja

O comportamento do albedo ao longo do ciclo da soja é apresentado na Figura 5, na qual se percebe que, durante o tempo em que a soja permanece no campo, ocorre uma contínua mudança no albedo da superfície, sempre que ela se desenvolve, conforme foi discutido; muitas vezes, esta mudança temporal não é considerada nos modelos de previsão de tempo nem nos que simulam mudanças climáticas. Um dos aspectos significativos desta alteração diz respeito aos impactos que ocorrem no balanço de energia da superfície (SOUZA et al., 2007). Resultados preliminares foram utilizados por Costa et al. (2007) em simulações climáticas, nas quais se encontrou, também, redução de quase 16% na precipitação da Amazônia ao se considerar a soja na substituição da floresta devido principalmente ao seu alto albedo.

Até antes do florescimento (R1) o albedo da soja oscila entre 0,14 e 0,22 o que, na verdade, representa uma mistura entre a cobertura vegetal e o solo, que ainda permanece descoberto sendo função, portanto, do teor de umidade no solo.

Durante o florescimento e até a frutificação (R3-R4), o albedo da soja apresenta o seu maior valor, variando entre 0,22 e 0,25, mantendo-se neste intervalo até em torno da metade do estágio de enchimento de grãos (R5); referidos valores estão de acordo com os resultados encontrados por Fontana et al. (1991b) para a cultura da soja cultivada no Rio Grande do Sul, que apresentou albedo médio diário de 0,26 quando a mesma apresentava IAF entre 4,70 a 7,70 (V8 a R6).

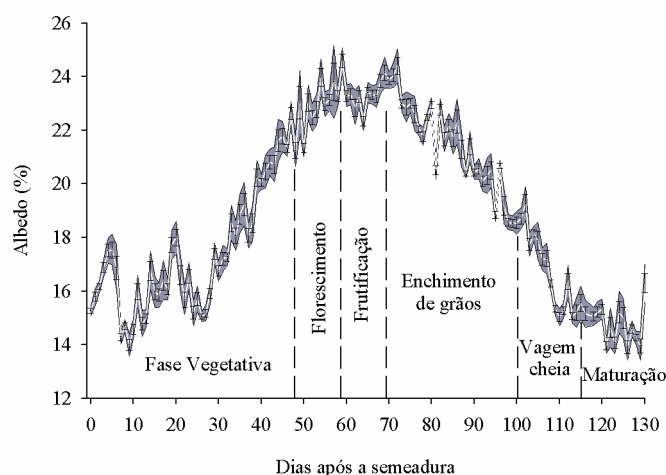


Figura 5 – Albedo médio diário durante o ciclo da cultura de soja com intervalo de confiança para nível de probabilidade de 95%.

A partir deste estágio (R5), o albedo começa a decrescer devido ao início da queda de folhas que acontece durante este período, como consequência da translocação de assimilados da folhas para os grãos. Quando a soja se encontra no estágio de vagem plena (R6), o seu albedo apresenta valores em torno de 0,15, oscilando em torno deste valor até o estágio de maturação.

Resultados encontrados por Souza et al. (1999), também mostram esta variação no albedo ao longo do ciclo de uma cultura, cujos valores para o feijão-vagem foram de 0,10 no estágio V1, 0,16 no estágio R5, apresentando diminuição após o estágio R9. A Tabela 2 apresenta os valores médios do albedo da soja para cada estágio e o seu período de duração.

Nota-se que o período mais crítico, com máximo albedo (0,23), é durante a frutificação (R3-R4). Embora este alto valor possa causar consideráveis modificações no balanço de radiação (SOUZA et al., 2007), a duração deste estágio, de apenas 13 dias, pode ser algo favorável e tornar essas prováveis mudanças menos significativas; por outro lado, ao se considerar todo o período compreendido entre o florescimento e o estágio de enchimento de grãos, quando o albedo está sempre acima de 0,20, conclui-se que o tempo de influência será de 53 dias, quando então a cultura da soja possa causar impactos mais prejudiciais.

Tabela 2 – Valores médios do albedo (\pm erro padrão) para cada estágio fenológico da soja na Amazônia e duração do estágio

Estádio fenológico	Albedo (%)	Duração (dias)
Vegetativa (V1.....Vn)	17,19 \pm 0,05	46
Florescimento (R1..R2)	22,77 \pm 0,11	10
Frutificação (R3...R4)	23,31 \pm 0,08	13
Enchimento de grãos (R5)	21,69 \pm 0,05	30
Vagem cheia (R6)	17,19 \pm 0,07	15
Maturação (R7..R8)	14,83 \pm 0,07	16

Considerando que de todos os fatores analisados apenas o IAF e o teor de umidade do solo contribuíram efetivamente para a variação do albedo médio diário, procurou-se elaborar um modelo que melhor se ajustasse aos dados, através de regressão múltipla entre as variáveis citadas.

Conforme discutido antes, o albedo foi bastante sensível ao teor de umidade do solo durante a fase inicial, mas posteriormente controlado pelo IAF; com base nisto é que se estipulou, através do melhor coeficiente de determinação (R^2), um valor de IAF igual a 2 como sendo o momento em que a umidade do solo passa a ter importância secundária no controle do albedo; desta forma, dois modelos empíricos foram desenvolvidos para simular o albedo médio diário, ou seja, um considerando os dados até IAF igual a 2 e outro para dados com IAF acima de 2.

Nota-se, pela Figura 6, que os modelos empíricos encontrados se ajustaram muito bem aos dados observados, com coeficientes de determinação de 0,88 para a equação usada com $IAF < 2$ e 0,91 para o modelo com $IAF > 2$. A oscilação nos valores de albedo que não foi representada no segundo modelo, pode estar associada ao grau de nebulosidade que variou bastante ao longo do ciclo, fazendo com que a radiação incidente fosse qualitativamente diferente de um dia para o outro mas, infelizmente, não pôde ser avaliado por ausência de informações. Preferiu-se optar, no final do ciclo, por simular o albedo com a mesma equação de $IAF > 2$, pois foi a que apresentou melhores resultados e também pelo fato de que, neste período e apesar do IAF ser baixo, o solo permanecia parcialmente coberto com material morto, pouco controlado pelo teor de umidade do solo, que na época era baixo.

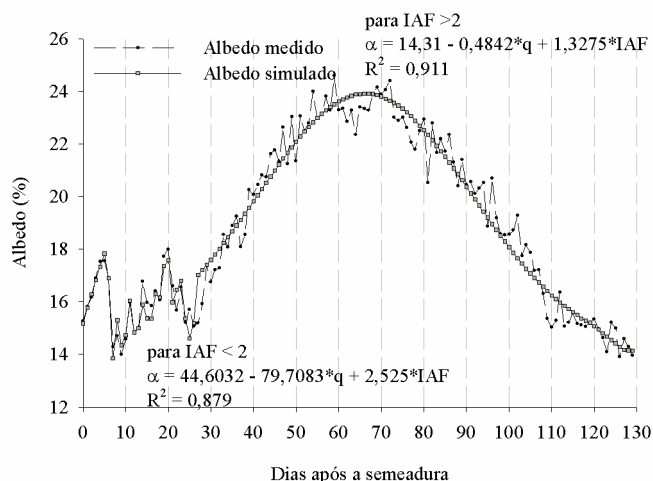


Figura 6 – Simulação do albedo diário em função do teor de umidade do solo (q) e do IAF.

Embora o modelo não consiga representar com perfeição as oscilações ocorridas ao longo do ciclo da soja se nota, na Figura 7, uma ótima precisão dos valores simulados ($R^2 = 0,85$ para IAF < 2; e $R^2 = 0,95$ para IAF > 2). O coeficiente “b” da regressão linear encontrada indica que os modelos tiveram cerca de 0,88 e 0,95 de exatidão para IAF < 2 e IAF > 2, respectivamente; além dos baixos erros aditivos gerados (coeficiente “a” da equação), os modelos indicaram baixos erros e bons índices de concordância havendo, em média, uma subestimativa com diferenças de menos de 1% (Tabela 3); esses resultados mostram que os modelos empíricos aqui apresentados podem ser utilizados com alto grau de confiança para a estimativa do albedo médio diário da soja.

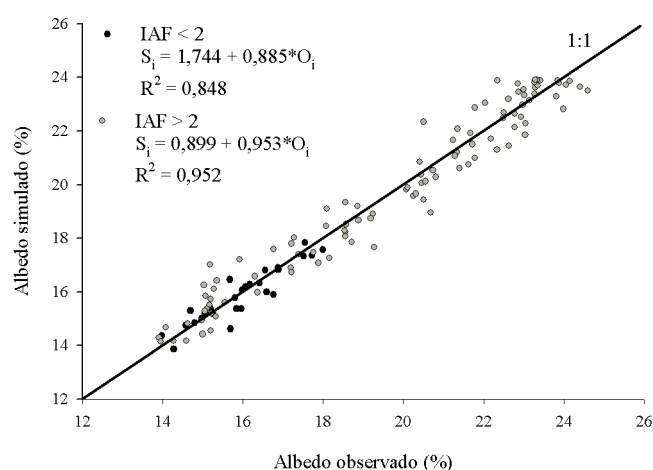


Figura 7 – Albedo médio diário observado versus simulado para condições de IAF < 2 e IAF > 2. Si da equação representa albedo simulado e Oi, o observado.

Tabela 3 – Parâmetros estatísticos dos modelos usados para simular o albedo. \bar{O} representa o albedo médio observado e \bar{P} o albedo médio predito pelo modelo

Modelo	\bar{O}	\bar{P}	Dif (%) ¹	RMSE	d
IAF < 2	15,96	15,88	-0,5	0,422	0,957
IAF > 2	19,71	19,70	-0,05	0,696	0,987

¹ Diferença (%) = $\left(\frac{\bar{P} - \bar{O}}{\bar{O}} \right) * 100$.

3.1.6. Variação horária do albedo da soja

A Figura 8 apresenta a variação horária do albedo para cada estágio fenológico da soja. Embora a elevação solar não tenha controle algum na determinação do albedo médio diário ao longo do ciclo, como já discutido (Figura 2) percebe-se, pela Figura 8, que no ciclo diurno este parâmetro se torna importante. Durante os estágios fenológicos em que a soja apresenta maiores valores de IAF (florescimento-frutificação-enchimento) o albedo mostra perfeita simetria fazendo crer mais uma vez, que no período em que a cultura cobre completamente o solo o albedo é determinado

principalmente pelas propriedades óticas da cultura, conforme também reportado por Jacobs e Van Pul (1990); nos demais estádios fenológicos da soja, ocorre uma assimetria entre o período da manhã e o da tarde, não só devido ao efeito da elevação solar mas, também, do molhamento foliar, teor de umidade no solo e grau de nebulosidade.

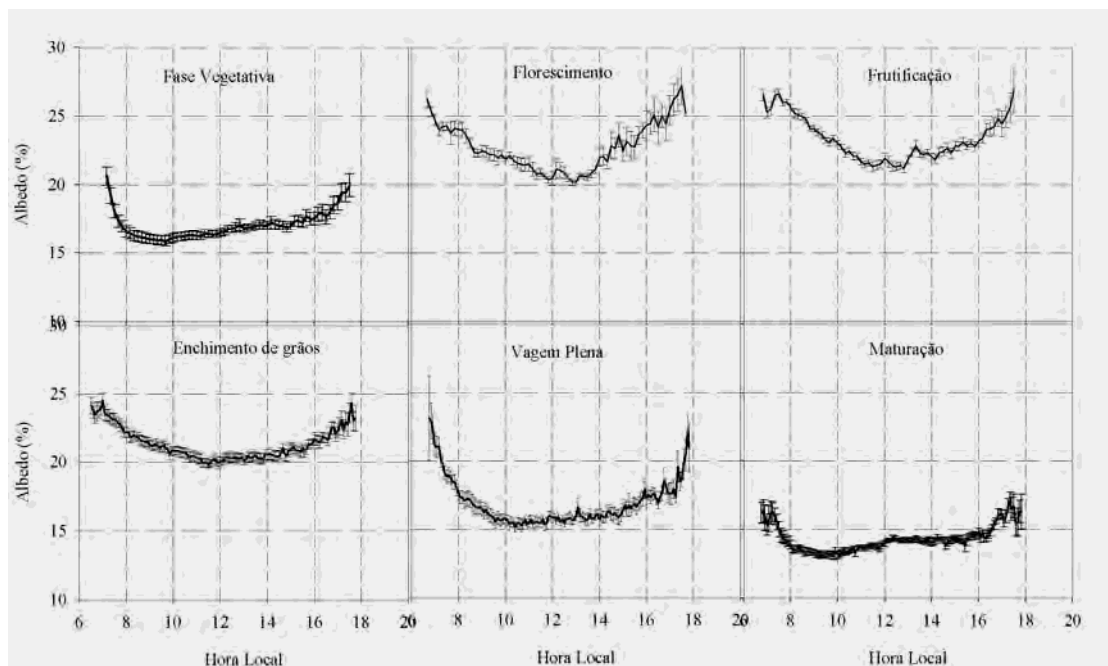


Figura 8 – Ciclo diurno do albedo para cada estágio fenológico da soja. Barras verticais correspondem ao erro padrão

Dada a importância da elevação solar no ciclo diurno do albedo, um modelo empírico foi ajustado à curva média do albedo em função da elevação solar para cada estágio fenológico, conforme a Tabela 4. Verifica-se que em todos os estádios fenológicos da soja o modelo ajustado à curva média diária consegue explicar muito bem a variação total dos dados, com boa precisão (altos valores de R^2).

Tabela 4 – Modelo exponencial para simulação do albedo médio horário para cada estágio fenológico da soja em função da elevação solar (E)

Estádio fenológico	Modelo	R ²
Vegetativa (V1.....Vn)	$16,8 + 8,46\exp^{(-0,1E)}$	0,82
Florescimento (R1..R2)	$20,23 + 9,93\exp^{(-0,03E)}$	0,97
Frutificação (R3...R4)	$21,01 + 7,89\exp^{(-0,03E)}$	0,97
Enchimento de Grãos (R5)	$20,70 + 9,97\exp^{(-0,073E)}$	0,94
Vagem cheia (R6)	$15,98 + 13,16\exp^{(-0,076E)}$	0,98
Maturação (R7..R8)	$13,87 + 32,16\exp^{(-0,159E)}$	0,99

4. CONCLUSÕES

O albedo da cultura da soja apresentou dependência muito forte do seu índice de área foliar e, posteriormente, dos demais parâmetros climáticos.

Encontrou-se um aumento contínuo no albedo da área estudada na medida em que a soja se desenvolvia, apresentando maior valor médio durante o estágio fenológico de frutificação e máximo valor diário entre 0,24-0,25, aos 70 DAS, associado ao máximo valor de IAF.

Um modelo empírico foi ajustado aos dados originais, em função do IAF e umidade do solo, enquanto os resultados apresentaram ótima precisão com índice de concordância igual a 0,96 e 0,99 para $IAF < 2$ e $IAF > 2$, respectivamente.

Embora o albedo diário da soja responda principalmente ao IAF e umidade do solo, sua variação horária pôde ser ajustada a um modelo exponencial, em função da elevação solar.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, pelo financiamento da pesquisa através do projeto CTHIDRO; o primeiro autor é grato à CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado.

6. LITERATURA CITADA

ANDERSON, L. O.; ROJAS, E. H. M.; SHIMABUKURO, Y. E. Avanço da soja sobre os ecossistemas cerrado e floresta no Estado do Mato Grosso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 19-25.

BENINCASA, M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. Jaboticabal: Funep, 2003. 41 p

BERBET, M. L. C.; COSTA, M. H. Climate change after tropical deforestation: seasonal variability of surface albedo and its effects on precipitation change. **Journal of Climate**, v. 16, p. 2099-2104, 2003.

BLAD, B. L.; BACKER, D. G. Reflected radiation from a soybean crop. **Agronomy Journal**, v. 64, p. 277-280, 1972.

COSTA, M. H.; YANAGY, S. M. N; PONTE DE SOUZA, P. J. O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 34, 2007.

DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 481-489, 2005.

DANTAS, T. M.; FONTELES, L. V. **Avanço da fronteira agrícola na Amazônia**. Disponível em: <<http://www.oktiva.net/sispub/anexo/9168>>. Acesso em: 15 out. 2006.

D'AVILA, N. **Desmatamento na Amazônia: o novo nome da soja**. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/agronegocio/14.shtml>>. Acesso em: 2 maio 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja**: Paraná. Brasília, 2005. (Sistemas de produção, 5).

FEHR, W.R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. (Special Report, 80).

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 3, p. 411-418, 1991b.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; PEREIRA, A. B.; CAMPO, C. J. Medidas e estimativa do albedo em cultura de pepineiro cultivado a campo e em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 2, p. 163-169, 2000.

HENDERSON-SELLERS, A.; GORNITZ, V. Possible climatic impacts of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation. **Climatic Change**, v. 6, p. 231-257, 1984.

IGREJA, A. C. M.; PACKER, M. F.; ROCHA, M. B. **A evolução da soja no Estado de Goiás e seu impacto na composição agrícola**. São Paulo: Instituto de Economia Agrícola, 1988. 20 p.

JACOBS, A. F. G.; VAN PUL, W. A. J. Seasonal changes in the albedo of maize crop during two seasons. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 49, n. 4, p. 351-360, 1990.

LEITÃO, M. M. V. B. R.; OLIVEIRA, G. M. Influência da irrigação sobre o albedo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 214-218, 2000.

LEITÃO, M. M. V. B. R.; SANTOS, J. M.; OLIVEIRA, G. M. O. Estimativas do albedo em três ecossistemas da floresta Amazônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 256-261, 2002.

MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; BENINCASA, M.; SOUZA, J. L.; NASCIMENTO FILHO, M. F. Variação do albedo em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 2, p. 163-168, 1999.

MUELLER, C. C. **Dinâmica, condicionantes e impactos sócio-ambientais da evolução da fronteira agrícola no Brasil**. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza, 1992. (Documento de trabalho, 7).

MUELLER, C. C.; BUSTAMANTE, M. **Análise da expansão agrícola no Brasil**. Disponível em: <www.worldbank.org/rfpp/news/debates/mueller.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2006.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, Washington, v. 4, n. 10, p. 957-987, 1991.

RANDOW, C. V.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M.; GASH, J.; ELBERS, J. A.; WATERLOO, M. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 5-26, 2004.

SANTIAGO, A. V. **Simulações dos efeitos da cobertura vegetal no balanço hídrico da bacia do rio Ji-Paraná, RO**. 2005. 70 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA – SAGRI. **Evolução da safra de grãos no estado do Pará**. Disponível em: <www.sagri.pa.gov.br/documents/Evolucao daSafradeGraosnoPara.xls>. Acesso em: 20 set. 2008.

SONG, J. Diurnal assymetry in surface albedo. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 92, p. 181-189, 1998.

SOUZA, J. L.; ESCOBEDO, J. F.; TORNERO, M. T. T. Albedo e estimativas do saldo de radiação em feijão-vagem sob cobertura de plástico e ambiente externo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 10, p. 1763-1774, 1999.

SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C.; SOUSA, A. M. L. Balanço de energia na soja em áreas de fronteira agrícola na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007, Aracaju. **CD-ROM...** Aracaju: SBAGRO, 2007.

WILMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

CAPÍTULO 6

EFICIÊNCIA DO USO DA RADIAÇÃO

(Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.44, n.10, p.1211-1218, 2010)

RADIATION USE EFFICIENCY BY SOYBEAN IN THE AMAZON REGION

Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza¹, Aristides Ribeiro², Edson José Paulino da Rocha³, José Renato Bouças Farias⁴, Renata Silva Loureiro³, Carlos Capela Bispo³ and Leila Sampaio¹

Abstract – The objective of this work was to evaluate the efficiency of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) in intercepting and using solar radiation under natural field conditions in the Amazon region. The meteorological data and the values of soybean growth and leaf area were obtained from an agrometeorological experiment carried out in Paragominas, Pará state, during 2007 and 2008. The radiation use efficiency (RUE) was obtained from the ratio between the above ground biomass production and the intercepted photosynthetically active radiation accumulated until 99 and 95 days after sowing in 2007 and 2008, respectively. Climatic conditions during the experiment were very distinct, with a light reduction in rain, which started in the 2007 mid-cycle due to the El Niño phenomenon. An important reduction in leaf area index and biomass production was observed during this year. Under natural field conditions in the Amazon region the values of RUE were 1.46 and 1.99 g MJ⁻¹.PAR in 2007 and 2008 experiments, respectively. The probable reason for the differences found between these years might be associated to the water restriction imposed in 2007 coupled with the higher air temperature and vapor pressure deficit and due to the increase in the fraction of diffuse radiation that reached the land surface in 2008.

Index terms: Amazon region, leaf area index, radiation interception, soybean expansion.

¹ Universidade Federal Rural da Amazônia, Caixa Postal 917, CEP 66077-530, Belém-PA, Brazil. e-mail: paulo.jorge@ufra.edu.br, leila.sampaio@ufra.edu.br.

² Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, CEP 36570-000, Viçosa-MG, Brazil. e-mail: ribeiro@ufv.br.

³ Universidade Federal do Pará, Departamento de Meteorologia, Caixa Postal 1611, CEP 66075-110, Belém-PA, Brazil. e-mail: eprocha@ufpa.br, renatasloureiro@hotmail.com, cjcapela@yahoo.com.br.

⁴ Embrapa Soja, Caixa Postal 231, CEP 86001-970, Londrina-PR, Brazil. e-mail: jrenato@cnpso.embrapa.br.

EFICIÊNCIA DO USO DA RADIAÇÃO PELA SOJA NA REGIÃO AMAZÔNICA

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da soja (*Glycine max* (L.)) em interceptar e usar a radiação solar sob condições naturais de campo na região Amazônica. Os dados de crescimento e área foliar da soja e dados meteorológicos foram obtidos em um experimento agrometeorológico realizado em Paragominas no estado do Pará em 2007 e 2008. A eficiência do uso da radiação (EUR) foi obtida pela razão entre a produção de matéria seca da parte aérea e o acúmulo da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (PAR) até os 99 e 95 dias após a semeadura em 2007 e 2008, respectivamente. As condições climáticas durante o experimento foram muito distintas, com uma leve redução na precipitação iniciada na metade do ciclo de 2007 devido ao efeito do fenômeno El-niño. Observou-se uma importante redução tanto no índice de área foliar como na produção de matéria seca durante este ano. Sob tais condições de campo da Amazônia foram encontrados valores de EUR de 1,46 e 1,99 g MJ⁻¹ PAR, respectivamente. A provável razão para a diferença encontrada entre os anos pode estar associada à redução de água imposta em 2007 em conjunto com elevada temperatura do ar e déficit de pressão de vapor e também ao aumento na fração de radiação difusa que atingiu a superfície em 2008.

Termos para indexação: região Amazônica, índice de área foliar, interceptação da radiação, expansão da soja.

1. INTRODUCTION

In recent years, the agricultural frontier in the Amazon has been advancing at an increasing rate and soybean crop has often been considered the main responsible for this (MUELLER; BUSTAMANTE, 2006). It is a troublesome fact because of the impacts it causes on the regional climate pattern (FEARNSIDE, 2001; COSTA et al., 2007). Soybean culture (*Glycine max* (L.) Merr.) began to be developed in the Amazon in 2000, but it only occupied an insignificant area (73,000 ha) when compared to the remainder part of Brazil (MUELLER; BUSTAMANTE, 2006). In Para state the cultivated area was only 1,200 ha in 2000, but this region has been receiving financial support from the government since 1994 to increase the grain production, particularly in Santarem and Paragominas. In 2006, the planted areas in the Para state reached 90,000 ha, with a mean productivity of 3 Mg ha⁻¹ (www.sagri.pa.gov.br/documents).

Although these changes in the Amazon land use may cause serious environmental impacts, such as the decrease in local precipitation, when compared to the reduction caused by land for pasture (COSTA et al., 2007), it is important to highlight that the expansion of soybean culture towards low latitudes has occurred as a strategy to supply the increasing population growth and the consequent demand for food and biofuel.

Climatic factors are decisive to the success or failure of the crops. Solar radiation is a fundamental factor to determine the plant growth. The radiation use

efficiency the relation between the solar energy captured by the crop and its biomass production rate (MONTEITH, 1994). Such relation is defined as the efficiency with which the captured radiation is used to produce new material (BLACK; ONG, 2000), and it has been successfully used as a tool to simulate the growth of different cultures (ALBRIZIO; STEDUTO, 2005).

Although solar radiation is a fundamental resource for crop growth; there are many other factors that influence plant development (DEMETRIADES-SHAH et al., 1992). Water availability to plants, for example, is one of the most important factors for their development. Under some optimal conditions of water availability, radiation use efficiency (RUE) remains almost constant throughout most part of plant growth cycle, showing no effects caused by local atmospheric conditions (MUCHOW et al., 1993). Some results have shown a dependence of RUE on meteorological factors such as that found for soybean (MUCHOW et al., 1993), peanut (COLLINO et al., 2001) and maize (ANDRADE et al., 1993). Factors such as vapor pressure deficit, air temperature and water stress are the most common elements responsible for variation in RUE.

Most crop growth models need information about the interactions between culture and environment. Specifically in Amazonia, where soybean expansion has been occurring intensely, little is known about the response of soybean to local environmental conditions.

The objective of this work was to determine radiation use efficiency of soybean in the Amazon region, under natural field conditions.

2. MATERIALS AND METHODS

The experiment was conducted during 2007 and 2008 in Paragominas city, Pará state, Brazil. The experimental site was set up in a soybean crop area with a continuous extension of 200 ha (02°59'08" S and 47°19'57"W).

The soil is a Latossolo Amarelo (Xanthic Haplodox), with 71% of clay content. The volumetric water content at field capacity is $0.43 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ and $0.19 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ at wilting point. The soil was tilled in the rainy season, and later the whole area was mechanically sown with the cultivar BRS Tracajá (intermediate maturity) which is the most recommended cultivar for this region (EL-HUSNY et al., 2003b). The plant population was 200,000 plants ha^{-1} at 0.50 m row spacing. Prior to sowing, seeds were prepared with adequate rhizobium inoculant, fungicides and insecticides. Seeds were sown on

February 23, 2007 and February 7, 2008 at a rate of 26–28 seeds m⁻². The soil was fertilized with N, P and K of 2-20-18 chemical fertilizer at 350 kg ha⁻¹ during sowing. The final harvest was carried out on June 21, 2007 and June 06, 2008.

A 3-meter-high instrumented micrometeorological tower was installed in the center of the experimental area. Meteorological sensors were connected to a CR10X datalogger (Campbell Scientific, Inc.) and to a AM416 multiplex (Campbell Scientific, Inc.). The incident solar and photosynthetically active radiation (PAR), transmitted PAR, relative humidity, air temperature and rainfall were continuously monitored. Data measurements were made every ten seconds during 2007 and 2008, providing totals and averages every ten minutes. The data acquisition period used in this work ranges from February to June in 2007 and in 2008.

The incident PAR was measured by a quantum sensor (LI-190SA, Licor Biosciences, Lincoln, NE, USA) located on the top of the tower. The PAR transmitted to the ground was continuously measured by a line quantum sensor (LI-191SA, Licor Biosciences, Lincoln, NE, USA) which was installed at the soil surface diagonally across rows, similarly to several works (LINDQUIST et al., 2005). The sensor was moved weekly around the tower to ensure randomness and avoid bias in the intercepted radiation data.

The estimation of the daily PAR intercepted by the soybean canopy was obtained by the difference between the daily total incident and the transmitted PAR. The fraction of intercepted PAR for each day was determined according to following equation:

$$FRI = 1 - \left(\frac{\sum PAR_{trans}}{\sum PAR_{in}} \right) \quad (1)$$

Where FRI is the fraction of PAR intercepted, PAR_{trans} is the radiation PAR transmitted to the ground and PAR_{in} is the incident PAR.

The radiation extinction coefficient (k) was obtained from nonlinear regression between FRI and LAI, as shown by Pengelly et al. (1999). The k value for both experiments was estimated as the coefficient of exponential function that shows the relationship between above parameters, according to Monsi and Saeki (1953):

$$FRI = 1 - \exp^{(-k.LAI)} \quad (2)$$

The RUE was determined as the angular coefficient of the linear regression between the total above-ground dry matter and cumulative intercepted PAR (MONTEITH, 1994). The period of the data used in the regression was up to 99 days after sowing (DAS) in 2007 and 95 DAS in 2008, once the data near the maturity stage do not present any physiological importance in these analyses, contributing only to a variation at RUE (BLACK; ONG, 2000).

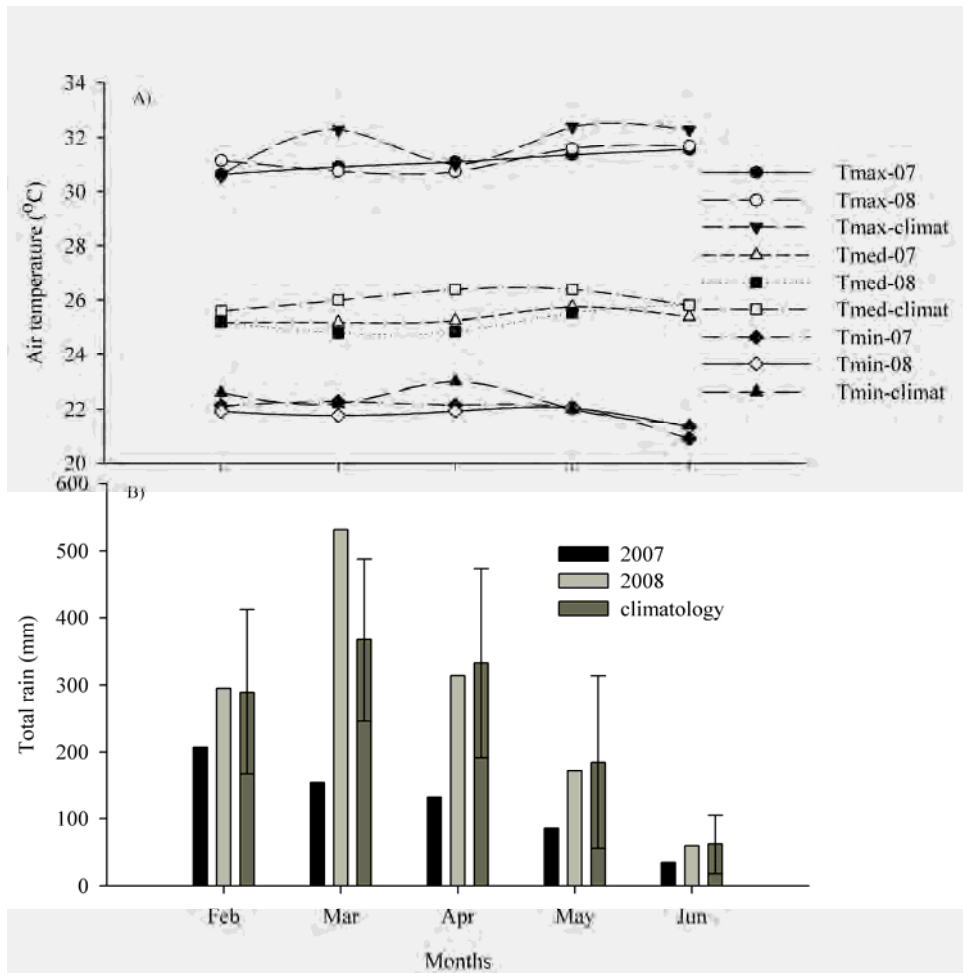
The fraction of transpirable soil water (FTSW) was calculated as the ratio between the actual quantity of transpirable water and the total-potential transpirable soil water according to Sinclair (1986), so that information about available water could be provided to the culture. The actual amount of daily transpirable water is reduced through soil evaporation and transpiration of the plant. The potential soil evaporation is calculated by Penman's method and the actual soil evaporation is obtained using a correction according to the degree of radiation intercepted by the soil and the time since the last event of rain occurred. Crop transpiration is obtained from the method of Penman-Monteith applied to the canopy and the aerodynamic resistance. The value of FTSW ranges from 1.0 at field capacity to 0.0 when all of the water available for transpiration has been extracted. The mean diurnal vapor pressure deficit was calculated as the mean difference of the saturated and actual vapor pressure obtained from relative humidity and air temperature data between 06 and 18 local time in a 10-minute interval.

The data for growth analyses were collected weekly, starting ten DAS. The plants samples consisted of randomly chosen 1-meter rows with six replications. All samples were kept in paper bags until they were processed in the laboratory. They were separated into leaves, stems, petioles, flowers and pods and oven-dried at 70°C. The phenological development was observed daily, according to Fehr and Caviness (1977) cited by Farias et al. (2007). The leaf area index (LAI) was estimated by the "discs method" according to the methodology described by Benincasa (2003). Thirty discs were collected by replicate, oven-dried and weighted. The LAI was estimated taking into account these measurements and leaf dry weight. The averages of RUE were analyzed by the "t" test at 5% of probability level.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Meteorological conditions

In the 2007 experiment, the rain regime was reduced, with a total monthly amount lower than the normal rain regime and lower than the amount observed in 2008, resulting in lower values of fraction of transpirable soil water in the first year (Figure 1). This reduction in the total rain amount might have been caused by a positive anomaly in the surface temperature of the Pacific Ocean observed during October 2006 and April 2007, indicating the occurrence of El Niño (www.cptec.inpe.br/enos/).



Source: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (1988).

Figure 1 – Climatology (\pm standard deviation) and regimes of Air temperature (A) and total rain (B) observed during the experiment. Climatology conditions (1980-1988).

The 2008 experiment was carried out in a year that can be considered rainy, compared to the climatological (normal) value, showing, in most months, an increase in the total rain amount, especially in the beginning of the cycle, when seeds need a reasonable amount of soil humidity during sowing (Table 1).

Table 1 – Total of rain, daily maximum (T_{max}), minimum (T_{min}) and mean air temperatures (T_{mean}), daily mean global incident radiation (S_{in}) and photosynthetically active radiation (PAR) in each stage of soybean culture

Stages	Duration (days)		Rain (mm)		T_{max} (°C)		T_{min} (°C)		T_{mean} (°C)		PAR (MJ m ⁻²)		PAR (MJ m ⁻²)	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Vegetative	44	40	184.2	401.8	31.2	30.9	22.1	21.8	25.3	25.0	20.0	18.9	9.5	8.4
Flowering	11	16	36.0	397.0	31.1	30.4	22.4	21.9	25.4	24.6	18.5	17.2	8.9	7.2
Fructification	17	10	105.2	72.2	30.8	30.6	22.1	21.5	25.2	24.8	18.7	18.5	9.0	7.5
Seed filling	33	46	61.6	289.5	31.4	31.1	21.8	22.2	25.7	25.2	19.9	18.1	9.6	7.2
Maturation	14	19	23.4	92.5	31.7	31.8	20.9	21.8	25.5	25.6	19.0	18.9	9.2	7.2

In 2007, the rain amount in April was 130 mm, less than half of the climatological value which could have been responsible for the difference observed in the biomass production of that year. During the beginning of the seed stage, the total rain in that year was 61.6 mm, resulting in a daily mean of only 1.86 mm, which is too low to supply the soybean demand during this phase (Table 1). The total precipitation of the whole cycle was around 1,253 mm in 2008, and 410 mm in 2007, which is close to the lower limit of the soybean cycle demand (FARIAS et al., 2007). The mean productivity observed during the experiment was 3.47 Mg ha⁻¹ in 2007 and 3.70 Mg ha⁻¹ in 2008.

The decrease observed in the FTSW in 2007 has indicated the occurrence of moderated water deficit that started in early April persisted until the end of the cycle. The FTSW was around 0.75 during the vegetative stage and showed a marked reduction starting from the R5 phase (Figure 2). Despite these differences between the years, the critical FTSW (0.35) commonly established to cause down regulation on the RUE of some crops was never reached, although an early stomatal closure has been observed even at early stage of soil drying as a strategy to preserve soil water (SINCLAIR; MUCHOW, 2001).

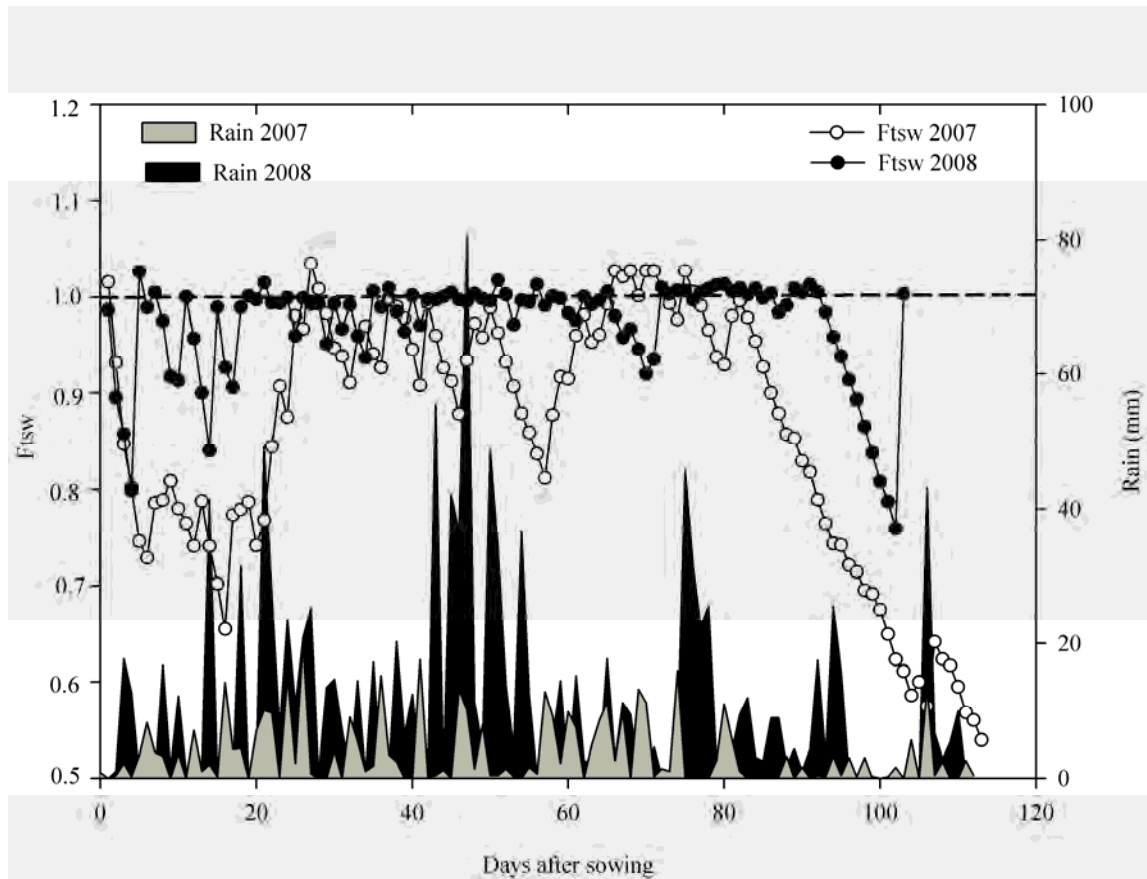


Figure 2 – Fraction of transpirable soil water (FTSW) and precipitation during experiments.

The air temperature was higher in 2007 than in 2008 but lower than normal, with mean value of 27°C, and maximum value always below 34°C (Figure 1). Even though the air temperature in 2007 had always remained above that of 2008 (around 0.4°C), the values observed during the experiment are consistent with the limits supported by the soybean culture (FARIAS et al., 2007).

The mean daily incident solar radiation was always below 20 MJ m⁻² during the whole cycle, with mean values of PAR around 8 MJ m⁻², although the daily values of 12 MJ m⁻² were observed in some days, but they have rarely reached values below 6MJ m⁻²day⁻¹ (Table 1). Such conditions might be considered as no limiting to the soybean growth when compared to other regions in Brazil. In 2007, the irradiative regime was higher than that observed in 2008, as a result of the smaller degree of cloudiness suggested by the low rainfall values that occurred in 2007.

3.2. Leaf area index (LAI) and biomass production

The biomass production, as well as the leaf area index, was higher during 2008 (Figure 3). The meteorological conditions during both experiments were very distinct due to drought occurrence during the most part of the 2007 development cycle.

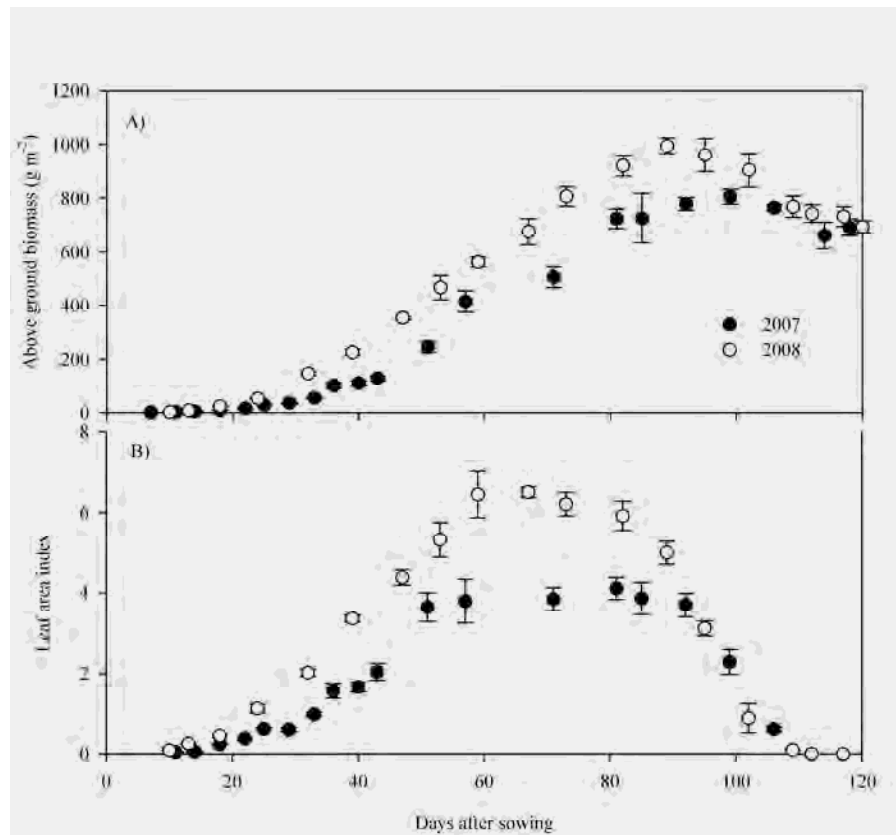


Figure 3 – Soybean above-ground dry biomass production (A) and leaf area index (B)

Before 30 DAS, the difference in the biomass production and, consequently, in LAI, was modest. From 56 DAS, soybean started to show an abrupt reduction in its biomass production, as a possible consequence of the lower water availability to which the plants were submitted during fructification (R3) and beginning seed stages (R5) in 2007 (Figure 3). The water deficit effects tend to be more critical to the soybean yield when it occurs during the reproductive stage (OYA et al., 2004).

The maximum LAI observed during the 2007 experiment was only 4.1 ± 0.28 at 81 DAS, while in 2008, such value was 6.49 ± 0.13 at 67 DAS. The maximum above-

ground biomass production before senescence was 805 ± 27.4 and 995 ± 24.5 g m⁻² in 2007 and 2008, respectively. Some important reductions in the soybean LAI due to the water deficits were also observed by Oya et al. (2004).

During severe drought conditions, a considerable reduction occurs in the stomatal conductance, leading to an interruption in the CO₂ assimilation. Under such conditions, the water plant reserves themselves may be consumed, which can lead to the death of plants (SINCLAIR, 2000). The reduction in LAI observed in 2007 was a strategy to reduce the water loss by soybean and to maintain the soil water uptake at satisfactory levels.

3.3. Radiation interception

Figure 4 shows the soybean behavior in intercepting radiation through growing season. At flowering (R1) soybean has already intercepted 95% of PAR in 2008, and around 98% after few days. During 2007 experiment, as it was expected by the reduction in water availability to the culture, PAR interception was rising slowly, reaching a maximum value (97.4%) only after fructification (R3).

In such water availability conditions imposed to soybean during 2008, it was found maximum interception occurring earlier than in 2007, almost 99.6% at 51 DAS, just after flowering stage (R1), maintaining its maximum value by 90 DAS. In the 2007 however, soybean showed maximum interception (97%) during a shorter period, corresponding to the interval between 65 and 89 DAS.

Similar results were found by Costa et al. (1999) to soybean cultivated under different irrigation conditions in the southeast of Brazil. When irrigation was applied through the cycle, maximum radiation interception (99%) occurred between 70 and 96 DAS.

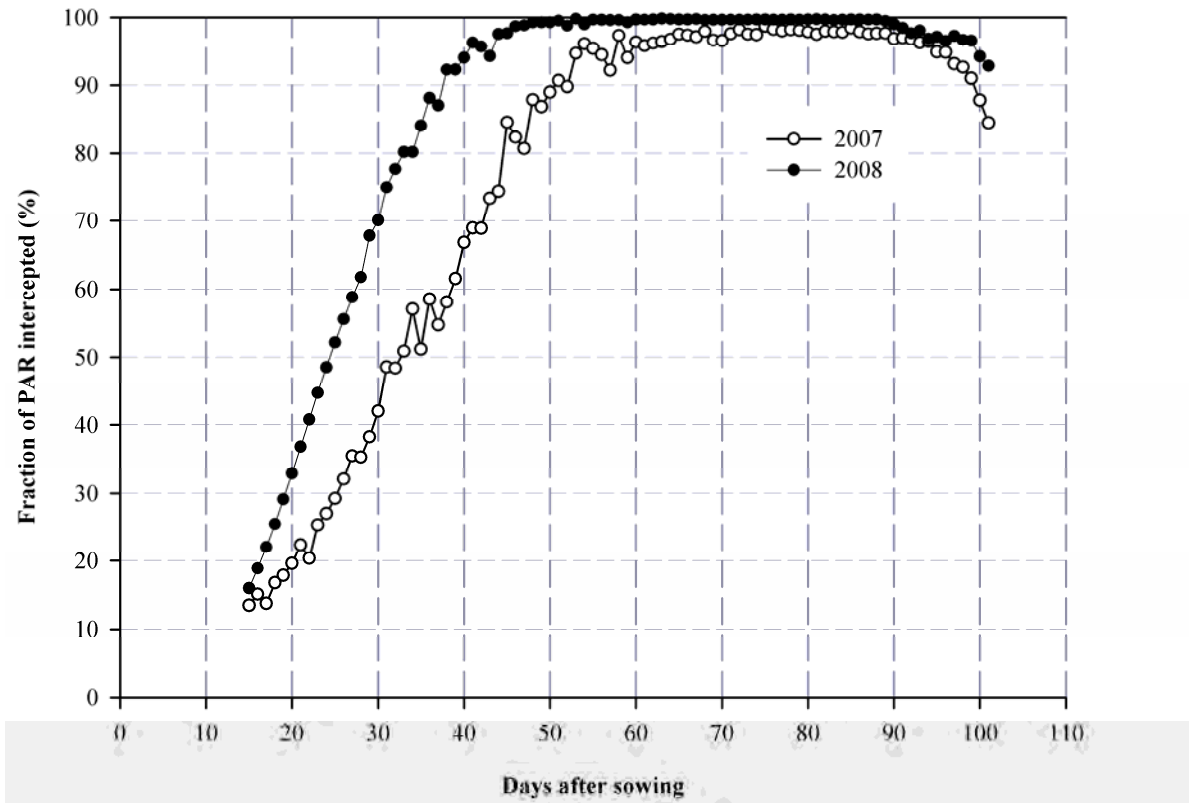


Figure 4 – Fraction of radiation *PAR* intercepted by soybean in the Amazon (Open Circles: 2007, Closed Circles: 2008).

Water deficit is a decisive factor in the capture of radiation by soybean and under such conditions maximum intercepted radiation does not reach 80% from incident light above the canopy (COSTA et al., 1999). According to Confalone et al. (1998) under irrigated conditions, soybean shows a significant increase in radiation interception of almost 15% during flowering stage (R1) and of 46% during beginning seed stage (R5).

3.4. Radiation extinction coefficient (k)

The relationship between intercepted radiation by soybean and its LAI could be described through an exponential function as shown in Figure 5. All data showed a good fit to an exponential model. Once LAI has reached 2.0, soybean interception was 73% in 2007 and 76% in 2008. Maximum LAI, which was 4.1 in 2007, was responsible for

an interception of 97.4%, while during the 2008 experiment, the maximum LAI (6.5) was able to intercept only 99.7%.

Considering a data interval from the beginning of sampling to before maturity, soybean presented radiation extinction coefficient of PAR between 0.71 and 0.72; which were obtained from nonlinear regression at Figure 5. Those values are in agreement with the values found by Confalone and Navarro (1999); and also with the value 0.77 used by Schoffel and Volpe (2001). Although it was noticed an important reduction in LAI and light interception because of the reduction in rain during 2007, there was not significant effect on k values between years, due to the fact that light interception is not proportional to LAI but hyperbolically related instead (MUCHOW, 1992).

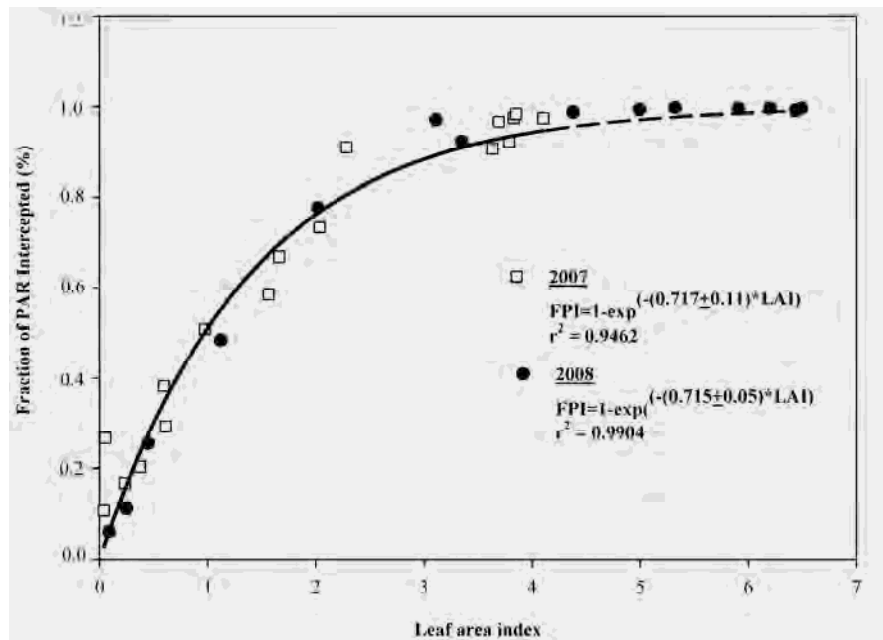


Figure 5 – Relation between the fraction of intercepted radiation and the soybean LAI in the Amazon (squares: 2007, circles: 2008).

3.5. Radiation use efficiency (RUE)

As shown in figure 6, a strong relation is observed between the above-ground dry biomass production and cumulated intercepted radiation in both experiments. Soybean stopped showing a linear correlation 99 DAS in 2007 and after 95 DAS in 2008, shortly before physiological maturity (R7), where photosynthates translocation starts to be the main important factor for biomass production, instead of radiation interception (BLACK; ONG, 2000).

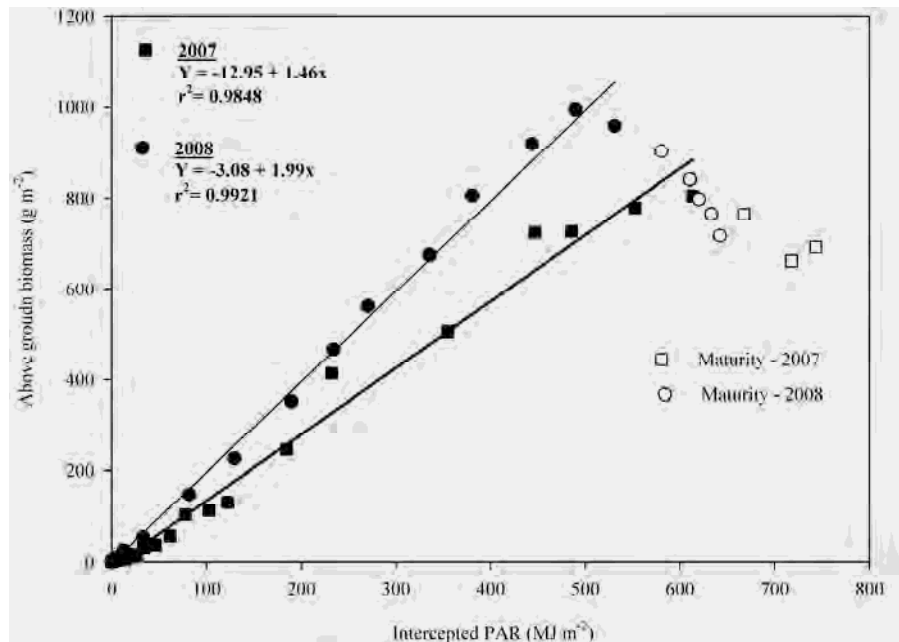


Figure 6 – Relation between the accumulated intercepted radiation and the rate of aerial dry biomass production. (squares: 2007, circles: 2008).

The RUE of soybean in 2007 was around $1.46 \text{ g.MJ}^{-1} \text{ PAR}$, considering the data until 99 DAS, when a nonlinearity near maturity can be observed. In the 2008 experiment, the value obtained was $1.99 \text{ g MJ}^{-1}\text{PAR}$. The difference observed between both experiments clearly demonstrates the weather effect in the radiation use efficiency due to the direct relation between biomass accumulation and its CO_2 assimilation rate (SINCLAIR; HORIE, 1989), as reported by Confalone and Navarro (1999) and Collino et al. (2001).

The RUE value found for the cultivar Tracajá in 2008 was slightly higher than those found by Confalone and Navarro (1999) in Argentina, whose values ranged from 1.37 g MJ⁻¹PAR under irrigated conditions to 1.92 g MJ⁻¹PAR, under natural field conditions with no water stress. Schoffel and Volpe (2001) found a mean value for RUE around 1.23 g MJ⁻¹PAR, for different cultivars in the southeast of Brazil.

Other results reported in the literature present values for soybean RUE under natural field conditions, without water limitations, ranging from 2.28 before the flowering stage to 2.53 g MJ⁻¹ PAR after flowering (SANTOS et al., 2003). Schoffel and Volpe (2001), found mean values of 1.02 g MJ⁻¹PAR in the vegetative subperiod and 1.40 g MJ⁻¹ PAR in the reproductive subperiod, under irrigated conditions, for several cultivars. The results from Confalone et al. (1998) present a variation in RUE between 1.73 g MJ⁻¹ PAR at vegetative stage and 1.86 g MJ⁻¹ PAR, at flowering.

The time scale used to calculate RUE is extremely important and it is one of the causes of the variations found in literature (BLACK; ONG, 2000). Although RUE is considered conservative for a unique culture under optimal water conditions (MUCHOW et al., 1993; MONTEITH, 1994), some works have presented small variations in RUE, even when it was calculated for specific development stages (ARKEBAUER et al., 1994).

Soybean has presented different efficiency to convert radiation in both years before flowering, with angular coefficients of 1.14 and 1.75 g MJ⁻¹PAR in 2007 and 2008 respectively. Similarly, in the reproductive stage, soybean presented distinct values between years, as a consequence of the reduction in water availability imposed in 2007. Despite these inter-annual difference, the RUE between stages in a single year was not statistically different according to the homogeneity test for different regressions (t test, P < 0.05).

The increase in the RUE found during the reproductive phase of the soybean in 2008 is in accordance with the most results found for soybean (CONFALONE; NAVARRO, 1999; SCHOFFEL; VOLPE, 2001; SANTOS et al., 2003). This increase is due to the increase in the accumulation of biomass being significant only from the V5 phase on, remaining high until the beginning of the grain filling phase, when the assimilated translocation to the grains starts (FARIAS et al., 2007).

Although the 2008 experiment has had a bigger production of biomass (Table 2) during the vegetative phase, the amount of radiation intercepted by the soybean was nearly the same for both years, even though the biomass production in 2007 was only

57% of that in 2008. Due to the imposed water reduction in the reproductive phase in 2007, the biomass production amount was about 80% of the 2008 value; however, there was an increase of 13% in the PAR radiation interception in the 2007 experiment compared to that of 2008.

Table 2 – Dry biomass produced and intercepted radiation (PAR_{int}) in the end of each stage and the radiation use efficiency (RUE) for each soybean stage

Stages	Above ground dry biomass (gm^{-2})		PAR_{int} ($MJ m^{-2}.day^{-1}$)		RUE ($g MJ^{-1}.PAR$)	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008
Vegetative	130.1a	226.4b	122.6	129.3	1.14a	1.75b
Reproductive	805.4c	960.2c	613.4	531.1	1.29a	1.91b

⁽¹⁾Means followed by the same letters are not significantly different by t test at 5% of probability

There are two possible causes for this. First, since 2007 was less rainy (Figure 1), it presented a cloud covering throughout the cycle significantly smaller than 2008, which caused an increase in the amount of the incident PAR radiation during the experiment, with mean values during reproductive phase around 9.2 and 7.3 $MJ m^{-2} day^{-1}$ in 2007 and 2008, respectively.

Second, even with the reduction observed in the LAI between the experiments; the extinction coefficient found was nearly the same. Although the maximum LAI obtained in 2008 was 6.5, the critical value of LAI to intercept 95% of the radiation was around 4. In 2007, the maximum value obtained was of 4.1, but similar to 2008, the critical LAI to intercept 95% was around 3.8, next to the value of 2008. So, more available radiation and similar foliar area duration allowed a greater PAR radiation interception during the reproductive phase of 2007.

The differences in soybean RUE between 2007 and 2008 experiments must have been influenced by differences in meteorological conditions observed. The diurnal vapor pressure deficit (VPD) was not very different in the two experiments, despite the difference in water availability, which presented means of 0.79 kPa for the entire cycle in 2007 and of 0.65 kPa in 2008. The difference between them was 0.14 kPa, which is

too low to significantly affect the RUE when compared to the range observed in other works (KINIRY, 1999). On the other hand, the differences between those years were higher during the reproductive stage (0.086 kPa), compared to the vegetative stage (0.003 kPa).

The difference in air temperature was only 0.59°C for the entire cycle (25.65°C in 2007 and 25.06°C in 2008), and it was 0.24°C during the vegetative stage and 0.83°C during the reproductive stage. Despite the higher difference at the reproductive stage, the variations observed in Amazonia air temperature are not considered sufficient to lead to the differences observed in the radiation use efficiency by itself, when compared to the amplitudes in air temperature found by Andrade et al. (1993) (15.9°C – 20.9°C).

Sinclair et al. (1992a) found a great dependence of the RUE by soybean on the increase in diffuse radiation. With the increase in the fraction of diffuse radiation, there is an increase in biomass accumulation due to the relative contribution of the shaded leaves, since they are much more photosynthetically efficient than those exposed to direct-beam radiation, which contributes to the increase in radiation use efficiency.

Similar results were found by Alton et al. (2007), who attributed an increase of 6 to 33% in the radiation use efficiency to the increment of diffuse component in incident solar radiation. Rochette et al. (1996) observed a decrease of 30% in the RUE of maize when atmospheric conditions changed from completely cloudy to clear sky. According to Anderson et al. (2000), if 50% of the beam radiation is adopted as a reference, instantaneous values of RUE in soybean may be 40% higher under diffuse light and 40% lower for a clear sky.

One of the specific characteristics of the Amazon region is that, during the period of soybean cycle, from February to June (rainy season), the degree of cloudiness is relatively high during the whole day. It makes most part of the incident radiation reach the soil surface as diffuse radiation, which could also contribute to the difference found between years. However, the absence of measured data and available information to corroborate this statement does not allow to affirm that this meteorological variable was the main cause of the difference found.

Drought caused reduction in dry matter production and leaf area in 2007 which represents a drought tolerance mechanism as a water conservation strategy by the crop. In such drought conditions coupled with higher air temperature and VPD, the imminent closure of stomata induces to a lower CO₂ fixation and consequently to a lower efficiency in the use of the intercepted radiation in 2007. Similar reduction in the

soybean RUE under water stress was found by Confalone and Navarro (1999) and Muchow et al. (1993).

Inamullah and Isoda (2005) found that the reduction in soybean CO₂ assimilation rate under drought stress is related to the direct photodamaging effect of water scarcity and higher leaf temperature. This reduction is an adaptive characteristic of soybean to provide photoprotection of the photosystem through the down-regulation of photosystem activity (PSII) and by increasing thermal dissipation of excess absorbed light energy as heat (INAMULLAH; ISODA, 2005).

4. CONCLUSIONS

The RUE of soybean was sensitive to the weather conditions in the Amazon region between years.

In 2007 the RUE value was small as a consequence of coupled effect of the higher air temperature and VPD and the water deficit that occurred from fructification stage to maturation.

Besides the differences in the meteorological conditions observed between years, the increase in the fraction of diffuse radiation that reached the surface during 2008 in the Amazon region could have affected the soybean RUE.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

To Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico for financial support; to Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior for postgraduate scholarship; to Dr Celso Von Randow for english correction.

6. REFERENCES

ALBRIZIO, R.; STEDUTO, P. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea I. Radiation use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 130, p. 254-268, 2005.

ALTON, P. B.; NORTH, P. R.; LOS, S. O. The impact of diffuse sunlight on canopy light-use efficiency, gross photosynthetic product and net ecosystem exchange in three forest biomes. **Global Change Biology**, v. 13, p. 776-787, 2007.

ANDERSON, M. C.; NORMAN, J. M.; MEYERS, T. P.; DIAK, G. R. An analytical model for estimating canopy transpiration and carbon assimilation fluxes based on canopy light-use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 101, p. 265-289, 2000.

ANDRADE, F.H.; UHART, S.A.; CIRILO, A. Temperature affects radiation use efficiency in maize. **Field Crops Research**, v. 32, p. 17-25, 1993.

ARKEBAUER, T.J.; WEISS, A.; SINCLAIR, T.R.; BLUM, A. In defense of radiation use efficiency: a response to Demetrides-Shah et al. (1992). **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 68, p. 221-227, 1994.

BENINCASA, M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. Jaboticabal: Funep, 2003. 41 p

BLACK, C.; ONG, C. Utilization of light and water in tropical agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 104, p. 25-47, 2000.

COLLINO, D.J.; DARDANELLI, J.L.; SERENO, R.; RACCA, R.W. Physiological response of Argentine peanut varieties to water stress. Light interception, radiation use efficiency and partitioning of assimilates. **Field Crops Research**, v. 70, p. 177-184, 2001.

CONFALONE, A.E.; NAVARRO, M.D. Influencia do déficit hídrico sobre a eficiência da radiação solar em soja. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 5, n. 3, p. 195-198, 1999.

CONFALONE, A.E.; COSTA, L.C.; PEREIRA, C.R. Crescimento e captura de luz em soja sob estresse hídrico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, p. 165-169, 1998.

COSTA, L. C.; CONFALONE, A.; PEREIRA, C. R. Effect of water stress on the efficiency of capture of water and radiation by soybean. **Tropical Science**, v. 39, p. 91-97, 1999.

COSTA, M. H.; YANAGY, S. M. N; PONTE DE SOUZA, P. J. O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 34, 2007.

DEMETRIADES-SHAH, T. H.; FUCHS, M.; KANEMASU, E. T.; FLITCROFT, I. D. A note of caution concerning the relationship between cumulated intercepted solar radiation and crop growth. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 58, p. 193-207, 1992.

EL-HUSNY, J. C.; ANDRADE, E. B.; ALMEIDA, L. A.; KLEPER, D.; MEYER, M. C. **BRS Tracajá**: cultivar de soja para a região sul do Pará. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2003b. 5 p. (Comunicado técnico, 83).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido. Laboratório de Climatologia. **Normais climatológicas de Paragominas no período de 1980 a 1988**. Belém, 1988.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular técnica, 48).

FEARNSIDE, P. M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, v. 28, n. 1, p. 23-28, 2001.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. (Special Report, 80).

INAMULLAH, A.; ISODA, A. Adaptive response of soybean and cotton to water stress II. Changes in CO₂ assimilation rate, chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index in relation to leaf temperature. **Plant Production Science**, v. 8, p. 131-138, 2005.

KINIRY, J. R. Response to questions raised by Sinclair and Muchow. **Field Crops Research**, v. 62, p. 245-247, 1999.

LINDQUIST, J. L.; ARKEBAUER, T. J.; WALTERS, D. T.; CASSMAN, K. G.; DOBERMANN, A. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 72-78, 2005.

MONSI, M.; SAEKI, T. Uber den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung fur die stoff prdktion. **Japanese Journal of Botany**, v. 14, p. 22-52, 1953.

MONTEITH, J. L. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 68, p. 213–220, 1994.

MUCHOW, R. C. Effect of water and nitrogen supply on radiation interception and biomass accumulation of kenaf (*Hibiscus cannabinus*) in a semi-arid tropical environment. **Field Crops Research**, v. 28, p. 281-293, 1992.

MUCHOW, R. C.; ROBERTSON, M. J.; PENGELLY, B. C. Radiation-use efficiency of soybean, mugbean and cowpea under different environmental conditions. **Field Crops Research**, v. 32, p. 1-6, 1993.

MUELLER, C. C.; BUSTAMANTE, M. **Análise da expansão agrícola no Brasil**. Disponível em: <www.worldbank.org/rfpp/news/debates/mueller.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2006.

OYA, T.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; TOBITA, S.; ITO, O. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars: evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivars in the field. **Plant Produc. Sci.**, v. 7, n. 2, p. 129-137, 2004.

PENGELLY, B. C.; BLAMEY, F. P. C.; MUCHOW, R. C. Radiation interception and accumulation of biomass and nitrogen by soybean and three tropical annual forage legumes. **Field Crops Res.**, v. 63, p. 99-112, 1999.

ROCHETTE, P.; DESJARDINS, R. L.; PATTEY, E.; LESSARD, R. Instantaneous measurement of radiation and water use efficiencies of a maize crop. **Agronomy Journal**, v. 88, p. 627-635, 1996.

SANTOS, J. B.; PROCÓPIO, S. O.; SILVA, A. A.; COSTA, L. C. Captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Bragantia**, v. 62, p. 147-153, 2003.

SCHOFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para a produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, p. 241-249, 2001.

SINCLAIR, T. R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. I. Model development. **Field Crops Research**, v. 15, p. 125-141, 1986.

SINCLAIR, T. R. Model analysis of plant traits leading to prolonged crop survival during severe drought. **Field Crops Research**, v. 68, p. 211-217, 2000.

SINCLAIR, T. R.; HORIE, T. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. **Crop Science**, v. 29, p. 90-98, 1989.

SINCLAIR, T. R.; MUCHOW, R. C. System analysis of plant traits to increasing grain yield on limited water supply. **Agronomy Journal**, v. 93, p. 263-270, 2001.

SINCLAIR, T. R.; SHIRAIWA, T.; HAMMER, G. L. Variation in crop radiation-use efficiency with increased diffuse radiation. **Crop Sci.**, v. 32, p. 1281-1284, 1992a.

CAPÍTULO 7

BALANÇO DE ENERGIA

1. INTRODUÇÃO

O cultivo da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) na Amazônia iniciou-se na década de 2000, com uma área de plantio de 73 mil ha, área considerada restrita ao restante do País. No estado do Pará, por exemplo, a área plantada era de apenas 1.200 ha em 2000, mas a região já vinha recebendo incentivos do governo desde 1994 para estimular o aumento da produção de grãos principalmente nas regiões de Santarém e Paragominas (MUELLER; BUSTAMANTE, 2006).

A área plantada em 2008 no estado já chegava a 71 mil ha, com produtividade média de 3 t ha⁻¹ (SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA – SAGRI, 2009). No entanto, de acordo com Schneider et al. (2000), apenas cerca de 17% da região Amazônica localizada na parte sul, teriam condições favoráveis para o sucesso da agricultura. Com o desenvolvimento de novas variedades menos sensíveis às elevadas temperaturas e principalmente ao fotoperíodo, tornou-se possível a expansão da sojicultura em regiões de baixa latitude (SINCLAIR et al., 2005).

Em um estudo mais recente Vera-Diaz et al. (2008) encontraram que apesar dos sérios impactos decorrentes do avanço da soja na Amazônia, excluindo-se as áreas protegidas como terras indígenas e reservas florestais, apenas 20% da Amazônia Legal,

cerca de 1,0 milhão km², são consideradas áreas potenciais para rendimentos superiores a 2 t ha⁻¹.

De acordo com os mesmos autores, características como condições edafoclimáticas adequadas, crédito financeiro acessível, facilidade no transporte e menor gasto com o uso de fertilizantes e defensivos são fatores determinantes para se potencializar o plantio extensivo nestas áreas. No entanto, desta área citada, 44% pertencem ao estado do Mato Grosso onde a soja já se encontra totalmente expandida representando uma barreira econômica para o contínuo avanço desta cultura na Amazônia.

Caso haja investimento em melhorias na infra-estrutura de transporte na Amazônia por parte do governo Brasileiro as áreas com potencial de produtividade da soja superior a 2 000 kg ha⁻¹ aumentaria significativamente (VERA-DIAZ et al., 2008) podendo acelerar ainda mais o desmatamento na região. Soares-Filho et al. (2005) estimam que mais de 50% da área original da Amazônia seria desmatada até 2030. Em eventuais circunstâncias a soja poderia ser considerada um risco iminente para a biodiversidade e clima da Amazônia.

Resultados encontrados por Souza et al. (2008a) mostram que o avanço da soja na região Amazônica causa alterações significativas no albedo, e conseqüentemente no balanço de radiação local, podendo ocasionar alterações no regime de chuvas da região (COSTA et al., 2007). A substituição do ecossistema original para o cultivo da soja gera um impacto negativo médio de 16,6% no saldo de energia local durante o ciclo da cultura (cerca de 1/3 do ano), enquanto que durante os 2/3 restantes do ano a redução média encontrada é de 15,5% (SOUZA et al., 2009a).

Diante da necessidade de se avaliar as conseqüências do avanço da soja na Amazônia, torna-se importante estudar o comportamento dos componentes energéticos neste tipo de ecossistema uma vez que tais informações possibilitarão um melhor entendimento de como o ciclo hidrológico e o clima local/regional serão afetados pela mudança no uso da terra na Amazônia.

Este estudo surgiu para investigar este novo padrão de mudança no uso do solo na Amazônia e tem por objetivo analisar o comportamento do balanço de energia ao longo do sistema de produção da soja na região Amazônica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área experimental

O experimento foi conduzido durante a safra de 2007 no município de Paragominas, situado na região nordeste do Estado do Pará. Esta região foi escolhida pelo fato de ter apresentado uma grande expansão do cultivo da soja nos últimos anos. A área experimental com plantio de soja foi de 200 ha com as coordenadas geográficas 02°59'08" de latitude sul e 47°19'57" de longitude oeste. Toda a área foi plantada mecanicamente com a cultivar Tracajá (ciclo intermediário) em fileiras espaçadas de 0,5m e espaçamento entre plantas de 0,1 m. A semeadura foi realizada em 23 de fevereiro e a colheita foi feita em 21 de Junho do mesmo ano.

2.2. Dados

Uma torre instrumentada foi montada no centro da área contendo vários sensores micrometeorológicos (Tabela 1). Todos os sensores foram ligados a um datalogger CR10X (Campbell Scientific, Inc.) e um multiplexador AM416 (Campbell Scientific, Inc.).

A análise do desenvolvimento da soja foi feita diariamente usando a classificação dos estádios proposta por Fehr e Caviness (1977) conforme Tabela 1A e Figura 1B apresentadas nos Apêndices A e B, respectivamente, em um experimento inteiramente ao acaso, com quatro repetições. A análise da área foliar se deu pela amostragem aleatória de plantas nas linhas do plantio. Para isso um conjunto de plantas foi coletado em um metro de comprimento da linha contendo seis repetições a cada amostragem. A área foliar foi obtida por meio de coleta de 30 discos foliares por repetição e estimada de acordo com a metodologia proposta por Benincasa (2003). O índice de área foliar (IAF) foi então estimado considerando estas medidas e o peso seco das folhas amostradas.

Tabela 1 – Lista de instrumentos, alturas e medições da estação meteorológica automática instalada no experimento da soja

Variável meteorológica	Instrumento usado, fabricante (modelo)	Alturas
Radiação global incidente e refletida	Pyranometers Kipp & Zonen (CMP3)	2,45 (m)
Saldo de radiação	NR Lite (Campbell Sci.)	2,45 (m)
Temperatura do ar	Vaisala thermohygrometer (HMP35A), PT100 resistors	0,5; 1; 2 (m)
Umidade relativa do ar	Vaisala thermohygrometer (HMP35A),	0,5; 1; 2 (m)
Umidade do solo	Soil Reflectômetros (CS615)	10; 20; 0 to 30 (cm de profundidade)
Velocidade do vento	Cup Anemometers vector R.M. Young ()	0,5; 1; 2 (m)
Chuva	Rain gauge TB4	3,9 (m)
Fluxo de calor no solo	Flux plates Hukseflux (HFP01SC-L)	10; 10 (cm de profundidade)

2.3. Metodologia

Os componentes do balanço de energia analisados são representados pela equação 1:

$$Rn = H + LE + G + \Delta Qs + \Delta Qa \quad (1)$$

em que os componentes ΔQs e ΔQa representam o fluxo de calor armazenado e o fluxo de calor advectado lateralmente ao longo do volume de controle, respectivamente, Rn o saldo de radiação, H , LE e G os fluxos de calor sensível, latente e para o solo, respectivamente.

A energia armazenada no dossel (ΔQs) foi desconsiderada no balanço por apresentar relativa importância apenas durante as fases de transição do dia (MOORE; FISCH, 1986), representando no caso da soja no máximo 8% do saldo de radiação no início do dia (MEYERS; HOLLINGER, 2004). A energia advectada (ΔQa) foi

considerada desprezível pela condição de extensa bordadura presente no experimento (GAVILAN; BERENGENA, 2007).

Os componentes H e LE foram obtidos por meio da razão de Bowen (β) medida através das relações do transporte vertical de calor e vapor d'água, assumindo que exista igualdade nos coeficientes de transporte turbulento (K_H e K_{LE}) (ARIA, 1998).

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{C_p \Delta T}{\lambda \Delta q} \quad (2)$$

em que, C_p é o calor específico à pressão constante ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) λ é o calor latente de evaporação (J kg^{-1}).

Tomando-se a equação da umidade específica (ARIA, 1998), é possível expressar a razão de Bowen em função da pressão de vapor d'água (e):

$$\beta = \frac{C_p P}{\lambda \cdot 0,622} \frac{\Delta T}{\Delta e} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (3)$$

em que, P é a pressão atmosférica (Kpa), γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{Kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$), ΔT e Δe são as diferenças de temperatura do ar ($^\circ\text{C}$) e de pressão de vapor d'água (Kpa) entre dois níveis consecutivos, respectivamente.

Para evitar problemas associados ao efeito de áreas adjacentes nas medidas, os instrumentos foram instalados de forma que apresentassem suficiente bordadura na direção predominante do vento (de 900 a 1.000 m) obedecendo a razão 1:100 exigida e o nível dos sensores foi alterado frequentemente com o crescimento da cultura, mantendo-se sempre o mesmo intervalo do perfil (0,5-1-2m) garantindo que os mesmos permanecessem dentro da camada limite de equilíbrio (ROSEMBERG et al., 1983).

Diferentes critérios são utilizados para a eliminação de dados não confiáveis deste método, como valores de β iguais a -1, β menores que -0.75, valores de β entre -0.7 e 0.7, ou valores de β compreendidos entre -1.3 e -0.7 (ORTEGA-FARIAS et al., 1996; UNLAND et al., 1996).

Adotou-se a metodologia proposta por Perez et al. (1999) onde é sugerido um método analítico para determinar a consistência dos sinais observados na relação fluxo-gradiente entre as componentes e de quais valores de β próximos de -1 podem ser desprezados, baseado nas medidas do gradiente de pressão de vapor d'água e na

resolução dos sensores utilizados, resultando em um intervalo em torno de -1 que varia para diferentes condições.

O déficit de pressão de vapor foi usado nas análises e foi calculado pela diferença entre a pressão de saturação de vapor d'água e a pressão atual de vapor d'água nos dias 73 e 86 após a semeadura. Para estes dias em especial, utilizou-se o fator de desacoplamento proposto por Jarvis e McNaughton (1986) a fim de se avaliar a sensibilidade da partição da energia na soja em função do controle climático e biológico, conforme a equação 4:

$$\Omega = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma \cdot (1 + g_a / g_c)} \quad (4)$$

em que Δ é a declividade da curva de pressão de saturação do vapor versus a temperatura; γ é o coeficiente psicrométrico; e g_a e g_c são as condutâncias aerodinâmicas e da superfície respectivamente.

A condutância aerodinâmica foi calculada de acordo com Allen et al. (1998) e a condutância da superfície estimada através da resistência estomática (r_c) de acordo com Costa (2008), conforme a equação 5:

$$r_c = \left[28,11 \cdot \exp\left(\frac{10,5 \cdot DPV \cdot T_{ar}}{R_{in}}\right) \right] \quad (5)$$

em que DPV é o déficit de pressão de vapor (Kpa), T_{ar} a temperatura do ar (°C) e R_{in} a radiação solar incidente ($W m^{-2}$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante todo o ciclo da soja a energia disponível (R_n) atingiu valores máximos próximos de $600 W m^{-2}$ em torno do meio dia (Figura 1). À medida que a soja se desenvolve, ocorre um aumento considerável no fluxo de calor latente logo após a formação do 5º trifoliolado (V5) e principalmente entre o florescimento (R1) e a fase de enchimento de grãos (R5). Como consequência menor quantidade de energia é

disponibilizada para o fluxo de calor sensível, que resulta no aquecimento do ar e do solo.

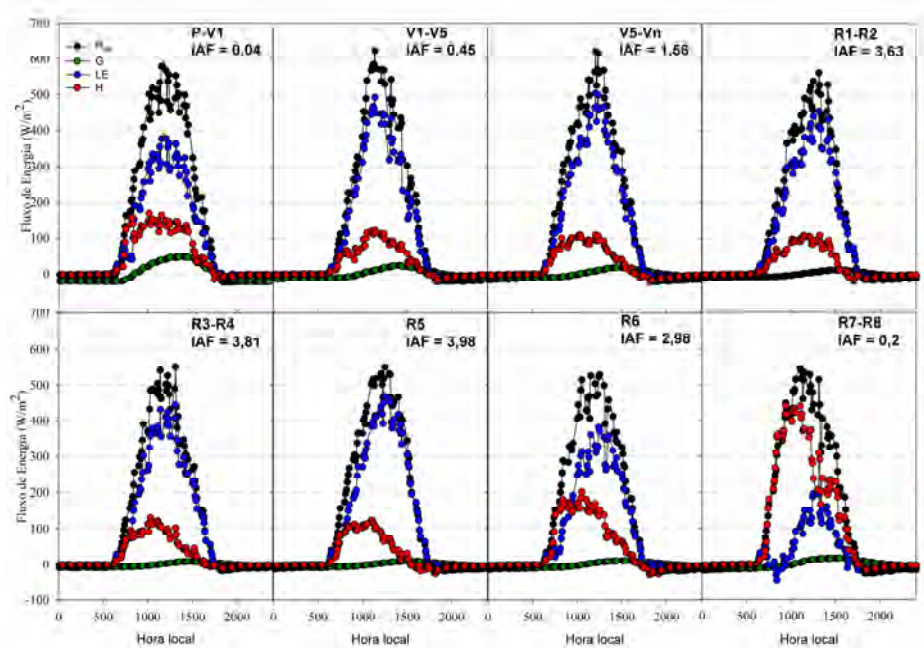


Figura 1 – Fluxo de energia médio para cada fase da soja na Amazônia.

O aumento no consumo da energia pela evapotranspiração durante este período está diretamente associado ao aumento no índice de área foliar (FARIAS et al., 2001) e à ocorrência de baixa resistência do dossel devido boas condições de disponibilidade de água (ORTEGA-FARIAS et al., 2004). Trabalhando com a mesma cultura vários autores encontraram resultados semelhantes ao deste estudo; André e Viswanadham (1986) e Fernandes (2007) em São Paulo; Fontana et al. (1991a) no Rio Grande do Sul; Suyker e Verma (2008) em Nebraska; e Sauer et al. (2007) em Iowa, Estados Unidos.

Durante quase toda a fase reprodutiva da soja (R1-R6), pouca energia atinge a superfície do solo devido aos elevados valores de índice de área foliar (IAF). Enquanto o solo encontra-se parcialmente coberto observam-se picos instantâneos de até 48 Wm^{-2} de energia, o que corresponde a aproximadamente cerca de 10% do saldo de radiação. À medida que ocorre o fechamento do dossel a quantidade de irradiância que atinge o solo diminui apresentando picos de no máximo 8 Wm^{-2} (2,7% do saldo).

Durante o período de cobertura plena, pouca energia é utilizada na forma de calor sensível, havendo, no entanto um aumento considerável neste componente após a fase de vagem cheia (R6) (Figura 1). Durante esta fase da soja tem-se a intensificação da senescência em decorrência da translocação de nitrogênio e de biomassa das folhas para os grãos (SINCLAIR; DE WIT, 1976). Como consequência deste processo há uma considerável redução na área foliar da soja a qual se torna um importante fator no controle da partição da energia (SUYKER; VERMA, 2008).

A partir da fase de vagem cheia (R6), ocorre uma considerável redução em LE. Durante a fase de maturação plena (R7-R8), quando a vagem encontra-se praticamente seca há uma inversão nos componentes do balanço de energia, passando a existir maior consumo de energia preferencialmente para aquecimento do ar (H) (Tabela 2).

Tabela 2 – Média diária dos componentes do balanço de energia e partição durante 24 horas para determinadas fase da soja na Amazônia

Fases	IAF	Chuva (mm)	Rn (MJ m ⁻² d ⁻¹)	G (MJ m ⁻² d ⁻¹)	LE (MJ m ⁻² d ⁻¹)	H (MJ m ⁻² d ⁻¹)	LE/Rn	H/Rn
P-V1	0,04	32,8	12,10(±0,97)	-0,01(±0,10)	8,01(±0,58)	3,88(±0,46)	0,66	0,32
V1-V5	0,32	91,0	11,46(±0,61)	-0,17(±0,04)	9,38(±0,45)	2,24(±0,20)	0,82	0,20
V5-R1	1,36	60,4	11,39(±0,82)	-0,12(±0,03)	9,51(±0,65)	1,97(±0,18)	0,83	0,17
R1-R2	3,63	36,0	11,06(±0,82)	-0,14(±0,03)	9,15(±0,68)	2,00(±0,19)	0,83	0,18
R3-R4	3,81	105,2	10,97(±0,47)	-0,14(±0,03)	8,85(±0,42)	2,22(±0,20)	0,81	0,20
R5	3,98	43,8	11,69(±0,47)	-0,07(±0,02)	9,63(±0,42)	2,12(±0,17)	0,82	0,18
R6	2,99	17,8	11,13(±0,39)	-0,07(±0,03)	7,48(±0,44)	3,70(±0,39)	0,67	0,33
R7-R8	0,20	23,4	11,45(±0,27)	-0,02(±0,02)	2,41(±0,60)	9,05(±0,60)	0,21	0,79

O maior consumo de energia no processo de evapotranspiração ocorre durante a fase reprodutiva, apresentando um consumo médio diário de 83% do saldo de radiação (Tabela 2). Fontana et al. (1991a) encontraram para a soja no Rio Grande do Sul um consumo médio diurno de cerca de 95% da energia na forma de calor latente quando submetida à irrigação, e de 78% sem irrigação. Estes resultados diferem um pouco dos encontrados aqui pelo fato dos autores obterem a média diária considerando apenas o período diurno e por estarem em uma região subtropical.

Na maturação fisiológica, maior parte da energia é usada no aquecimento do ar (80%) uma vez que com o processo de senescência das folhas, a soja reduz consideravelmente sua taxa de transpiração, existindo apenas a evaporação da água do solo embora a dessecação do material ainda existente possa também contribuir (SAUER et al., 2007).

Apesar de existir um consumo de mais de 80% da energia na evapotranspiração entre as fases V1 e R5 durante o período diurno, onde o saldo de radiação é positivo, grande parte deste consumo ocorre somente após o meio dia local (Figura 2). No final da tarde ocorre um consumo de quase toda a energia durante estas fases, fato este que indica a ocorrência de advecção de calor sensível conforme constatado por Sauer et al. (2007).

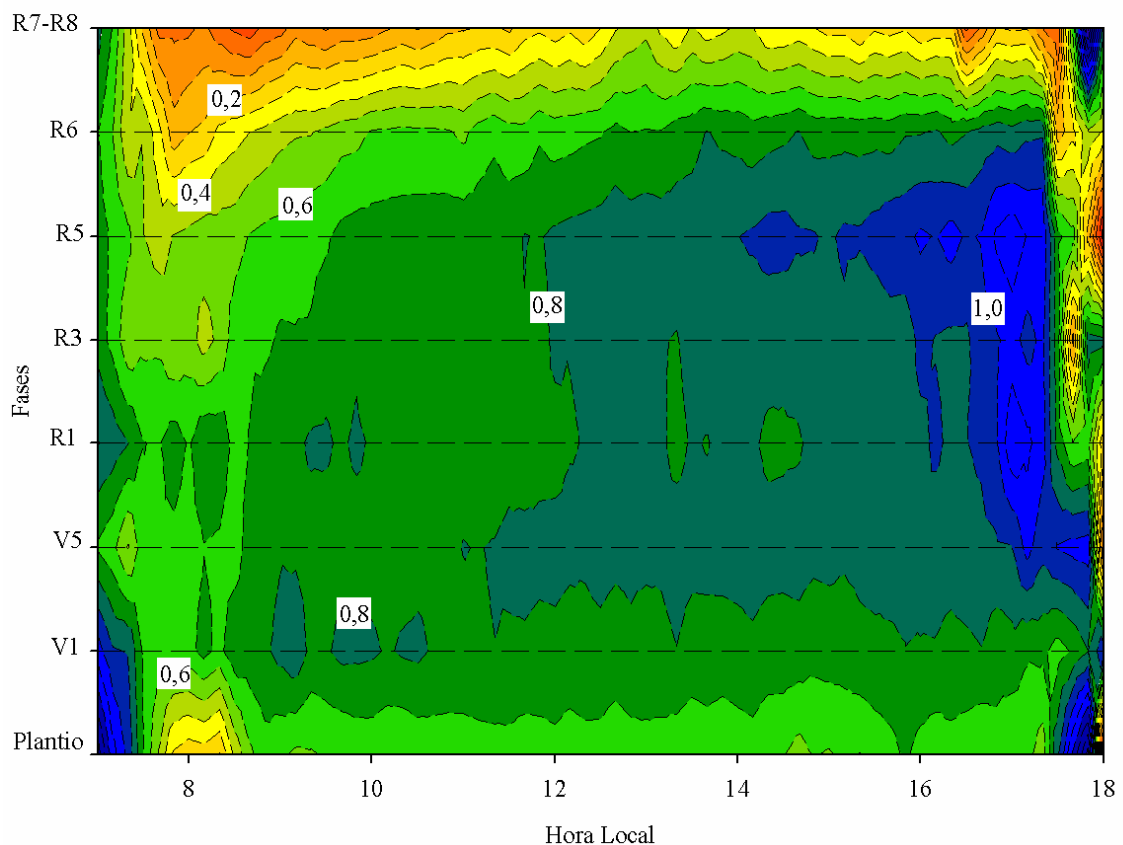
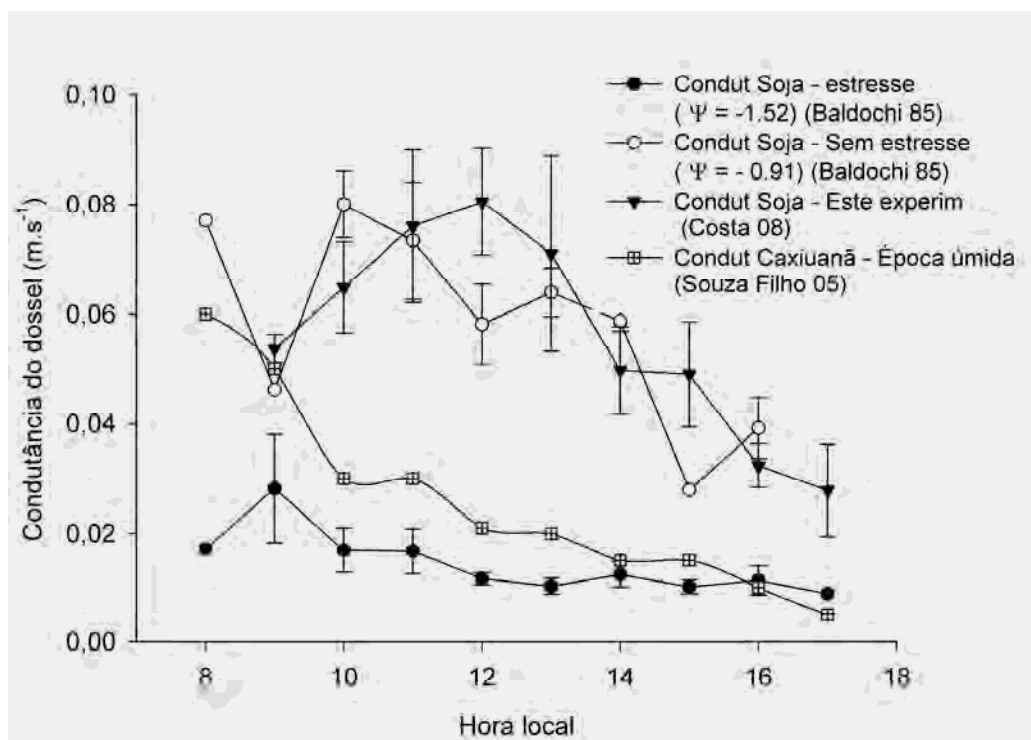


Figura 2 – Variação horária média da partição de energia disponível como calor latente durante o ciclo da soja.

Durante o início da manhã até o meio dia o processo de evapotranspiração consome até no máximo 70% da energia disponível nas fases citadas. O baixo consumo de energia por LE logo no início da manhã está associado a formação de nevoeiro nesta região, a qual foi frequentemente observado na maioria dos dias. Esta variação horária no consumo da energia pela soja ocorre pelo fato de nesta região as chuvas ocorrerem com maior frequência a partir da tarde, aumentando a disponibilidade de água no solo neste horário além do maior déficit de pressão de vapor existente.

Costa (2008) estudando a variação ao longo do dia da condutância de superfície para o mesmo experimento verificou valores máximos ocorridos ao meio dia de até $0,10 \text{ m.s}^{-1}$ e mínimas de até $0,03 \text{ m.s}^{-1}$ no final da tarde para a soja com IAF entre 3 e 4. Resultados muito semelhantes foram obtidos por Baldochi et al. (1985) para a soja cultivada sem estresse hídrico em Nebraska (Figura 3).



Fonte: Costa (2008), Baldochi et al. (1985) e Souza Filho et al. (2005).

Figura 3 – Variação média horária da condutância da superfície na soja com IAF entre 3 e 4, na soja submetida a estresse e sem estresse hídrico com IAF entre 3,4 e 3,8 e em ecossistema florestal na Amazônia.

Os valores de condutância da superfície encontrados neste experimento são superiores aos obtidos por Baldochi et al. (1985) para a soja sob estresse hídrico e para ecossistemas de floresta na Amazônia (SOUZA FILHO et al., 2005). Esta diferença está diretamente associada à disponibilidade de água existente durante esta época do ano como também ao elevado IAF observado na soja.

Logo, no período de semeadura da soja na Amazônia que coincide com a maior disponibilidade de água, o aumento no IAF e a maior condutância da superfície justificam a maior utilização de energia na evapotranspiração da soja em comparação com a cobertura original da floresta uma vez que o consumo de energia por LE aumenta de forma logarítmica com o aumento da condutância estomática nesta cultura (BALDOCHI et al., 1985).

Esta dinâmica existente na fisiologia da cultura e conseqüentemente no processo de trocas gasosas entre o ecossistema da soja e a atmosfera normalmente não é considerada nos modelos de circulação geral e de meso-escala que tentam reproduzir impactos decorrentes do uso da terra comprometendo a veracidade dos resultados simulados (COHEN et al., 2007).

A Figura 4 apresenta os componentes do balanço de energia, o déficit de pressão de vapor e o fator de desacoplamento medidos em um dia chuvoso após dois dias de ocorrência de chuva e durante um dia considerado seco após três dias sem chuva durante a máxima cobertura do dossel e máximo consumo de energia pela evapotranspiração.

Nestes dois dias especificamente o consumo de energia pela evapotranspiração não foi muito diferente independente da ocorrência ou não de chuvas. No dia considerado úmido a energia consumida pela evapotranspiração ao longo do dia correspondeu a 83% da energia disponível, com 15% usada no aquecimento do ar. Com a ausência de chuvas durante um período de quatro dias seguidos, a partição da energia durante cobertura completa do dossel correspondeu a 78% para LE e 22% para H.

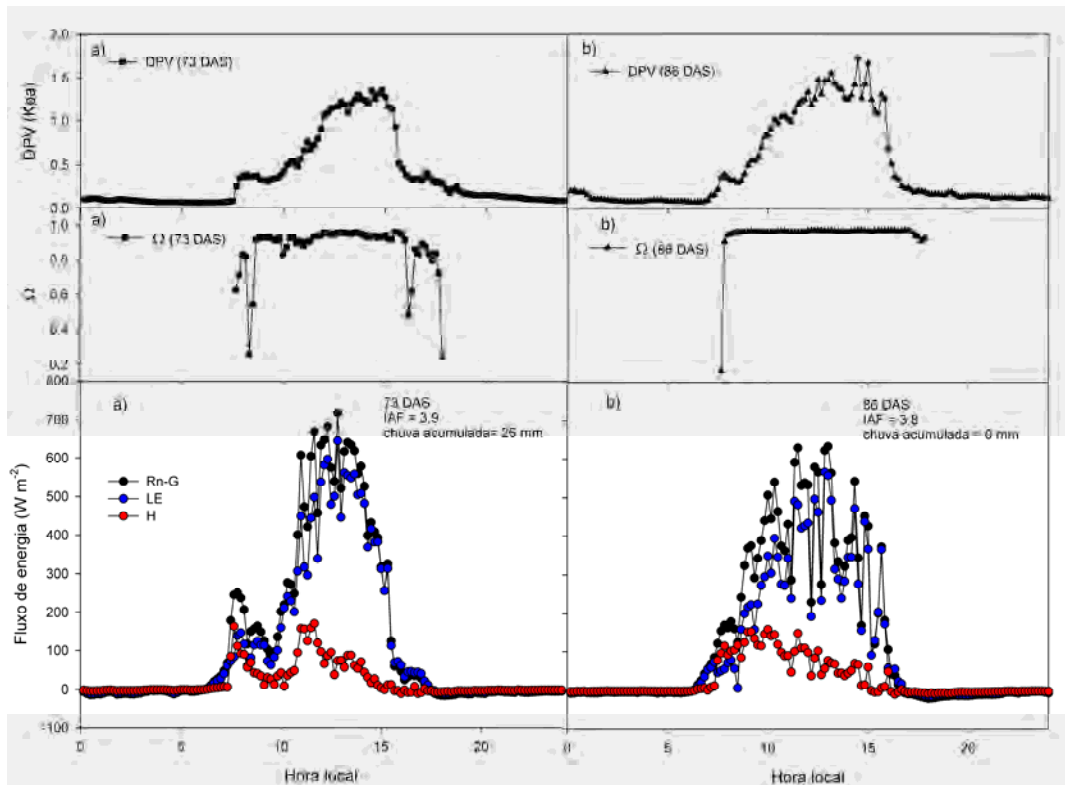


Figura 4 – Componentes do balanço de energia, déficit de pressão de vapor (DPV) e fator de desacoplamento (Ω) durante um dia úmido (a) e durante um dia seco (b) na fase R5 da soja.

Estes resultados podem ser justificados pela freqüente ocorrência de chuvas convectivas na região, as quais apresentam elevada intensidade, o que mantém o armazenamento de água no solo em níveis adequados por vários dias seguidos sem alterar a taxa evapotranspirativa. No entanto, observa-se que no dia considerado seco, o consumo da energia pela evapotranspiração foi fortemente controlado pela disponibilidade de energia, como sugerido pelos valores de Ω próximos de 1, indicando que o dossel da cultura encontrava-se totalmente desacoplado da atmosfera, havendo menor controle fisiológico neste processo apesar do elevado DPV.

Por outro lado, em dias chuvosos, o controle estomático no processo de perda de água apresenta um papel mais importante, principalmente em ocorrências de baixa disponibilidade de energia como observado na Figura 4a. Em ambos os casos, os valores médios observados de Ω foram sempre superiores ou próximos aos encontrados em outras regiões para ecossistemas de pastagem (LI et al., 2003) e diferentes usos da

terra (CHEN et al., 2009) ambos na china, e ecossistemas florestais na Amazônia (SOUZA FILHO et al., 2005).

Estes resultados sugerem que nesta região de produção de soja, a partição da energia em LE e conseqüentemente a evapotranspiração são mais sensíveis aos controles climáticos do que aos fisiológicos (condutância da superfície, DPV), corroborando a importância da elevada disponibilidade de água existente neste processo.

Resultados obtidos por Suyker e Verma (2008) sugerem um limite no IAF da soja entre 3 e 4 a partir do qual a evapotranspiração deixa de sofrer efeito direto da cobertura foliar, explicado pelo fato de não haver aumento relativo na interceptação da radiação. Em todo o experimento o IAF não ultrapassou 4,1, o que demonstra a importância secundária da cobertura foliar no controle da evapotranspiração nesta região.

3.1. Período de entressafra

As componentes H e LE apresentaram uma variação sazonal bastante brusca durante todo o sistema de produção da soja na região (Figura 5). Conforme discutido anteriormente, durante o ciclo da soja, o qual apresenta duração de 1/3 do ciclo anual, maior parte da energia é consumida pelo calor latente sendo muito pouco direcionado para H (Tabela 3). Um fato interessante, no entanto, é a ocorrência de uma brusca alteração no balanço de energia após o período da colheita que se estende por cerca de 2/3 do ciclo anual.

Sauer et al. (2007) encontraram comportamento semelhante na partição da energia durante a transição ciclo/entressafra da soja nos Estados Unidos, apresentando porém diferente magnitude do observado na Amazônia. É importante observar também que nesta região logo após a colheita o solo é deixado em pousio com restos culturais e com vegetação rasteira crescendo, sendo um dos principais motivos da grande mudança encontrada na entressafra (EL-HUSNY et al., 2003a).

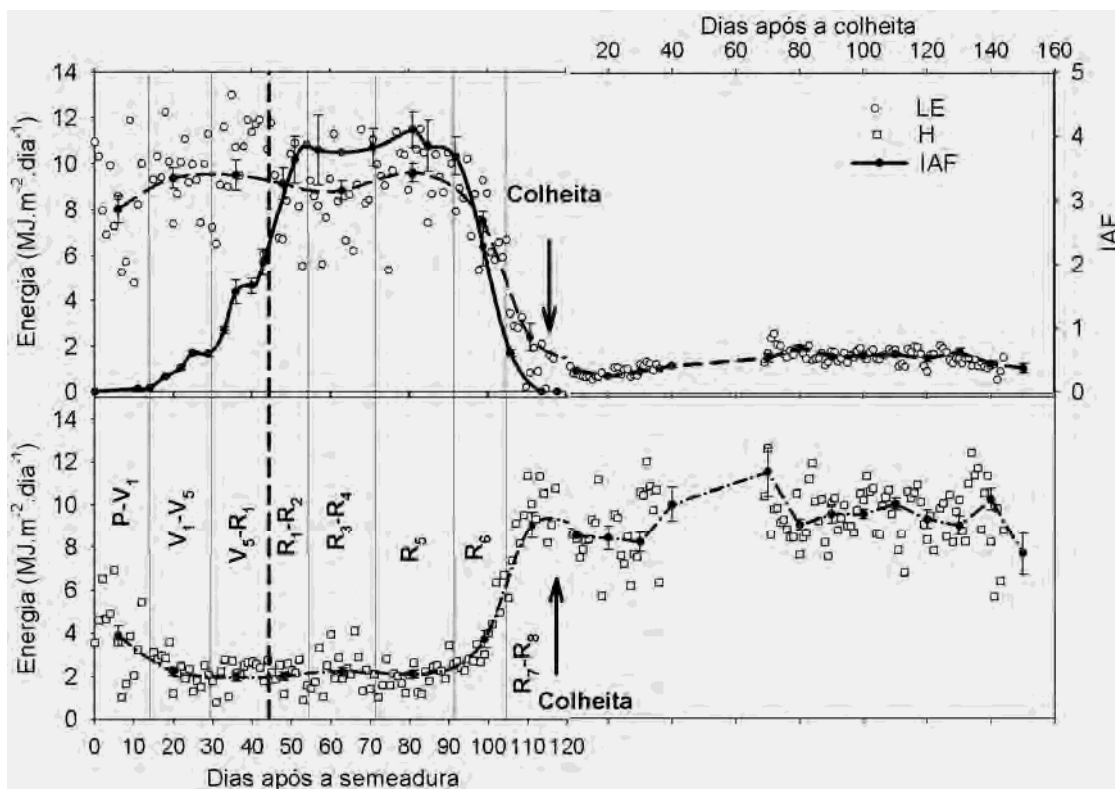


Figura 5 – Variação sazonal das componentes do balanço de energia durante o sistema de produção da soja na Amazônia.

Tabela 3 – Componentes do balanço de energia médio durante o ciclo e entressafra da soja na Amazônia

Período	Rnet (MJ m ⁻² .d ⁻¹)	H (MJ m ⁻² .d ⁻¹)	LE (MJ m ⁻² .d ⁻¹)	G (MJ m ⁻² .d ⁻¹)
Ciclo	11,57 (±0,20)	3,33 (±0,23)	8,23 (±0,26)	-0,08 (±0,01)
Entressafra	11,66 (±0,17)	9,32 (±0,14)	2,06 (±0,06)	0,28 (±0,02)

Valores em parênteses representam erro padrão de estimativa.

Esta variação sazonal tem efeito direto no ciclo hidrológico pelo fato de existir uma significativa redução na evapotranspiração durante a entressafra. Comportamento semelhante ao que foi encontrado por Sakai et al. (2004) para diferentes formas de uso da terra na Amazônia. O mesmo foi constatado por Suyker e Verma (2008) em sistemas de rotação de milho e soja nos Estados Unidos.

Nota-se uma rápida mudança na partição de energia a partir do início da senescência, seguindo o declínio do IAF. Até a fase R6 os valores médios diurnos da razão LE/Rn apresentaram uma variação típica de 0,5 a 0,95, e os de H/Rn entre 0,1 e 0,3. Após a senescência, os valores da partição para LE decrescem para valores entre 0,1 e 0,2 e para H aumentaram para o intervalo entre 0,8 e 0,9 apresentando o mesmo comportamento durante todo o período de entressafra.

Esta mudança na partição de energia e conseqüente redução na fração de calor latente é uma das principais conseqüências das atividades agrícolas nos ecossistemas terrestres devido à diminuição no período de crescimento das culturas em relação às espécies de plantas nativas (CHEN et al., 2009).

Esta variação sazonal nas componentes do balanço de energia é comumente desconsiderada em estudos de modelagem climática e sua inclusão pode vir a ser um dos fatores para melhorar a eficácia dos mesmos, especialmente em estudos sobre impactos pela mudança do uso da terra na Amazônia.

4. CONCLUSÕES

A soja utiliza mais energia na forma de calor latente, em especial entre as fases de florescimento e enchimento de grãos em função de sua elevada condutância estomática. Durante o ciclo da soja ocorre uma transição progressiva na partição da energia entre as componentes do balanço.

Observou-se um importante controle do índice de área foliar na partição da energia ao longo do ciclo. Durante a fase inicial, uma pequena parte da irradiância é direcionada para o solo, havendo uma brusca redução após o fechamento do dossel.

Maior parte da energia é direcionada para a evapotranspiração, havendo uma redução no fluxo de calor latente próximo da maturação, devido o redirecionamento da energia para a componente H.

Observou-se uma importante variação sazonal nas componentes do balanço de energia ao longo do sistema de produção da soja na Amazônia. Durante o período da

entressafra há um considerável aumento no fluxo de calor sensível e uma brusca redução no fluxo de calor latente devido ao sistema de produção empregado na região.

Este comportamento é desconsiderado na modelagem climática e sua inclusão pode vir a ser um dos fatores para melhorar a eficácia dos mesmos, especialmente em estudos sobre impactos pela mudança do uso da terra na Amazônia.

5. REFERÊNCIAS

ANDRE, R.G. B.; VISWANADHAM, Y. Distribuição de energia numa cultura de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 1, p. 29-37, 1986.

BALDOCHI, D. D.; VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J. Water use efficiency in a soybean field: influence of plant water stress. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 34, p. 53-65, 1985.

BENINCASA, M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. Jaboticabal: Funep, 2003. 41 p

CHEN, S.; CHEN, J.; LIN, G.; ZHANG, W.; MIAO, H.; WEI, L.; HUANG, J.; HAN, X. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 129, p. 1800-1809, 2009.

COHEN, J. C. P.; BELTRÃO, J. C.; GANDU, A. W.; SILVA, R. R. Influência do desmatamento sobre o ciclo hidrológico da Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 36-39, 2007.

COSTA, J. P. R. **Modelagem e simulação das interações biosfera-atmosfera em plantio de soja na Amazônia**. 2008. 127 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

COSTA, M. H.; YANAGY, S. M. N; PONTE DE SOUZA, P. J. O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 34, 2007.

EL-HUSNY, J. C.; ANDRADE, E. B.; SOUZA, F. R. S.; FILHO, A. S.; KEPLER, D.; ALMEIDA, L. A.; MEYER, M. C. **Recomendação de cultivares de soja para microrregião de Paragominas, Pará**. Belém: Embrapa-CPATU, 2003a. 6 p. (Comunicado técnico, 82).

FARIAS, J. R. B.; ASSAD, E. D.; ALMEIDA, I. R.; EVANGELISTA, B. A.; LAZZAROTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. (Special Report, 80).

FERNANDES, E. J. Estudo do calor sensível e latente obtidos por intermédio da razão de bowen em uma cultura de soja irrigada. **Irriga**, v. 12, p. 281-296, 2007.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 3, p. 403-410, 1991a.

GAVILAN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v. 25, p. 127-140, 2007.

JARVIS, P. G.; McNAUGHTON, K. G. Stomatal control of transpiration-scaling up from leaf to region. **Advances in Ecological Research**, v. 15, p. 1-49, 1986.

LI, S.; LAI, C. T.; YOKOYAMA, Y.; OIKAWA, T. Seasonal variation in energy budget and net ecosystem CO₂ exchange over a wet C₃/C₄ co-occurring grassland: effects of development of the the canopy. **Ecological Research**, v. 18, p. 661-675, 2003.

MEYERS, T. P.; HOLLINGER, S. R. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125, p. 105-115, 2004.

MOORE, C. J.; FISCH, G. Estimating heat storage in Amazonian Tropical Forest. **Agric. For. Meteorol.**, v. 38, p. 147-169, 1986.

MUELLER, C. C.; BUSTAMANTE, M. **Análise da expansão agrícola no Brasil**. Disponível em: <www.worldbank.org/rfpp/news/debates/mueller.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2006.

ORTEGA-FARIAS, S.; CUENCA, R. H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 81, p. 131-143, 1996.

ORTEGA-FARIAS, S.; OLIOSO, A.; ANTONIOLETTI, R.; BRISSON, N. Evaluation of the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration. **Irrigation Science**, v. 23, p. 1-9, 2004.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141-150, 1999.

ROSEMBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment**. 2.ed. New York: John Wiley, 1983. 495 p.

SAKAI, R. K.; FITZJARRALD, D. R.; MORAES, O. L. L.; STAEBLER, R. M.; ACEVEDO, O. C.; CZIKOWSKY, M. J.; SILVA, R.; BRAIT, E.; MIRANDA, V. Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in an Amazonian agricultural field. **Global Change Biology**, v. 10, p. 895-907, 2004.

SAUER, T. J.; SINGER, J. W.; PRUEGER, J. H.; DESUTTER, T. M.; HATFIELD, J. L. Radiation balance and evaporation partitioning in a narrow-row soybean canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 145, p. 206-214, 2007.

SCHNEIDER, R. R.; ARIMA, E.; VERISSIMO, A.; BARRETO, P.; SOUZA JUNIOR, C. **Amazônia sustentável: limitantes e oportunidades para o desenvolvimento rural**. Brasília: Banco Mundial; Belém: Imazon, 2000. (Série Parcelas, 1).

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA – SAGRI. **Evolução da produção no estado do Pará por município de 1994 a 2008**. Disponível em: <www.sagri.pa.gov.br>. Acesso em: 12 maio 2009.

SINCLAIR, T. R.; DE WIT, C. T. Analysis of the carbon and nitrogen limitations to soybean yield. **Agronomy Journal**, v. 68, p. 320-325, 1976.

SINCLAIR, T. R.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L. Comparison of vegetative development in soybean cultivars for low-latitude environments.. **Field Crops Research**, v. 92, p. 53-59, 2005.

SOARES-FILHO, B. S.; NEPSTAD, D. C.; CURRAN, L.; CERQUEIRA, G.; GARCIA, R. A.; RAMOS, C. A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; VOLL, E.; McGRATH, D. Cenários de desmatamento para Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 54, p. 138-152, 2005.

SOUZA, P. J. O. P.; ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, A.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C. Impactos no albedo em consequência do avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, n. 1, p. 87-95, 2008a.

SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Impactos do avanço do plantio de soja no balanço de energia na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16, 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2009a.

SOUZA FILHO, J. D. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M. H.; COHEN, J. C. Mecanismos de controle da variação sazonal da transpiração de uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 223-229, 2005.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 417-427, 2008.

UNLAND, H. E.; HOUSER, P. R.; SHUTTLEWORTH, W. J.; WANG, Z. L. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 82, p. 119-153, 1996.

VERA-DIAZ, M. C.; KAUFMANN, R. K.; NEPSTAD, D. C.; SCHLESINGER, P. An interdisciplinary model of soybean yield in the Amazon Basin: the climatic, edaphic, and economic determinants. **Ecological Economics**, v. 65, p. 420-431, 2008.

CAPÍTULO 8

IMPACTOS NO ALBEDO

(Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.16, n.1, p.87-95, 2008)

IMPACTOS NO ALBEDO EM CONSEQÜÊNCIA DO AVANÇO DA FRONTEIRA AGRÍCOLA NA AMAZÔNIA¹

Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza², Edson José Paulino da Rocha³, Aristides
Ribeiro⁴, Renata Silva Loureiro⁵, Carlos José Capela Bispo⁶

RESUMO: O avanço contínuo da fronteira agrícola na Amazônia tem deixado a comunidade científica cada vez mais preocupada ante os possíveis impactos ambientais decorrentes desta mudança no uso da terra. Neste trabalho foram avaliados os impactos no albedo da superfície devidos à substituição da floresta pelo cultivo da soja (*Glycine max (L.) Merrill*), em uma área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. O monocultivo da soja na Amazônia ocasiona uma mudança brusca na interação entre a radiação e a superfície, tendo como conseqüência uma redução na energia disponível para o ambiente devido ao aumento na reflexão da superfície. A mudança na cobertura original da Amazônia para o plantio de soja gera um aumento entre 53% e 117% no albedo da superfície, dependendo da fase fenológica da cultura. O uso do solo para fins de produção da soja na Amazônia causa um aumento médio de 93% na fração de radiação refletida durante um período médio de 125 dias.

Palavras-chave: Soja, Refletividade, Mudanças climáticas.

¹ Parte integrante da tese de Doutorado do primeiro autor

² Doutorando em Meteorologia Agrícola – DEA/UFV, Viçosa-MG, CEP 36570-000, Brasil, paulo.jorge@ufra.edu.br

³ Professor Adjunto IV, Dr., DM/UFPA, Belém-PA, CEP 66075-110, Brasil, eprocha@ufpa.br

⁴ Professor Adjunto IV, Dr., DEA/UFV, Viçosa-MG, CEP 36570-000, Brasil, ribeiro@ufv.br

⁵ Doutoranda, IPH/UFRGS, Porto Alegre-RS, CEP 91501-970, Brasil, renatasloureiro@hotmail.com

⁶ Mestre em Ciências Ambientais, DM/UFPA, Belém-PA, CEP 66075-110, Brasil, cjcapela@yahoo.com.br

ABSTRACT: The continuous border agricultural advance in Amazonia has been letting worried the scientific community due to possible environmental impacts of this change in land use. This work assessed the impacts in surface albedo due to change of Amazonia Rainforest by soybean crops (*Glycine Max (L.) Merryl*) in an area of continuous progress of the agricultural border. The soybean cultivation in the Amazon Region causes an abrupt change in the interaction between radiation and surface, having as consequence a reduction in the available energy to the environment due to the increasing in surface reflection. The changes in the Amazonia's original coverage for soybean crops generates an increase in the surface albedo between 53% and 117% depending on the stage of the crop. The land use for soybean production in the Amazonia causes a mean increase of 93% in the fraction of reflected global radiation during a period of 125 days.

Keywords: Soybean, Reflectivity, Climate change.

1. INTRODUÇÃO

Durante muitos anos a Amazônia foi cenário para vários estudos relacionados às prováveis alterações socioeconômicas (SOARES-FILHO et al., 2005), hidrológicas (SANTIAGO, 2005) e climáticas (HENDERSON-SELLERS; GORNITZ, 1984; NOBRE et al., 1991) devidas à substituição da floresta por áreas de pastagem. Com o avanço da fronteira agrícola na Amazônia, considerada como fator potencial para a mudança da cobertura e uso do solo, um outro enfoque vem ganhando espaço e preocupando a comunidade científica ante as prováveis mudanças ambientais decorrentes do avanço da monocultura da soja na região (MUELLER; BUSTAMANTE, 2006; DANTAS; FONTELES, 2006, D'ÁVILA, 2006).

A expansão rápida de plantios da soja no país foi uma consequência do apoio do governo Brasileiro e das condições edafoclimáticas favoráveis ao seu desenvolvimento (MUELLER, 1992). Na região Amazônica, no entanto, este tipo de atividade veio crescendo de forma paulatina, mas começou a ganhar espaço devido à existência de condições favoráveis para a expansão da lavoura aproveitando-se áreas de transição cerrado-floresta e terras desmatadas ou degradadas já existentes (MUELLER; BUSTAMANTE, 2006). A partir da década de 1990 a soja chegava na Amazônia, com cultivo (73 mil ha) insignificante em relação ao restante do país (MUELLER; BUSTAMANTE, 2006). No estado do Pará, a área plantada era de apenas 1,2 mil ha em 2000, sendo que a região já vinha recebendo incentivos governamentais desde 1994 para o aumento da produção de grãos, principalmente nas regiões de Santarém e Paragominas. No ano de 2006, a quantidade de área plantada no estado já chegava a 90 mil ha (SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA – SAGRI, 2008).

Muitos trabalhos mostram que a substituição da floresta por áreas de pastagem na Amazônia ocasiona sérios impactos como aumento na temperatura do ar (NOBRE et

al., 1991), aumento no albedo da superfície (RANDOW et al., 2004), e redução da evapotranspiração (SANTIAGO, 2005). No entanto, a maior parte destes trabalhos considera a pastagem como sendo a cobertura que substitui a cobertura original.

O desmatamento do ecossistema florestal para a produção de pasto tem como consequência uma mudança no albedo de 12,9% para 18,4%, conforme já foi reportado em diversos trabalhos científicos (CULF et al., 1995; CULF et al., 1996; RANDOW et al., 2004). Randow et al. (2004) encontraram valores de albedo de 13 e 20% para a floresta e pastagem, respectivamente, para a região sudoeste da Amazônia. No entanto, a mudança da cobertura vegetal de floresta para o cultivo de soja e o reaproveitamento de áreas de pastagem para o plantio da soja ocasionam mudanças mais drásticas associadas às mudanças na arquitetura da cultura ao longo de seu ciclo.

Resultados de Costa et al. (2007), baseados em dados preliminares deste estudo, mostram que a substituição da Floresta Amazônica para o plantio de soja ocasiona uma redução muito maior na precipitação da região quando comparado à substituição da floresta por áreas de pastagem, devido principalmente aos valores elevados do albedo da cultura da soja.

Entretanto, é importante salientar que o avanço desta cultura para as regiões de latitudes baixas surgiu como estratégia para atender à demanda crescente por alimentos associada ao aumento da população e, mais recentemente, pela pressão decorrente da busca por biocombustíveis. A baixa rentabilidade econômica das pastagens também contribuiu para que houvesse esta migração no uso da terra para fins agrícola na região. Outro detalhe, no entanto, é o fato de que em algumas cidades da Amazônia, a soja foi adotada como estratégia para levar desenvolvimento e agregar valores aos serviços gerados direta e indiretamente na região.

Baseado no exposto, buscou-se analisar neste trabalho as alterações ocorridas no albedo devido à substituição do ecossistema natural para a prática do cultivo da soja, em uma área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. Estas informações são importantes para uma parametrização mais precisa dos modelos de simulação climática e de impactos ambientais, pelo fato do albedo ser considerado um dos mais importantes controladores da convecção nos trópicos (BERBET; COSTA, 2003).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Localização

2.1.1. Ecossistema soja

O experimento foi conduzido no município de Paragominas, situado na região nordeste do Estado do Pará cuja sede localiza-se a 320 quilômetros da cidade de Belém, capital do estado. A área onde foi realizado o plantio de soja ocupa uma extensão de cerca de 200 ha, localizada entre as latitudes 03°01'47" S e 03°02'35" S e longitudes 47°17'23" W e 47°18'35" W (Figura 1).



Figura 1 – Localização do ecossistema florestal (A) e soja (B).

A escolha do município de Paragominas deveu-se ao fato de ter havido uma grande expansão do cultivo da soja nesta região nos últimos anos. O experimento foi realizado em 2006 e 2007, sendo utilizadas as variedades BRS *Candeia* (ciclo tardio) e BRS *Tracajá* (intermediário), respectivamente. Embora a variedade mais recomendada para região seja a *Tracajá* (EL-HUSNY et al., 2003a), utilizada no experimento de

2007, optou-se pela *Candeia* em 2006 por ser uma variedade recentemente desenvolvida pela Embrapa, com boa aceitação pelos produtores.

Foram utilizados dois sítios experimentais diferentes, um em cada ano. O primeiro localizado na fazenda Boi Branco próximo ao aeroporto da cidade e mais afastada do centro da cidade. O segundo localizado na fazenda El Shadai, distante 12 km da anterior, e mais próximo do centro.

No experimento de 2006 a área experimental foi semeada mecanicamente, utilizando a técnica de plantio direto, em fileiras espaçadas de 0,45 m, resultando em uma densidade de cerca de 222.000 plantas/ha. Em 2007, o plantio foi convencional, mudando-se o espaçamento entre linhas para 0,50 m, que resultou em uma densidade de 200.000 plantas/ha. As semeaduras foram realizadas nos dias 05 de fevereiro de 2006 e 23 de fevereiro de 2007, a uma taxa de 26-28 sementes por metro quadrado. As colheitas foram feitas nos dias 15 e 21 de junho de 2006 e 2007, respectivamente.

Na área onde os sensores foram instalados, foi realizado o plantio manual, utilizando os mesmos valores de espaçamento e adubação do plantio mecanizado. Aos 20 dias após a semeadura, foi feito o desbaste da área interna dos sensores, com o objetivo de seguir a mesma densidade do restante da área. Foram aplicados herbicida e inseticida quando necessário, nos dois experimentos.

Uma torre instrumentada de quatro metros de altura foi montada no centro da área, em que foram instalados sensores para registro da radiação solar incidente e refletida, temperatura do ar e totais de chuva, todos ligados a um *datalogger* CR10X (Campbell Scientific, Inc.) e um multiplexador AM416 (Campbell Scientific, Inc.).

A frequência de leitura dos dados foi de 10 segundos com gravação das médias e dos totais a cada 10 minutos. A coleta de dados foi entre os meses de fevereiro e junho de 2006 e 2007.

2.1.2. Ecossistema de floresta

Os dados referentes ao ecossistema florestal foram obtidos na Floresta Nacional de Caxiuanã localizada no setor central do estado do Pará, em área pertencente à região do Arquipélago do Marajó. Nesta área localiza-se a estação científica Ferreira Penna – ECFPn, uma base de pesquisa do Museu Paraense Emilio Goeldi, destinada a estudos de longo prazo e à formação de recursos humanos. O Projeto CARBO-PARÁ

opera um sítio experimental na área desde 1999 (00°50'31"S; 46°38'56"W; 30 m) cuja floresta possui um dossel com altura média de 36 m.

Foram utilizados dados médios de radiação solar, temperatura e totais de precipitação, a cada 30 minutos, obtidos através de uma estação automática constituída por um sistema automático de aquisição de dados (CR10, Campbell Scientific), instalado em uma torre de 54 m de altura, com frequência de leitura de 1 minuto. O período de dados utilizados no trabalho correspondeu aos mesmos do experimento da soja, ou seja, entre fevereiro e junho de 2006 e 2007.

2.2. Determinação do albedo

A Radiação Solar Global foi monitorada através de um piranômetro CMP3 (Kipp & Zonen, Campbell Scientific), sendo que a componente refletida da radiação solar foi medida invertendo-se o piranômetro. Os sensores foram instalados a 2,5 m de altura no ecossistema soja e a 45m de altura na floresta.

O albedo (α) foi obtido como sendo a razão entre as componentes refletida (R_r) e incidente (R_g) da radiação global, conforme definido pela equação 1:

$$\alpha = \frac{R_r}{R_g} \quad (1)$$

A média diária do albedo foi obtida a partir dos valores horários calculados pela equação 1, após a consistência dos mesmos. Descartaram-se os dados referentes ao período anterior às 06h30min e posterior às 17h50min por serem coletados com elevação solar baixa e possível depósito de orvalho sobre as folhas (BLAD; BACKER, 1972). Valores muito diferentes da média citada pela literatura também foram descartados no cálculo da média. Para o ecossistema florestal, por exemplo, foram excluídos valores de albedo abaixo de 9% e acima de 16%.

Para fins de comparação, foram analisados dados da floresta entre os dias do ano 36 a 166 (05/02/06 – 15/06/06), referentes ao período do ciclo da soja em 2006, e entre os dias do ano 54 e 172 (23/02/07 – 21/06/07), referentes ao ciclo de 2007. Além da análise diária, foram obtidos valores médios correspondentes a cada fase fenológica da soja e os respectivos valores médios no ecossistema florestal.

A elevação solar ao meio-dia foi utilizada nas análises e foi obtida como o complemento do ângulo zenital (Z) calculado diariamente para cada hora, nos dois locais do experimento por meio da Equação 2.

$$Z = A \cos(\text{Sen} \phi \cdot \text{Sen} \delta + \text{Cos} \phi \cdot \text{Cos} \delta \cdot \text{Cosh}) \quad (2)$$

em que ϕ é a latitude local, δ é a declinação solar e h é o ângulo horário local.

2.3. Avaliação do desenvolvimento

A determinação das fases fenológicas da soja foi feita pelo monitoramento diário segundo a escala de Fehr e Caviness (1977) conforme Tabela 1A e Figura 1B apresentadas nos Apêndices A e B, respectivamente. Após a fase vegetativa V10, decidiu-se avaliar apenas do início do florescimento em diante, devido ao fato da maioria das parcelas observadas não apresentarem homogeneidade nas fases dentro de uma mesma linha, dificultando o acompanhamento do desenvolvimento da cultura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Condições meteorológicas durante o cultivo da soja

A Tabela 1 apresenta o regime de chuvas (Prp), a temperatura média (Tar) e mínima do ar (Tmin) em cada fase do ciclo da soja, nos dois anos do experimento. Durante o experimento de 2007, verificou-se uma redução nos totais de chuva, que foi responsável pela redução na área foliar em relação ao experimento de 2006 (PONTE DE SOUZA et al., 2007a).

A redução nos totais de chuva pode ter sido causada por uma anomalia positiva na temperatura do Oceano Pacífico observado entre outubro de 2006 e abril de 2007, indicando a ocorrência de um evento de El Niño (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE, 2007). Apesar do maior volume de chuvas registrado durante o ciclo de 2006, a temperatura média do ar esteve sempre acima da observada em 2007.

Tabela 1 – Condições meteorológicas durante o ciclo da soja em 2006 e 2007, em Paragominas (PA)

Fase	Dias		Prp (mm)		Tar (°C)		Tmin (°C)	
	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007
Vegetativa	47	44	336,0	184,2	27,2(±0,16)	25,2(±0,18)	24,13(±0,10)	22,14(±0,09)
Florescimento	11	11	135,1	36,0	26,5(±0,14)	25,4(±0,10)	24,06(±0,16)	22,40(±0,12)
Form. vagem	11	17	175,0	105,2	26,9(±0,09)	25,2(±0,08)	23,71(±0,15)	22,06(±0,15)
Enchim. grãos	45	33	336,8	61,6	26,8(±0,12)	25,7(±0,08)	23,53(±0,11)	21,81(±0,18)
Maturação	16	14	29,3	23,4	27,2(±0,25)	25,5(±0,16)	21,88(±0,21)	20,96(±0,19)
Total/média	130	119	1012,2	410,4	26,9(±0,08)	25,4(±0,07)	23,6(±0,09)	21,9(±0,07)

Valores em parênteses representam erro padrão de estimativa.

A causa provável para a discordância observada nas condições meteorológicas entre os dois ciclos de produção da soja pode estar associada a dois fatores: i) A ocorrência de temperaturas mínimas menores em 2007, devidas à menor nebulosidade verificada neste ano, que pode ter contribuído para uma menor média diária e ii) A realização do experimento em 2007, a 12 km de distância do sítio anterior, há cerca de 2 km de um rio com mata ciliar, no quadrante de predominância do vento, fazendo com a temperatura observada apresentasse uma redução de cerca de 1,5°C com relação ao primeiro sítio.

3.2. Albedo médio diário (soja x floresta)

A Figura 2 apresenta o albedo médio durante o ciclo da soja e durante o mesmo período na floresta nos dois anos do experimento. A diferença no albedo entre os dois ecossistemas é bem visível. O albedo médio da floresta permaneceu em torno de 10,3±0,03%, enquanto que o albedo da soja apresentou uma forte dependência de suas fases fenológicas (Figura 2). Mais detalhes sobre as características do albedo da soja na Amazônia podem ser encontradas em Ponte de Souza et al. (2007b).

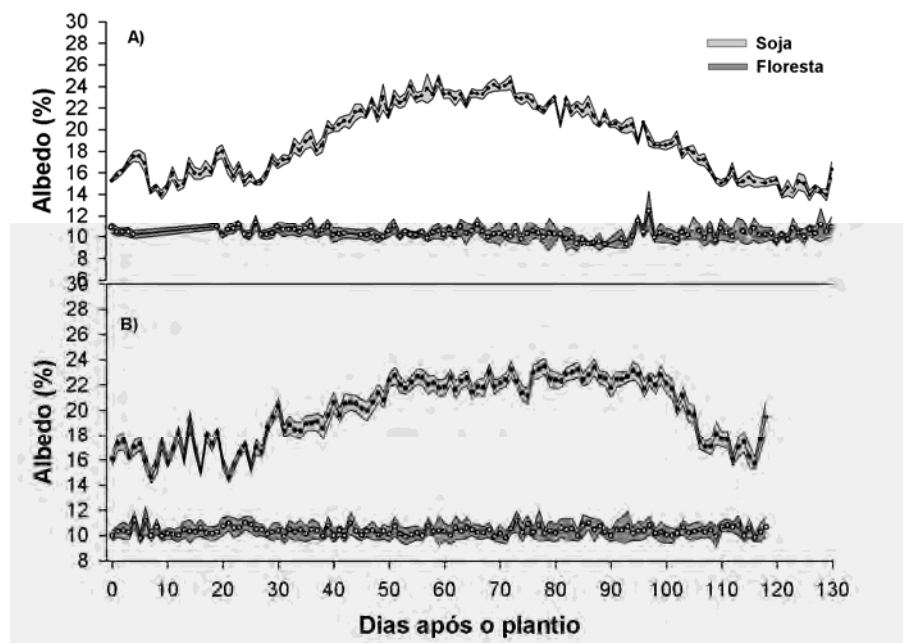


Figura 2 – Albedo médio diário da floresta e da soja ao longo do ciclo em 2006 (A) e 2007 (B) em Paragominas (PA). A área sombreada representa o intervalo de confiança a 95% de probabilidade.

Nota-se que o albedo da soja apresentou um decréscimo 80 dias após o plantio (DAP) em 2006 e após 105 DAP em 2007. Esta diferença deve-se a redução nos totais de chuva em 2007, responsável por uma redução na área foliar observada, deixando o solo, que estava mais seco, mais exposto do que em 2006. Solos em tais condições tendem a aumentar o albedo da superfície (DALMOLIN et al., 2005).

Moura et al. (1999) encontraram, para a estação chuvosa da Amazônia, albedo médio de 12,1% para a floresta e de 19,3% para a pastagem. Tal diferença permaneceu praticamente constante durante toda a estação chuvosa, existindo um incremento no valor médio no albedo apenas durante a estação seca do ano. Já para a soja, ao longo do ciclo, ocorre um aumento gradual no albedo, apresentando valores maiores durante a fase de estabelecimento da cultura. Para valores de índice de área foliar abaixo de 2, o albedo varia de acordo com o teor de umidade do solo e da cobertura foliar (PONTE DE SOUZA et al., 2007b).

A Figura 3 apresenta a elevação solar ao meio-dia ao longo do período estudado nos dois ecossistemas, onde se percebe que embora a floresta esteja localizada cerca de 2° de latitude acima do ecossistema soja, o fato de ambas estarem em uma

região de latitude baixa descarta a possibilidade de a diferença estar associada ao efeito da elevação solar nos dois locais (Figura 3).

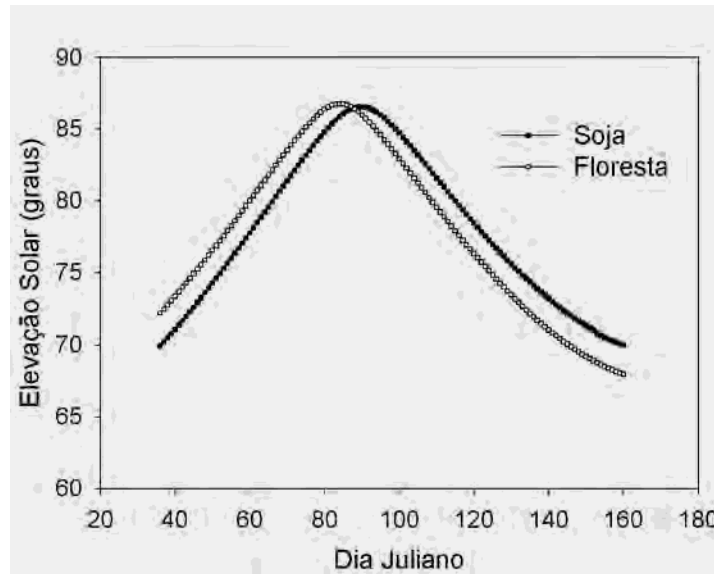


Figura 3 – Elevação solar ao meio-dia nos ecossistemas floresta e soja (PA).

Resultados de Moura et al. (1999) mostram que a variação anual no albedo diário da pastagem apresenta correlação forte com a elevação solar ao meio-dia, com valores elevados de albedo, durante o mês de junho, quando a elevação solar é mínima. Percebe-se pela Figura 3 que a elevação solar ao meio-dia variou muito pouco entre os dois ecossistemas, sendo insignificante para causar diferenças no albedo. Ponte de Souza et al. (2007b) encontraram que o fator mais importante no controle do albedo da soja foi a área foliar da cultura.

Conforme é mostrado na Figura 2, a grande questão em relação ao uso da terra para fins agrícolas é a mudança constante no albedo ao longo do ciclo da cultura, tendo como consequência um impacto muito maior nos processos de troca entre a superfície e a atmosfera durante um único período do ano, ao contrário do que acontece na pastagem em que o albedo não apresenta um ciclo sazonal regular sendo dependente da umidade do solo e da fração de solo exposto (CULF et al., 1995).

3.3. Impactos no albedo em cada fase

A Figura 4 apresenta a mudança que ocorre no albedo médio da superfície em cada fase do ciclo da soja considerando o valor médio dos dois anos estudados. Considerando que o albedo permanece praticamente constante no ecossistema floresta, a sua substituição para a prática do cultivo da soja acarreta grandes mudanças, principalmente durante a fase reprodutiva, quando a soja apresenta valores médios superiores a 22%.

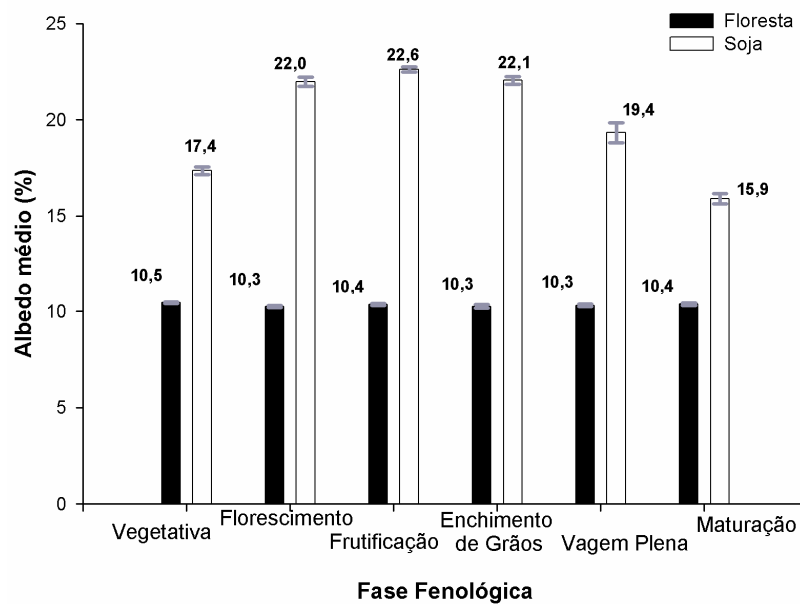


Figura 4 – Albedo médio em cada fase da soja e para o período correspondente na floresta. Barras verticais representam o erro padrão.

Devido ao fato que o cultivo da soja ocorre durante o período chuvoso na Amazônia, apesar da elevada nebulosidade, espera-se, como consequência desta mudança no uso da terra, uma redução muito maior na energia disponível para os processos de trocas gasosas uma vez que o elevado albedo da soja permanece durante mais da metade do ciclo da cultura, diferente do que ocorre durante o período seco na região quando o albedo pós-colheita é menor (PONTE DE SOUZA et al., 2006).

O albedo da soja foi sempre superior ao da floresta nas fases distintas apresentadas. No entanto, o impacto maior no albedo da superfície devida à substituição da floresta pela soja, ocorreu durante a fase de frutificação, onde se observou um aumento médio de 12,2% na magnitude do albedo (ver Tabela 2). Tal diferença representa um aumento de 117% do valor do albedo da floresta durante um período médio de 15 dias.

Tabela 2 – Impactos no albedo em cada fase do ciclo da soja em Paragominas (PA)

Fase fenológica	Diferença absoluta	Diferença relativa (%)	Duração média (dias)
Vegetativa (V1.....Vn)	6,9	65,7	46
Florescimento (R1..R2...)	11,8	115,7	10
Formação das vagens (R3...R4...)	12,2	117,3	15
Início do enchimento de grãos (R5...)	11,8	114,6	25
Pleno enchimento de grãos (R6...)	9,0	87,4	14
Maturação (R7..R8)	5,5	52,9	15
Média no ciclo	9,6	93,2	125

Diferença absoluta = Floresta – Soja; Diferença relativa = (Floresta-Soja)/Floresta.

Ao considerar todo o ciclo da cultura, a diferença no albedo da superfície foi de 9,6%, que representa um aumento médio na fração de radiação global refletida de 93,2% quando comparado ao processo que ocorre no ecossistema floresta. O aumento reportado na radiação refletida devido à mudança no uso da terra para fins de pastagem foi de 55%, aproximadamente (RANDOW et al., 2004).

O cultivo da soja ocasiona uma redução na disponibilidade de energia na superfície mais intensa que no uso do solo para a pecuária, apresentando tal característica por cerca de quatro meses durante o ano. Utilizando modelagem numérica para simular os impactos do avanço da soja no clima local, Costa et al. (2007) encontraram que para um desmatamento de 25% da Amazônia para produção de soja provocaria uma redução de 158 mm por ano na precipitação local, comparado com uma redução de 30 mm por ano no caso do uso do solo para pastagem. Os autores atribuíram tamanha diferença ao albedo elevado da soja. Tal resultado demonstra a importância das

alterações ocorridas nas interações entre a superfície e a atmosfera decorrentes do avanço da fronteira agrícola na Amazônia.

4. CONCLUSÕES

O monocultivo da soja na Amazônia ocasiona uma mudança brusca na interação entre a radiação e o ecossistema, tendo como consequência uma redução na energia disponível para o ambiente devido o aumento na reflexão da superfície. A grande questão em relação ao uso da terra para fins agrícolas é que existe uma mudança constante no albedo ao longo do ciclo da cultura, tendo como consequência um impacto muito maior nos processos de troca entre superfície e atmosfera durante um único período do ano, ao contrário do que acontece na pastagem em que o seu albedo não apresenta um ciclo sazonal regular.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento da pesquisa através do projeto CTHIDRO (processo n.º 552738/2005-0) e ao projeto CARBO-PARÁ por disponibilizar os dados referentes ao ecossistema de floresta. O primeiro autor também agradece à CAPES pela concessão da bolsa de doutorado e aos revisores pelas contribuições.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERBET, M. L. C.; COSTA, M. H. Climate change after tropical deforestation: seasonal variability of surface albedo and its effects on precipitation change. **Journal of Climate**, v. 16, p. 2099-2104, 2003.

BLAD, B. L.; BACKER, D. G. Reflected radiation from a soybean crop. **Agronomy Journal**, v. 64, p. 277-280, 1972.

COSTA, M. H.; YANAGY, S. M. N; PONTE DE SOUZA, P. J. O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 34, 2007.

CULF, A. D.; FISCH, G.; HODNETT, H. G. The albedo of Amazonian forest and ranch land. **Journal of Climate**, Washington, v. 8, p. 1544-1554, 1995.

CULF, A. D.; ESTEVES, J. L.; MARQUES FILHO, A. O.; ROCHA, H. R. Radiation temperature and humidity over forest and pasture in Amazônia. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C.; ROBERTS, J.; VICTORIA, R. L. (Eds.). **Amazonian deforestation and climate**. Chichester: John Wiley, 1996. p. 175-191.

DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 481-489, 2005.

DANTAS, T. M.; FONTELES, L. V. **Avanço da fronteira agrícola na Amazônia**. Disponível em: <<http://www.oktiva.net/sispub/anexo/9168>>. Acesso em: 15 out. 2006.

D'AVILA, N. **Desmatamento na Amazônia: o novo nome da soja**. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/agronegocio/14.shtml>>. Acesso em: 2 maio 2006.

EL-HUSNY, J. C.; ANDRADE, E. B.; SOUZA, F. R. S.; FILHO, A. S.; KEPLER, D.; ALMEIDA, L. A.; MEYER, M. C. **Recomendação de cultivares de soja para microrregião de Paragominas, Pará**. Belém: Embrapa-CPATU, 2003a. 6 p. (Comunicado técnico, 82).

HENDERSON-SELLERS, A.; GORNITZ, V. Possible climatic impacts of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation. **Climatic Change**, v. 6, p. 231-257, 1984.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. **Monitoramento e previsão do fenômeno El-Niño**. Disponível em: <www.cptec.inpe.br/enos>. Acesso em: 15 jul. 2007.

MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; BENINCASA, M.; SOUZA, J. L.; NASCIMENTO FILHO, M. F. Variação do albedo em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 2, p. 163-168, 1999.

MUELLER, C. C. **Dinâmica, condicionantes e impactos sócio-ambientais da evolução da fronteira agrícola no Brasil**. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza, 1992. (Documento de trabalho, 7).

MUELLER, C. C.; BUSTAMANTE, M. **Análise da expansão agrícola no Brasil**. Disponível em: <www.worldbank.org/rfpp/news/debates/mueller.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2006.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, Washington, v. 4, n. 10, p. 957-987, 1991.

PONTE DE SOUZA, P. J. O. et al. Alterações no albedo devidas o avanço da fronteira agrícola na Amazônia: um estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15, 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2006.

PONTE DE SOUZA, P. J. O. et al. **Radiation interception and the radiation use efficiency by soybean in the Amazonia.** Wageningen-Holanda, 2007a. (Submetido ao periódico Field Crops Research).

PONTE DE SOUZA, P. J. O. et al. **Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia.** Campina Grande, 2007b. (Submetido à Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental).

RANDOW, C. V.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M.; GASH, J.; ELBERS, J. A.; WATERLOO, M. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 5-26, 2004.

SANTIAGO, A. V. **Simulações dos efeitos da cobertura vegetal no balanço hídrico da bacia do rio Ji-Paraná, RO.** 2005. 70 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA – SAGRI. **Evolução da safra de grãos no estado do Pará.** Disponível em: <[www.sagri.pa.gov.br/documents/Evolucao daSafradeGraosnoPara.xls](http://www.sagri.pa.gov.br/documents/Evolucao%20daSafradeGraosnoPara.xls)>. Acesso em: 20 set. 2008

SOARES-FILHO, B. S.; NEPSTAD, D. C.; CURRAN, L.; CERQUEIRA, G.; GARCIA, R. A.; RAMOS, C. A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; VOLL, E.; McGRATH, D. Cenários de desmatamento para Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 54, p. 138-152, 2005.

CAPÍTULO 9

IMPACTOS NO BALANÇO DE RADIAÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Vários trabalhos sobre a mudança do uso da terra na Amazônia têm mostrado que uma drástica conversão da cobertura vegetal natural pode ocasionar sérias alterações hidrológicas e climáticas regionais (HENDERSON-SELLERS; GORNITZ, 1984; NOBRE et al., 1991; CULF et al., 1995; CULF et al., 1996; RANDOW et al., 2004; CORREIA et al., 2006).

A maioria destes trabalhos trata, porém de simulações da substituição da floresta nativa por pastagem, prática que predominou nas décadas de 70, 80 e 90. Nos últimos anos, no entanto, o avanço da fronteira agrícola na Amazônia tem a monocultura da soja como principal atrativo e vem trazendo preocupações da sociedade para os prováveis impactos ambientais decorrentes desta prática (FEARNSIDE, 2001; SIMON; GARAGORRY, 2005).

Costa et al. (2007) e Sampaio et al. (2007) utilizando modelos globais simularam possíveis impactos do avanço da soja no clima da Amazônia, e encontraram uma considerável redução na precipitação da região. Entretanto estes resultados não são conclusivos por ter sido utilizado apenas duas variáveis para parametrização do modelo (albedo e índice de área foliar) e não ter sido considerado os impactos da entressafra.

Avaliar localmente os possíveis impactos no balanço de radiação local em decorrência do avanço da soja na região é extremamente importante, uma vez que o saldo de energia é o principal controlador da precipitação da região. O objetivo desta pesquisa foi quantificar as alterações nos componentes do balanço de radiação devido o novo padrão de mudança do uso da terra em uma área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Ecossistema de soja

O experimento conduzido no ecossistema de soja ocorreu no município de Paragominas, situado na região nordeste do Estado do Pará. Isto se justifica pelo fato desta região ter apresentado uma grande expansão do cultivo da soja nos últimos anos. A área com plantio de soja ocupou uma extensão de 200 ha, localizada na latitude $02^{\circ}59'08''$ S e longitudes $47^{\circ}19'57''$ W (Figura 1).

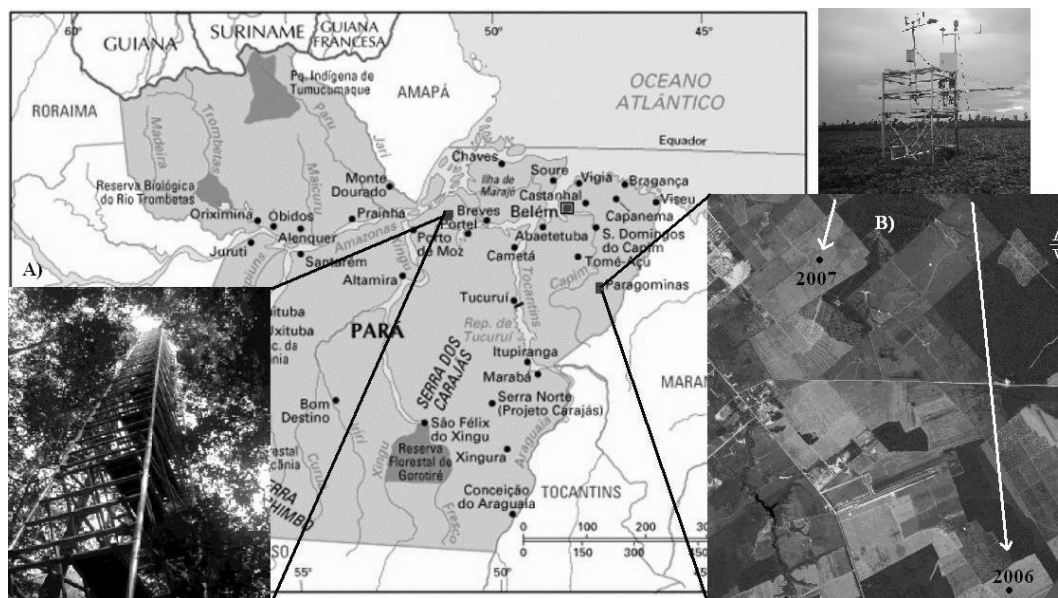


Figura 1 – Localização dos sítios experimentais: florestal (A) e soja (B).

O experimento foi realizado em 2006 e 2007, sendo utilizada a variedade BRS Tracajá (cultivar de ciclo intermediário). Toda a área foi plantada mecanicamente com espaçamento de 0,5m entre fileiras e de 0,1 m entre plantas. A semeadura foi realizada em 05 e 23 de fevereiro e a colheita final foi feita no dia 15 e 21 de junho de 2006 e 2007, respectivamente. O desenvolvimento da cultura foi avaliado diariamente usando a classificação dos estádios proposta por Fehr e Caviness (1977) conforme Tabela 1A e Figura 1B apresentadas nos Apêndices A e B, respectivamente.

Uma torre micrometeorológica de três metros de altura foi montada no centro da área, onde foram instalados sensores para registro dos perfis de temperatura e umidade relativa do ar e vento (3 níveis). O perfil da temperatura do solo também foi medido (4 níveis). Foram ainda instalados sensores de precipitação, direção do vento, radiação solar (incidente, refletida e transmitida ao solo), saldo de radiação; radiação fotossinteticamente ativa (incidente, refletida e transmitida ao solo) e fluxo do calor no solo.

Para aquisição e registro dos dados meteorológicos foi utilizado um datalogger CR10X e um multiplexador AM416. Guardou-se uma bordadura de 1:100, para garantir boa representatividade na coleta de dados, devido ao fetching.

2.2. Ecossistema florestal

Os dados referentes ao ecossistema florestal foram obtidos na Floresta Nacional de Caxiuanã, localizada na parte central do estado do Pará, em área pertencente ao Arquipélago de Marajó (Figura 1B). As coordenadas geográficas do sítio experimental são 00°50'31"S, 46°38'56"W e 30 m de altitude, cuja floresta possui um dossel com altura média de 36 m. O distanciamento entre o sítio de floresta natural e o de soja é de aproximadamente dois graus de latitude, proximidade suficiente para que se observem as mesmas forçantes climáticas (radiação solar), possibilitando a comparação entre os dois ecossistemas.

Foram utilizados dados médios das mesmas variáveis medidas no ecossistema de soja, obtidos através de uma estação meteorológica automática instalada em uma torre de 54 m de altura. O período de dados utilizados no trabalho correspondeu aos mesmos do experimento da soja, entre fevereiro e junho de 2006 e 2007.

Para analisar o período de entre safra, foram utilizados dados correspondentes aos meses de julho a novembro do ano de 2007 no ecossistema de soja e dados

correspondente ao mesmo período no ecossistema florestal. Os componentes do balanço de onda curta, incidente (S_{in}) e refletida (S_{out}) assim como o saldo de ondas longas (L_{net}) e o saldo global de radiação (R_{net}) foram monitoradas continuamente nos dois ecossistemas. Utilizou-se o teste t de student ao nível de 5% e 1% de probabilidade para verificar a significância das diferenças entre as médias dos dois ecossistemas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Impactos durante o ciclo da cultura da soja

A Figura 2 apresenta a variação média dos componentes do balanço de radiação nas diferentes fases do desenvolvimento nos dois anos de estudo.

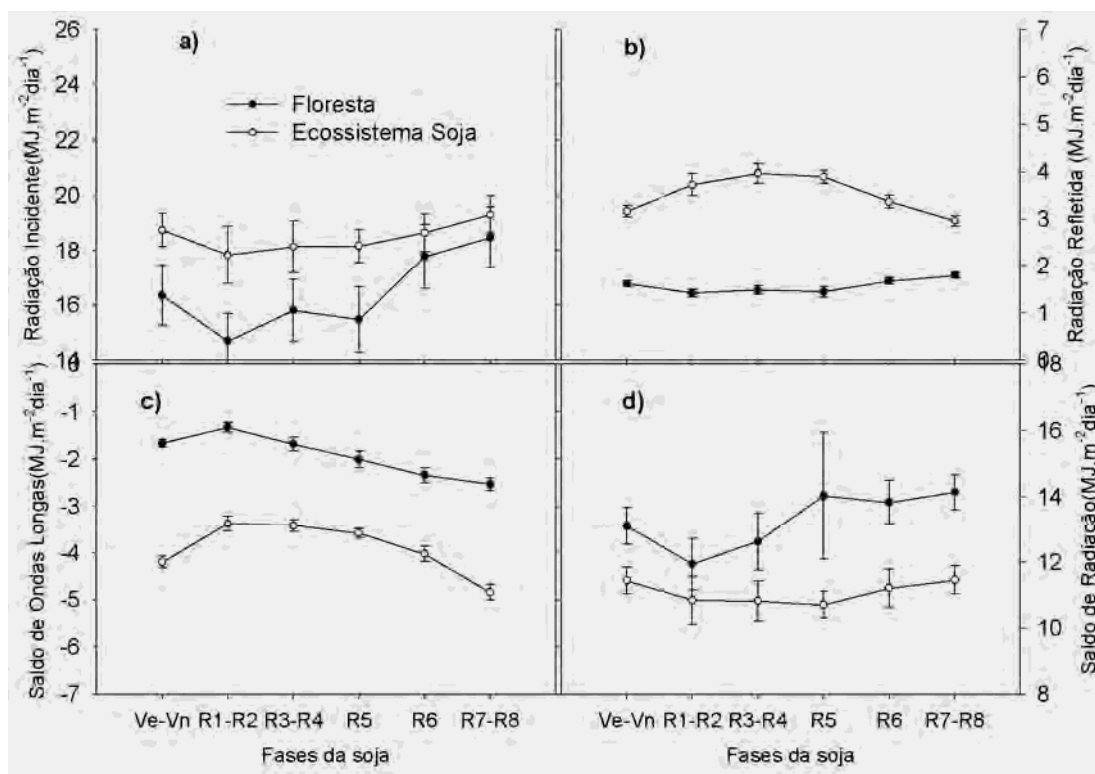


Figura 2 – Médias dos componentes do balanço de radiação durante o ciclo da soja e no período correspondente no ecossistema de floresta. As barras verticais representam o erro padrão.

A radiação incidente no ecossistema de soja foi sempre superior à observada no ecossistema florestal (Figura 2a), apresentando uma diferença média entre 4 a 21%. Isso está diretamente associada ao diferente grau de nebulosidade observado entre os dois ecossistemas. A menor incidência de radiação solar sobre o ecossistema florestal está associada à presença de uma atmosfera mais úmida e de maior nebulosidade quando comparada a regiões desmatadas (SILVA DIAS et al., 2005; SILVA DIAS, 2006).

Culf et al. (1995), Galvão e Fisch (2000a) e Souza Filho et al. (2006) adotaram um critério analítico para se determinar o grau de nebulosidade na região amazônica. Este critério se baseia na razão entre as irradiâncias solar global e extraterrestre, onde valores abaixo de 0,35 representam dias nublados e valores acima de 0,5 dias de céu claro. Esta razão foi sempre superior na área de soja, tanto durante o ciclo como na entressafra, indicando que na região de floresta a atmosfera apresentava maior nebulosidade, influenciando tanto a incidência de radiação como também o saldo de ondas longas (Figura 3).

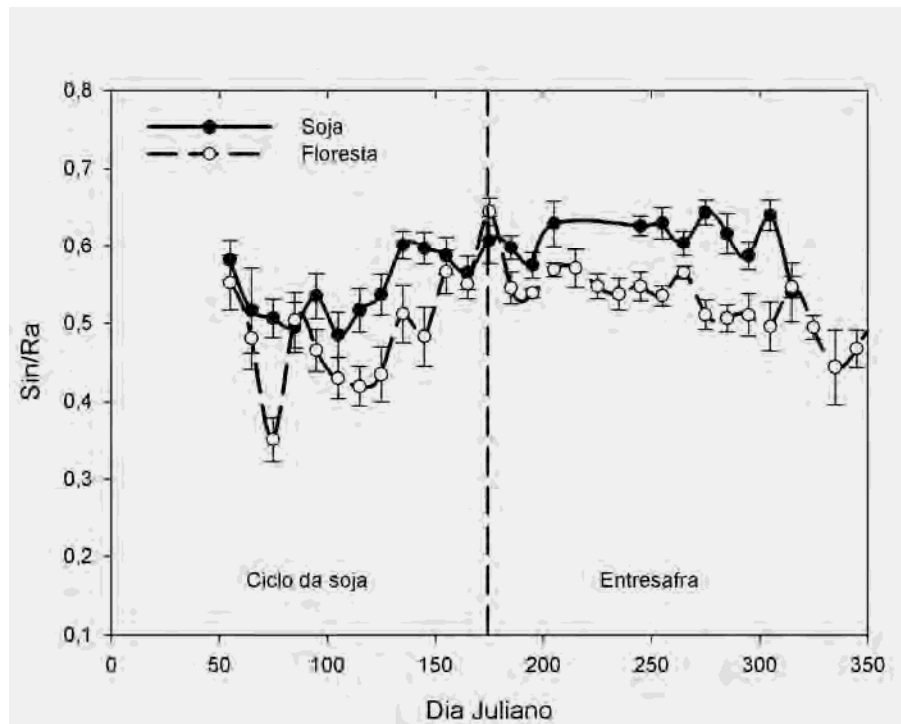


Figura 3 – Razão entre radiação global (Sin) e extraterrestre (Ra) ao longo do ano no ecossistema de soja e floresta.

Durante grande parte do tempo, 64 dias em média, ocorreu um aumento de mais de 100% no componente refletida da radiação como consequência do elevado albedo da soja entre as fases de florescimento (R1) e enchimento pleno do grão (R6) (Tabela 1). O aumento reportado na radiação refletida devido à mudança no uso da terra na Amazônia para pastagem foi de 55% (RANDOW et al., 2004) e de 30% para o cultivo de mandioca (GIAMBELLUCA et al., 1997).

Tabela 1 – Diferença média absoluta nos componentes do balanço de ondas curtas e ondas longas entre os ecossistemas de floresta e de soja na Amazônia em 2006 e 2007

Fases	Duração (dias)	S _{in} (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)	S _{out} (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)	L _{net} (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)
VE-Vn (%)	46	2,40** (14,7)	1,55** (95,5)	-2,53** (152,5)
R1-R2 (%)	10	3,15** (21,5)	2,31** (162,5)	-2,04** (154,3)
R3-R4 (%)	15	2,33** (14,7)	2,48** (166,2)	-1,73** (102,9)
R5 (%)	25	2,69** (17,4)	2,45** (168,8)	-1,60** (80,8)
R6 (%)	14	0,88 ^{ns} (4,9)	1,69** (100,6)	-1,68** (71,9)
R7-R8 (%)	15	0,83 ^{ns} (4,5)	1,16** (64,66)	-2,31** (91,1)
Média (%)		2,04(±0,39) (12,9)	1,94(±0,22) (126,4)	-1,98(±0,15) (108,9)

Diferença = Soja - Floresta; (%) = (Soja-Floresta)/Floresta. ** = Significativo ao nível de 1% pelo teste t. ^{ns} = não significativo.

A diferença observada no saldo de ondas longas entre os dois ecossistemas acompanhou o crescimento da soja, apresentando maiores valores durante a fase vegetativa e na maturação (R7-R8) (Tabela 1). Nestes dois períodos a perda de energia na forma de ondas longas pela soja foi superior à perda na forma onda curta. Esta variação na emissão de ondas longas pela soja é atribuída à variação no índice de área foliar (IAF) da cultura, em função da mudança na exposição do solo conforme também reportado por Fontana et al. (1991a) para a soja no Rio Grande do Sul.

A presença de nuvens pode também ter contribuído para os menores valores de saldo de ondas longas na floresta por apresentar maior contra-irradiação em função de uma atmosfera mais úmida (SILVA DIAS et al., 2005; SILVA DIAS, 2006). O impacto no saldo de ondas longas foi sempre superior a -72%, com diferenças absolutas ao longo do ciclo da soja entre -1,6 e -2,5 MJ.m⁻².dia⁻¹ acima dos valores da floresta.

O impacto acumulado absoluto no saldo de radiação ao longo do ciclo da soja foi de -237 MJ.m⁻² em 2006 e de -247 MJ.m⁻² em 2007. Esta redução representa um impacto médio de -16,6% no valor original disponível na floresta Amazônica. Randow et al. (2004) encontraram um impacto médio anual de -13,3% no saldo de radiação devido à substituição da floresta para pastos na Amazônia.

Usando modelos de circulação da atmosfera (ETA/SSiB) com diferentes mapas de vegetação da Amazônia, Alvalá et al. (2007) encontraram uma redução no saldo de radiação durante o período chuvoso na Amazônia variando entre 12,9 e 15,4% para um cenário atual e futuro de desmatamento para o cultivo de pastagem, respectivamente.

Em termos médios, nota-se uma redução de até 2,2 MJ de energia por dia ao longo do ciclo da soja (Tabela 2). No ano de 2006 o maior impacto observado correspondeu a uma redução de 21% no saldo de radiação durante a fase de enchimento de grãos (R5), quando a soja possui elevada evapotranspiração, e cobertura plena do solo. Nos demais períodos o impacto negativo variou entre 13 e 18%.

Tabela 2 – Impactos negativos diários médios e relativos no saldo de radiação em cada fase da soja na Amazônia

Fases	Impacto diário (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)		Impacto relativo (%)		Médio diário (MJ.m ⁻² .dia ⁻¹)	Médio relativo (%)
	2006	2007	2006	2007	2006-2007	2006-2007
VE-Vn	1,94 ^{**} (±0,40)	2,19 ^{**} (±0,62)	15,0	15,5	2,08 ^{**} (±0,41)	15,5
R1-R2	1,86 [*] (±1,05)	2,08 ^{ns} (±0,99)	15,6	16,2	1,97 ^{**} (±0,70)	15,6
R3-R4	1,79 ^{**} (±1,02)	1,69 [*] (±0,65)	13,7	13,4	1,73 ^{**} (±0,55)	13,5
R5	2,68 ^{**} (±0,42)	1,15 ^{**} (±0,64)	21,1	9,1	1,83 ^{**} (±0,51)	14,3
R6	2,50 ^{**} (±0,71)	3,44 ^{**} (±0,51)	18,3	24,6	2,93 ^{**} (±0,45)	21,2
R7-R8	2,39 ^{**} (±0,72)	3,43 ^{**} (±0,54)	17,1	23,3	2,86 ^{**} (±0,47)	19,9
Média	2,19(±0,15)	2,33(±0,29)	16,8(±1,27)	17,4(±1,82)	2,23(±0,21)	16,6(±1,21)

Valores em parênteses representam erro padrão de estimativa. * = significativo ao nível de 5% pelo teste t. ** = significativo ao nível de 1% pelo teste t. ns = não significativo.

No ano de 2007 a redução média no saldo de radiação foi maior do que em 2006 pelo fato deste ano ter sido menos chuvoso, onde a soja apresentou menor IAF e maior exposição do solo mantendo um albedo mais elevado durante um período maior do que em 2006 (SOUZA et al., 2008a).

O grande problema em relação ao uso da terra para fins agrícolas na Amazônia é a continua mudança na arquitetura do dossel, no seu albedo, e conseqüentemente na perda por ondas longas ao longo do ciclo da cultura, tendo como resultado um impacto muito maior nos processos de troca entre a superfície e atmosfera durante um único período do ano.

O principal problema dos modelos de circulação geral e de meso-escala está no fato de não considerar esta dinâmica que ocorre ao longo do tempo, o que pode comprometer a veracidade dos resultados simulados. Sampaio et al. (2007) simularam uma redução no saldo de radiação de apenas 2,8% ao considerar que 20% da Amazônia seja substituída por soja e de 7% para casos em que toda a floresta é substituída para o plantio da soja. Em ambos os casos o valor obtido é bem diferente do realmente observado localmente, indicando ser necessário melhorar o “*approach*” dos modelos utilizados.

3.2. Impactos durante a entressafra

Nos recentes trabalhos sobre os possíveis impactos da substituição da floresta natural pela cultura da soja, as análises têm se restringido ao período de desenvolvimento da cultura, não sendo tratado as mudanças nas trocas de superfície no período da entressafra. Enquanto o ciclo da cultura tem duração de 1/3 do ciclo sazonal (ano) a entressafra tem duração dos outros 2/3, devendo portanto, de maneira geral, ser importante para definir os impactos no balanço de radiação.

A Figura 4 apresenta as médias a cada 10 dias das componentes do balanço de radiação após a colheita da soja em 2007, e valores médios observados no mesmo período no ecossistema florestal, ambos a partir do mês de Junho, época comum para a realização da colheita da soja na região.

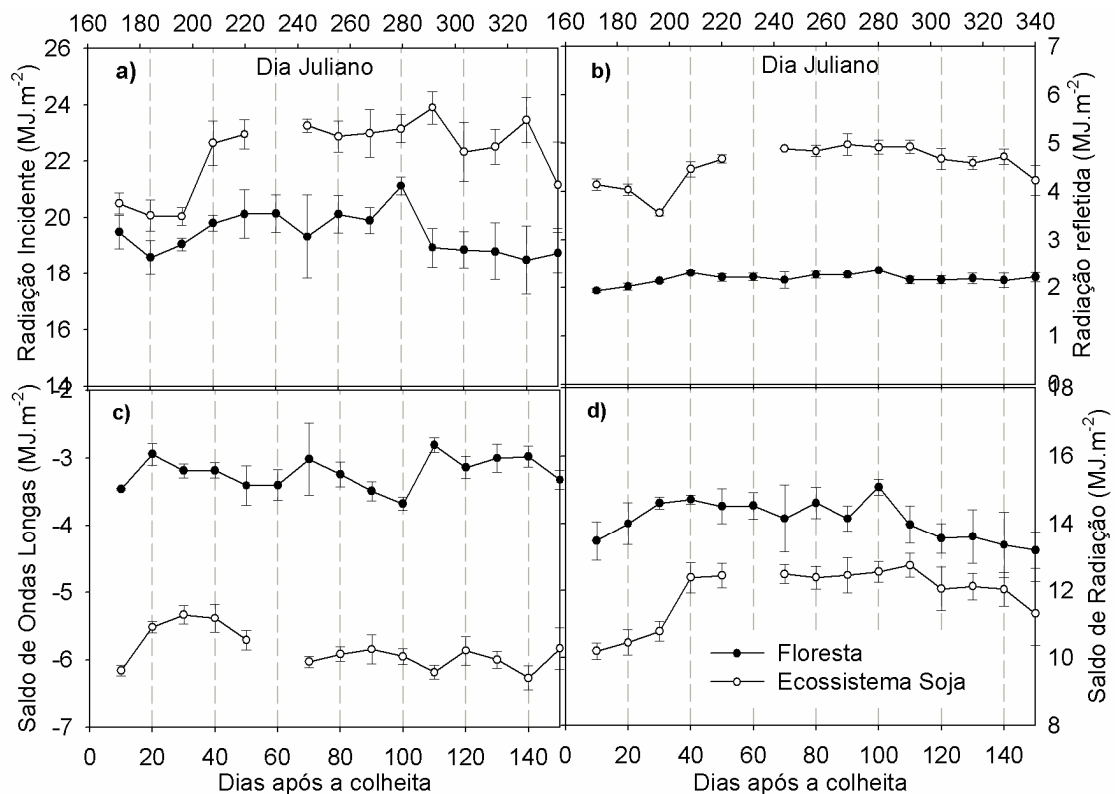


Figura 4 – Valores médios de 10 dias dos componentes do balanço de radiação na entre safra do ecossistema da soja e no período correspondente no ecossistema de floresta. As barras verticais representam o erro padrão.

Durante a entressafra observa-se um aumento relativo de todas as componentes do balanço de radiação comparado ao período do ciclo da cultura em ambos os ecossistemas (Figuras 4a, 4b, 4c e 4d). Este aumento sazonal está de acordo com a maioria dos resultados encontrados nos trabalhos sobre balanço de radiação em outros tipos de ecossistemas vegetais na Amazônia (FEITOSA et al., 1998; GALVÃO; FISCH, 2000a; RANDOW et al., 2004; SOUZA FILHO et al., 2006).

Souza Filho et al. (2006) encontraram para este mesmo ecossistema florestal uma variação entre período chuvoso e menos chuvoso de 8,2 para 11,9% no albedo e de -1,4 para -2,8 $\text{MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ para o saldo de ondas longas, respectivamente.

De forma análoga ao período do ciclo da soja, nota-se uma significativa diferença nas componentes radiativas entre os dois ecossistemas, principalmente em relação à componente refletida e ao saldo de ondas longas (Figuras 4b e 4c). A

quantidade de radiação refletida na floresta apresenta pouca variação ($\approx 2,5 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$), com um albedo médio entre 0,10 e 0,12.

Carswell et al. (2002) também observaram esta sazonalidade no albedo de Caxiuanã cujos valores variaram de 0,09 a 0,12 respectivamente nos períodos chuvoso e no menos chuvoso do ano na região. Esta variação no albedo foi associada à secagem do dossel da floresta.

Ao contrário do que se imagina e do que alguns trabalhos sobre modelagem climática consideram para o período de entressafra, onde se adota o solo como sendo totalmente descoberto (COSTA et al., 2007; SAMPAIO et al., 2007), o sistema de produção da soja na Amazônia ainda é baseado, na maioria dos locais, no plantio convencional, onde o solo é preparado para o plantio. Entretanto, logo após a colheita o solo é deixado em pousio com restos culturais e com vegetação rasteira crescendo, em alguns casos adota-se o plantio de outras culturas forrageiras no período de entressafra quando no caso de plantio direto.

Diferentemente do que ocorre durante o ciclo da soja, onde o saldo de ondas longas sofre influência da cobertura vegetal, durante a entressafra a perda por ondas longas na soja apresenta pouca variação, sendo $2 \text{ MJ.m}^{-2}\text{.dia}^{-1}$ superior ao observado durante o ciclo. Com a redução na cobertura do solo na área de agricultura, a exposição do solo tem como consequência um aumento significativo da sua temperatura intensificando ainda a mais a emissão de ondas longas pela superfície (SOUZA FILHO et al., 2006).

A perda de ondas longas na floresta durante este período também é bem menor do que na área de soja. A intensificação desta perda de energia na forma de ondas longas em ambos os ecossistemas nesta época do ano, pode estar também diretamente associado à redução na componente atmosférica decorrente da diminuição no grau de nebulosidade em ambos os locais (Figura 3).

O saldo global de radiação na área de cultivo de soja aumenta gradualmente durante a entressafra permanecendo em torno de $12,5 \text{ MJ.m}^{-2}\text{.dia}^{-1}$ após os 40 DAC (Figura 4d), um pouco acima do valor observado durante o ciclo da cultura, sendo também menor do que o observado na floresta. Percebe-se após os 110 DAC (dia Juliano 282), uma tendência de diminuição no saldo de radiação em ambos os locais, provavelmente associado à redução observada na radiação incidente decorrente no início do período chuvoso na região (Figura 4a).

Até cerca de 30 DAC, o impacto médio no saldo de radiação associado ao sistema de produção de soja na Amazônia é de aproximadamente 25,3%, representando uma diferença média absoluta em torno de $3,6 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. Embora neste período do ano o impacto não seja muito diferente do valor absoluto observado durante o final do ciclo ($\approx 2,9 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$), em termos relativos difere significativamente dos 16,6% encontrado para todo o ciclo da cultura.

Durante a entressafra onde o albedo permaneceu em torno de 0,20, e o efeito da redução tanto na nebulosidade como na cobertura do solo no ecossistema agrícola intensificou a perda por ondas longas, reduzindo ainda mais a energia disponível neste local. Resultados semelhantes foram obtidos por Alvalá et al. (2007), os quais atribuíram o aumento do impacto no saldo de radiação durante o período seco da Amazônia devido à substituição da floresta para pastagem como sendo devido ao aumento na perda por ondas longas na pastagem.

Entretanto, este aumento sazonal só foi observado no primeiro mês pós-colheita, pois embora tenha ocorrido maior impacto no saldo de ondas longas durante toda a entressafra, o aumento na radiação solar incidente após os 30 DAC favoreceu o aumento do saldo de radiação que por sua vez teve pouca influencia do albedo da superfície por ser invariável e menor que o observado durante o ciclo.

A partir dos 40 até antes dos 110 DAC nota-se uma contínua redução deste impacto. Esse menor impacto neste período resulta do decréscimo no saldo de radiação na floresta gerado pela diminuição na radiação incidente, uma vez que nesta mesma época o saldo de radiação permaneceu praticamente constante no ecossistema de soja (menor nebulosidade). Durante este período da entressafra (40-100 DAC), o impacto médio encontrado no saldo de radiação foi de 14,3%.

O impacto existente no saldo de radiação nos primeiros três meses de entressafra da soja correspondeu em média a 18,1 % do valor existente na floresta, superior ao valor médio encontrado durante o ciclo (16,6%). Por outro lado, ao se considerar todo período de entressafra, o impacto médio no saldo de radiação reduz para 15,5%.

Os impactos no saldo de radiação reportados para períodos semelhantes em casos de uso do solo para pastos são de 11,4% para os meses de agosto a novembro (RANDOW et al., 2004). Alvalá et al. (2007) simularam para a época seca da Amazônia, um impacto no saldo de radiação de 16,6% considerando um cenário atual de desmatamento para fins de pastagem.

3.3. Análise conjunta

A Figura 5a apresenta a dispersão entre valores diários da radiação incidente e saldo de radiação durante o período do ciclo da cultura e entressafra em ambos ecossistemas. Observou-se durante grande parte do ciclo, em cerca de 70% dos dias, maior radiação incidente no ecossistema de soja, e o saldo de radiação resultante na soja inferior ao encontrado no ambiente natural, apesar de existirem alguns dias em que o inverso tenha ocorrido.

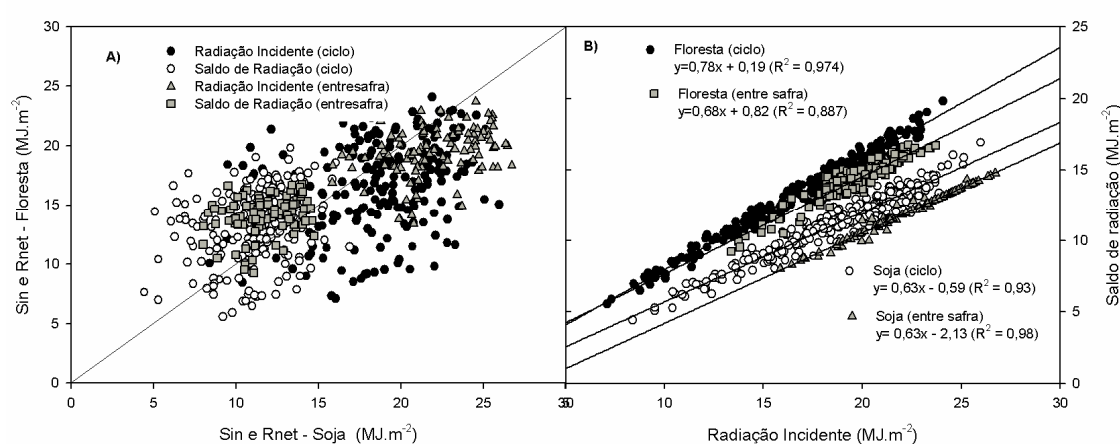


Figura 5 – Dispersão entre as componentes de radiação (a) e correlação entre saldo de radiação e radiação incidente (b) em ecossistema de floresta e soja.

De forma análoga ao observado durante o ciclo da soja, o período de entressafra apresentou maior incidência de radiação solar no ecossistema agrícola, com uma frequência de ocorrência de 80% de dias com maior incidência (Figura 5a). Apesar deste período do ano coincidir com as estações inverno-primavera do hemisfério sul, a redução na atividade convectiva e consequente redução da nebulosidade, ocasiona um considerável aumento no total de radiação incidente em relação ao período do ciclo em ambos os locais. Entretanto, assim como durante o ciclo, o saldo de radiação disponível na floresta foi sempre superior ao observado na região de produção de soja, com exceção de 13% dos dias analisados onde se observou o contrário (Figura 5a).

A Figura 5b apresenta a correlação entre o saldo de radiação e radiação incidente em ambos os locais com suas respectivas regressões. No ecossistema florestal

o coeficiente angular é maior devido ao fato de existir menor perda de energia (ondas longas e reflexão) quando comparado ao monocultivo da soja, cujo albedo apresenta considerável variação ao longo do ciclo.

Apesar da Figura 5b sugerir que a diferença no saldo de radiação durante o ciclo entre os dois locais aumente com o aumento na radiação incidente, nota-se que para valores semelhantes de radiação incidente diária (entre 5 e 25 MJ) é possível encontrar uma redução média no saldo de radiação de $3 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no ecossistema de soja. Esta variação está associada diretamente ao efeito da dinâmica da cultura relacionada ao contínuo aumento observado no albedo da soja ao longo do seu ciclo (SOUZA et al., 2009c).

Diferente do que ocorre durante o ciclo da soja, a regressão entre o saldo de radiação e a radiação incidente na entressafra (Figura 5b) não indica variação com o aumento da radiação, sugerindo não existir efeito temporal de outros fatores no saldo de radiação (albedo e saldo de onda longa constante). Durante esta época do ano o impacto médio observado no saldo para a mesma quantidade de radiação incidente (entre 13 e 26 MJ) é em torno de $3,9 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$.

Apesar de a correlação indicar maior impacto durante a entressafra quando se considera a mesma quantidade de radiação solar incidente, o fato dos dois ecossistemas estarem localizados em locais distintos e, portanto apresentarem condições atmosféricas e meteorológicas diferentes, as interações que ocorrem a partir da incidência da radiação solar no dossel associada à dinâmica de crescimento da soja não permitem chegar a tal conclusão.

A Tabela 3 apresenta um resumo geral com os reais valores dos impactos observados ao longo do sistema de produção da soja na Amazônia. Ressalta-se que embora o maior impacto ocorra durante o ciclo da cultura, o tempo de ocorrência deste efeito se dá apenas durante cerca de 1/3 do tempo do ciclo sazonal (ano), enquanto que os 2/3 restantes estariam relacionados a um impacto médio de 15,5% no saldo de radiação do ambiente.

O impacto anual médio no saldo de radiação encontrado foi de 15,8%, próximo do encontrado por Alvalá et al. (2007) para o caso da pastagem. Por outro lado, este resultado difere bastante dos 7% obtidos por Sampaio et al. (2007) com 100% de substituição da floresta por soja, demonstrando a necessidade de uma melhor parametrização e calibração do modelo utilizado uma vez que não representam de forma fiel as interações que ocorrem no ecossistema de soja.

Tabela 3 – Impacto relativo médio nos componentes do balanço de radiação durante o ciclo da soja e no período de entressafra na Amazônia (em %)

Período	S _{in}	S _{out}	L _{net}	R _{net}
Ciclo	12,9 ^{**} (±2,8)	126,4 ^{**} (±18,4)	108,9 ^{**} (±14,7)	16,6 ^{**} (±1,2)
Entressafra	15,0 ^{**} (±1,8)	108,6 ^{**} (±4,4)	83,8 ^{**} (±4,8)	15,5 ^{**} (±1,5)

Valores em parênteses representam erro padrão de estimativa. * = significativo ao nível; de 5% pelo teste t. **=significativo ano nível de 1% pelo teste t. ^{ns} = não significativo.

A simulação dos impactos no balanço de radiação devido o avanço da soja obtida por Costa et al. (2007) e Sampaio et al. (2007) não condizem com o que foi observado neste trabalho. Mesmo após o final do ciclo da soja, o albedo médio da superfície permanece elevado (20% em média), persistindo durante a entressafra por cerca de 2/3 do ano contribuindo para um albedo médio anual de 19,4%, diferente dos 18% considerado nos modelos. Além disso, a dinâmica na arquitetura da soja que ocorre ao longo do ciclo não é considerada pelo modelo.

Outro detalhe é que ao contrário do que se imagina a soja chega a evapotranspirar mais do que ecossistema florestal durante algumas fases do ciclo, devido a fatores como elevado IAF, e elevada condutância do dossel a qual segundo Costa (2008) atingiu picos de 0,10 m.s⁻¹ durante o ciclo, enquanto que o maior valor observado por Carswell et al. (2002) para Caxiuanã não ultrapassou 0,06 m.s⁻¹. Tais contradições podem resultar em diferentes conclusões acerca da redução que ocorreria na precipitação da Amazônia resultante do avanço da soja.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho mostram como o clima local poderá ser afetado pelo avanço do monocultivo da soja nesta região. O cultivo da soja na Amazônia causa uma redução na disponibilidade de energia na superfície mais intensa que no uso do solo para a pecuária devido às mudanças na arquitetura da cultura ao longo de seu ciclo.

Durante cerca de quatro meses há uma redução acumulada de 240 MJ m^{-2} no saldo de radiação à superfície, correspondendo a um impacto médio de -16,6%, chegando a ocorrer em algumas fases da cultura, impactos negativos de até 21%. Embora a perda por ondas longas seja reduzida com o crescimento da cultura, o aumento no albedo da superfície contribui sobremaneira para este impacto.

Devido ao manejo empregado comumente adotado na região para a entressafra no sistema de produção da soja, observa-se um importante aumento relativo na radiação refletida pela superfície comparada à floresta pelo fato do albedo da superfície manter-se elevado (0,20) neste período, ao contrário do que muitos trabalhos sobre modelagem consideram.

Durante o período da entressafra o impacto médio observado no saldo de energia foi de 15,5%, e apesar de ser menor do que durante o ciclo, o seu efeito cumulativo é mais intenso uma vez que permanece por mais de 2/3 do ano.

Estes resultados diferem significativamente dos obtidos através de modelos atmosféricos, indicando que tais modelos precisam utilizar cenários mais realistas das características e dos processos físicos observados no ecossistema de soja.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento da pesquisa através do projeto CTHIDRO (processo nº 552738/2005-0) e ao projeto CARBO-PARÁ por disponibilizar os dados referentes ao ecossistema de floresta. O primeiro autor também agradece à CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

6. BIBLIOGRAFIA CITADA

ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, F. W. S.; MANZI, A. O. Modelagem dos impactos das mudanças da cobertura da terra na Amazônia: avaliação do balanço de radiação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2007. p. 6573-6570.

CARSWELL, F. E.; COSTA, A. C. L.; PALHETA, M.; MALHI, Y.; MEIR, P.; COSTA, J. P. R.; RUIVO, M. L.; LEAL, L. S. M.; COSTA, J. M. N.; CLEMENT, R. J.; GRACE, J. Seasonality in CO₂ and H₂O flux at an eastern Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 20, p. 1-16, 2002.

CORREIA, F. W. S.; ALVALÁ, R. C. S.; MANZI, A. O. Impacto das modificações da cobertura vegetal no balanço de água na Amazônia: um estudo com modelo de circulação geral da atmosfera (MCGA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 153-167, 2006.

COSTA, J. P. R. **Modelagem e simulação das interações biosfera-atmosfera em plantio de soja na Amazônia**. 2008. 127 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

COSTA, M. H.; YANAGY, S. M. N.; PONTE DE SOUZA, P. J. O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 34, 2007.

CULF, A. D.; FISCH, G.; HODNETT, H. G. The albedo of Amazonian forest and ranch land. **Journal of Climate**, Washington, v. 8, p. 1544-1554, 1995.

CULF, A. D.; ESTEVES, J. L.; MARQUES FILHO, A. O.; ROCHA, H. R. Radiation temperature and humidity over forest and pasture in Amazônia. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C.; ROBERTS, J.; VICTORIA, R. L. (Eds.). **Amazonian deforestation and climate**. Chichester: John Wiley, 1996. p. 175-191.

FEARNSIDE, P. M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, v. 28, n. 1, p. 23-28, 2001.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. (Special Report, 80).

FEITOSA, J. R. P.; FERREIRA DA COSTA, R.; FISCH, G.; SOUZA, S. S.; NOBRE, C. A. Radiação solar global em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p. 1-7, 1998.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 3, p. 403-410, 1991a.

GALVÃO, J. A. C.; FISCH, G. Balanço de radiação em área de pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2000a.

GIAMBELLUCA, T. W.; HOLSCHER, D.; BASTOS, T. X.; FRAZÃO, R. R.; NULLET, M. A.; ZIELGER, A. D. Observations of albedo and radiation balance over postforest land surfaces in the eastern Amazon basin. **Journal of Climate**, v. 10, p. 919-928, 1997.

HENDERSON-SELLERS, A.; GORNITZ, V. Possible climatic impacts of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation. **Climatic Change**, v. 6, p. 231-257, 1984.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, Washington, v. 4, n. 10, p. 957-987, 1991.

RANDOW, C. V.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M.; GASH, J.; ELBERS, J. A.; WATERLOO, M. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 5-26, 2004.

SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M. H.; SATYAMURT, P.; SOARES-FILHO, B. S.; CARDOSO, M. F. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letter**, v. 34, p. 1-7, 2007.

SILVA DIAS, M. A. F. Meteorologia, desmatamento e queimadas na Amazônia: uma síntese de resultados do LBA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 190-199, 2006.

SILVA DIAS, M. A. F.; COHEN, J. C. P.; GANDU, A. W. Interações entre nuvens, chuvas e a biosfera na Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 215-222, 2005.

SIMON, M. F.; GARAGORRY, F. L. The expansion of agriculture in the Brazilian Amazon. **Environmental Conservation**, v. 32, n. 3, p. 203-212, 2005.

SOUZA, P. J. O. P.; ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, A.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C. Impactos no albedo em consequência do avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, n. 1, p. 87-95, 2008a.

SOUZA, P. J. O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C. Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, 2009c (no prelo).

SOUZA FILHO, J. D. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M. H.; COHEN, J. C. P.; ROCHA, E. J. P. Variação sazonal do balanço de radiação em uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 318-330, 2006.

CAPÍTULO 10

IMPACTOS NO BALANÇO DE ENERGIA

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos trabalhos já realizados sobre impactos ambientais na Amazônia tratam de simulação da substituição da floresta nativa por pastagem, prática que predominou nas décadas de 70, 80 e 90. Muitos destes trabalhos têm apontado para importantes mudanças no clima regional da Amazônia em resposta às alterações ocorridas nas interações biosfera-atmosfera (DICKINSON; HENDERSON-SELLERS, 1988; NOBRE et al., 1991; COSTA; FOLEY, 2000; RANDOW et al., 2004).

Nos últimos anos, no entanto, o avanço da fronteira agrícola na Amazônia tem a monocultura da soja como principal atividade e vem trazendo preocupações da sociedade para os prováveis impactos ambientais decorrentes desta prática (SIMON; GARAGORRY, 2005). A mudança da cobertura vegetal de floresta para o cultivo de soja e mesmo o reaproveitamento de áreas de pastagem para o plantio desta cultura ocasionam mudanças ambientais mais drásticas quando comparada à forma histórica no uso da terra na Amazônia, associadas às mudanças na arquitetura da soja ao longo de seu ciclo (SOUZA et al., 2008a).

Apesar dos diversos problemas sócio-ambientais gerados, o avanço desta cultura para as regiões de baixas latitudes surgiu como estratégia para atender ao crescente aumento da população e da demanda por alimentos e mais recentemente pela

pressão decorrente da busca por biocombustíveis. A baixa rentabilidade econômica das pastagens da região também contribuiu para que houvesse esta alteração no uso da terra para fins agrícolas na região. Outro detalhe, no entanto, é o fato de que em algumas cidades da Amazônia, a soja foi adotada como estratégia para levar desenvolvimento e agregar valores aos serviços gerados direta e indiretamente na região.

Existem pouquíssimos trabalhos sobre os impactos da substituição da floresta para uso na agricultura na Amazônia, em especial para o caso da Soja (SOUZA et al., 2008a). Costa et al. (2007) e Sampaio et al. (2007), utilizando modelos globais, simularam possíveis impactos do avanço da soja no clima da Amazônia e verificaram uma possível redução da precipitação na região. Entretanto, estes resultados não são conclusivos por terem sido utilizadas apenas duas variáveis para parametrização do modelo (albedo e índice de área foliar) e não ter sido considerado os impactos gerados durante o período da entressafra.

As florestas tropicais desempenham um importante papel no ciclo de carbono, funcionando como sumidouros de carbono da atmosfera. No caso da Floresta de Caxiuanã situada na parte leste da Amazônia, verifica-se que a troca líquida do ecossistema (NEE) encontrada chega a $-10,9 \text{ Mg C ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$, com cerca de 20-30% do carbono fixado é estocado no solo (MALHI et al., 2009).

No caso da cultura da soja grande parte do carbono seqüestrado ficaria no solo por conta das raízes, mas retornaria para a atmosfera posteriormente com o preparo do solo para as próximas safras (AL-KAISI; YIN, 2005). Algumas pesquisas têm demonstrado que com a adoção de práticas de manejo adequadas, como o plantio direto, existe uma grande possibilidade de aumentar a quantidade de carbono armazenado no solo através da agricultura (PAUSTIAN et al., 1997; SAUERBECK, 2001; WEST; MALAND, 2002).

Entretanto, mesmo com técnicas de plantio direto a cultura da soja apresenta pouca eficiência em sequestrar carbono da atmosfera (BERNACCHI et al., 2005). Mesmo com elevados valores de NEE, ao se considerar a média da produtividade desta cultura na região a quantidade de carbono que seria removida do campo pelos grãos (C_g) seria em torno de $1944 \text{ kg C.ha}^{-1}$ gerando uma produtividade média do bioma ($NEE + C_g$) de $+ 938 \text{ kg C.ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ um emissor de carbono (BERNACCHI et al., 2005).

Outro fato importante na região Amazônica é que grande parte da chuva advém da reciclagem local do vapor d'água pelo processo de evapotranspiração associada à

convecção, sendo que 50 a 60% da precipitação pluvial são gerados por este processo e o restante proveniente do transporte de vapor d'água do oceano atlântico pelos ventos alísios (SALATI, 1978). Durante o período mais chuvoso na Amazônia, o saldo de radiação é particionado, sendo 64% como calor latente e 29% como calor sensível, não havendo diferenças sazonais significativas nesta partição (PEREIRA, 1998).

Portanto, é extremamente importante avaliar os possíveis impactos no balanço de energia local em decorrência desta mudança no uso do solo na Amazônia, uma vez que tais informações possibilitarão um melhor entendimento de como o ciclo hidrológico e o clima local/regional poderá ser afetado pelo avanço do plantio de soja na Amazônia. O objetivo desta pesquisa foi quantificar as alterações nos componentes do balanço de energia em uma área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Ecossistema de soja

O experimento no ecossistema de soja (*Glycine max* (L.) Merrill.) foi conduzido no ano de 2007 no município de Paragominas, situado na região nordeste do Estado do Pará. A área com plantio de soja ocupou uma extensão de 200 ha (latitude 02°59'08"S, longitude 47°19'57"W e altitude de 122 m). A escolha do município de Paragominas deveu-se pelo fato de ter havido uma grande expansão do cultivo da soja nesta região nos últimos anos. O desenvolvimento da cultura foi avaliado diariamente usando a classificação dos estádios proposta por Fehr e Caviness (1977) conforme Tabela 1A e Figura 1B apresentadas nos Apêndices A e B, respectivamente.

Uma torre micrometeorológica de 3 metros de altura foi instalada no centro da área experimental (Tabela 1). Os sensores foram conectados a um datalogger CR10X (Campbell Scientific, Inc.) e a um multiplexador AM416 (Campbell Scientific, Inc.). As medidas dos dados durante o experimento foram realizadas a cada 10 segundos, fornecendo totais e médias a cada 10 minutos. Na área experimental a bordadura existente foi superior a razão 1:100 exigida para uma boa representatividade dos dados coletados.

Tabela 1 – Lista de instrumentos, alturas e medições da estação meteorológica automática instalada no experimento da soja

Variável meteorológica	Instrumento usado, fabricante (modelo)	Alturas
Radiação global incidente e refletida	Pyranometers Kipp & Zonen (CMP3)	2,45 (m)
Saldo de radiação	NR Lite (Campbell Sci.)	2,45 (m)
Temperatura do ar	Vaisala thermohygrometer (HMP35A), PT100 resistors	0,5; 1; 2 (m)
Umidade relativa do ar	Vaisala thermohygrometer (HMP35A)	0,5; 1; 2 (m)
Umidade do solo	Soil Reflectômetros (CS615)	10; 20; 0 to 30 (cm de profundidade)
Velocidade do vento	Cup Anemometers vector R.M. Young	0,5; 1; 2 (m)
Chuva	Rain gauge TB4	3,9 (m)
Fluxo de calor no solo	Flux plates Hukseflux (HFP01SC-L)	10; 10 (cm de profundidade)

2.2. Ecossistema florestal

Os dados referentes ao ecossistema florestal foram obtidos na Floresta Nacional de Caxiuanã localizada no setor central do estado do Pará, em área pertencente à região do Arquipélago do Marajó (00°50'31"S; 46°38'56"W; 30 m) cuja floresta possui um dossel com altura média de 36 m. Foram utilizados dados médios das mesmas variáveis medidas no ecossistema de soja com sensores instalados em uma torre de 54m de altura. O período de dados utilizados no trabalho correspondeu aos mesmos do experimento da soja, entre fevereiro e junho de 2007. Para o período de entressafra, foram utilizados dados correspondentes aos meses de julho a novembro do ano de 2007 em ambos os ecossistemas.

2.3. Balanço de energia

Os componentes do balanço de energia foram obtidos conforme a equação 1 abaixo:

$$Rn = H + LE + G + \Delta Qs + \Delta Qa \quad (1)$$

em que os componentes ΔQs e ΔQa representam o fluxo de calor armazenado e o fluxo de calor advectado lateralmente ao longo do volume de controle, respectivamente, Rn o saldo de radiação, H , LE e G os fluxos de calor sensível, latente e para o solo, respectivamente.

A energia armazenada no dossel (ΔQs) foi desconsiderada no balanço por apresentar relativa importância apenas durante as fases de transição do dia (MOORE; FISCH, 1986), representando no caso da soja no máximo 8% do saldo de radiação no início do dia (MEYERS; HOLLINGER, 2004). A energia advectada (ΔQa) foi considerada desprezível pela condição de extensa bordadura existente no experimento (GAVILAN; BERENGENA, 2007). O processo fotossintético, contida na componente armazenada, usa em média cerca de 3% do saldo de radiação e, portanto, foi também desprezado (PEREIRA, 1998).

Os componentes H e LE foram obtidas por meio da razão de Bowen (β) medida através das relações do transporte vertical de calor e vapor d'água, assumindo que exista igualdade nos coeficientes de transporte turbulento (K_H e K_{LE}) (ARIA, 1998).

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{C_p \Delta T}{\lambda \Delta q} \quad (2)$$

em que, C_p é o calor específico à pressão constante ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) λ é o calor latente de evaporação (J kg^{-1}).

Tomando-se a equação da umidade específica (ARIA, 1998), é possível expressar a razão de Bowen em função da pressão de vapor d'água (e):

$$\beta = \frac{C_p P}{\lambda \cdot 0,622} \frac{\Delta T}{\Delta e} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (3)$$

em que, P é a pressão atmosférica (Kpa), γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{Kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$), ΔT e Δe são as diferenças de temperatura do ar ($^\circ\text{C}$) e de pressão de vapor d'água (Kpa) entre dois níveis consecutivos, respectivamente.

Para evitar problemas associados ao efeito de áreas adjacentes nas medidas, os instrumentos foram instalados de forma que apresentassem suficiente bordadura na direção predominante do vento (de 900 a 1000 m) e o nível dos sensores foi alterado frequentemente com o crescimento da cultura, mantendo-se sempre o mesmo intervalo do perfil (0,5-1-2m) garantindo que os mesmos permanecessem dentro da camada limite de equilíbrio (ROSEMBERG et al., 1983).

Adotou-se a metodologia proposta por Perez et al. (1999), onde é sugerido um método analítico para determinar a consistência dos sinais observados na relação fluxo-gradiente entre as componentes e de quais valores de β próximos de -1 podem ser desprezados. Utilizou-se o teste t de student ao nível de 5% de probabilidade para verificar a significância das diferenças entre as médias dos dois ecossistemas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O saldo de radiação disponível na floresta foi superior ao encontrado na soja na maioria dos dias analisados, principalmente durante a entressafra onde se observou 86% de ocorrência (Figura 1a). Durante o ciclo da soja a ocorrência de menores valores de saldo de radiação em comparação à floresta foi menor (75%). A ocorrência de menor quantidade de energia disponível no ecossistema agrícola está diretamente associada ao aumento da componente refletida ao longo do ciclo (SOUZA et al., 2007) como também à maior perda de ondas longas pela superfície associada ao aumento do IAF (FONTANA et al., 1991). A diferença latitudinal entre os locais não foi suficiente para causar impactos nas variáveis uma vez que a diferença observada na radiação solar incidente variou entre 4 e 21% em função do grau de nebulosidade.

Os dois ambientes apresentaram condições meteorológicas bastante distintas, em especial na entressafra, quando a atmosfera na soja apresenta-se mais quente e mais seca (Figuras 1b, 1c e 1d). Durante o ciclo da cultura apesar da menor dispersão na temperatura e umidade entre os dois ambientes, percebe-se que o ecossistema de soja ainda esteve relativamente mais quente e com maior demanda atmosférica por vapor d'água.

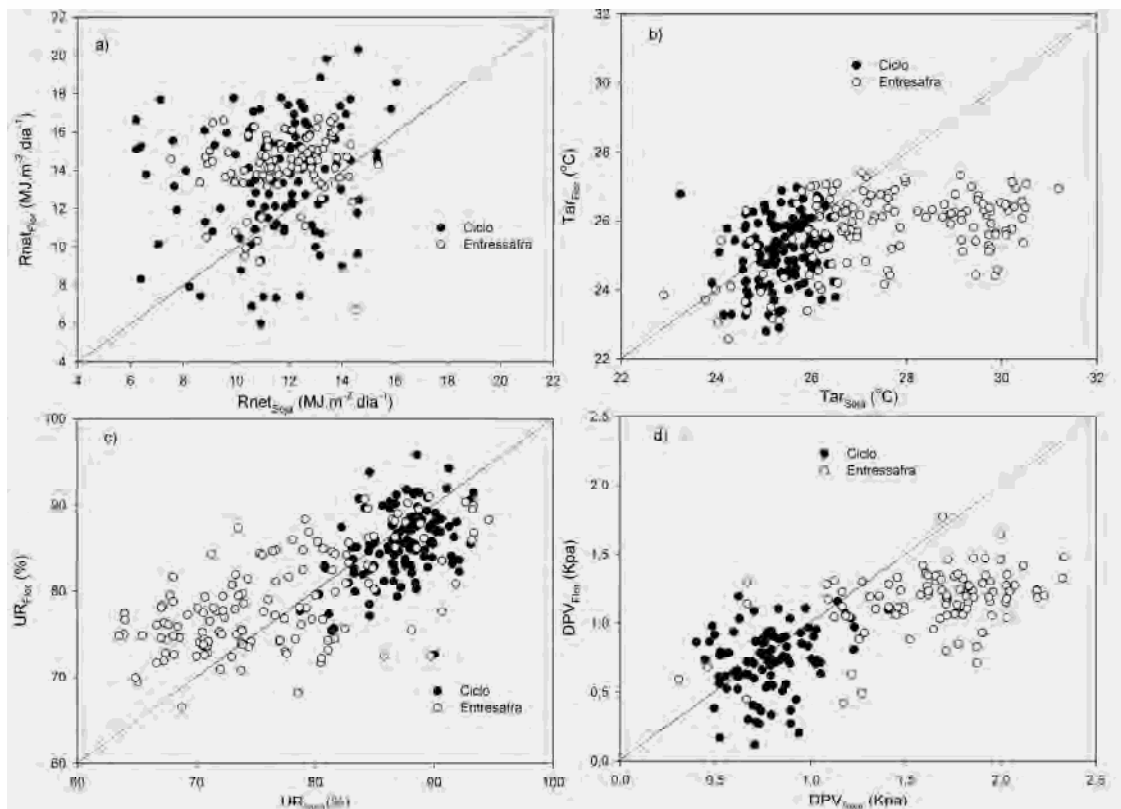


Figura 1 – Comparação entre médias diárias do saldo de radiação (a), temperatura do ar (b), umidade relativa (c) e déficit de pressão de vapor diurno (d) na floresta e na soja durante o ciclo e período de entressafra.

Os principais reguladores desta diferença encontrada entre os locais estão ligados diretamente ao regime de chuvas e ao albedo da superfície (Figura 2). Ao se considerar todo o ciclo da cultura, observa-se um aumento médio relativo no albedo de 93% devido à mudança no uso do solo, o que contribuiu sobremaneira para a redução no saldo de radiação (SOUZA et al., 2008a). Embora na entressafra o albedo na floresta apresente um leve aumento (CARSWELL et al., 2002), o albedo na soja permaneceu próximo de 20% durante quase todo o período, contribuindo para um maior impacto nesta época do ano.

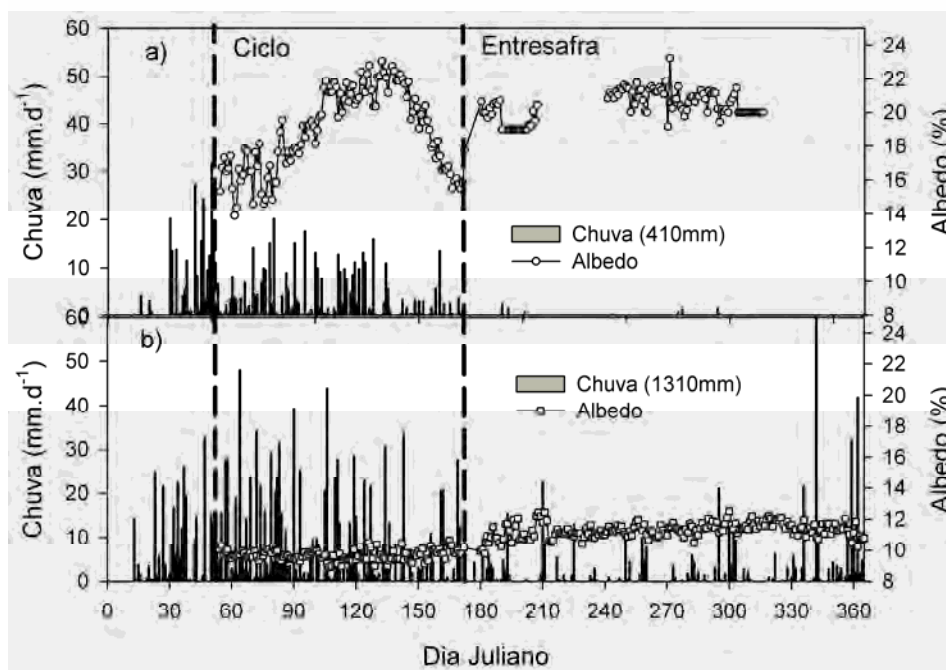


Figura 2 – Evolução da chuva e do albedo ao longo do ano na soja (a) e na floresta (b).

O regime de chuvas na floresta durante o período do ciclo da cultura foi quase três vezes superior ao observado na soja, mantendo a atmosfera sempre mais fria e úmida (Figura 2). No entanto, a quantidade de chuvas observada na área de soja (410 mm) não afetou de forma significativa a condutância do dossel à difusão de vapor, mantendo a cultura em níveis adequados de disponibilidade hídrica (COSTA, 2008). Durante a entressafra a diferença no regime de chuvas foi mais drástica havendo pouquíssimos eventos de chuva no ecossistema agrícola, sendo, portanto um importante controlador das condições climáticas observadas nesta área e época do ano conforme observado anteriormente na Figura 1.

Nota-se uma diferença marcante no balanço de energia durante a safra de produção de soja, principalmente no período de entressafra (Figura 3b). As componentes H e LE apresentaram uma variação sazonal bastante brusca durante todo o sistema de produção da soja na região. Durante o ciclo da soja grande parte da energia é consumida pelo calor latente sendo muito pouco direcionado para H. Observa-se picos diários de quase 14 MJm^{-2} de fluxo de calor latente e máximos de H de apenas 7 MJm^{-2} .

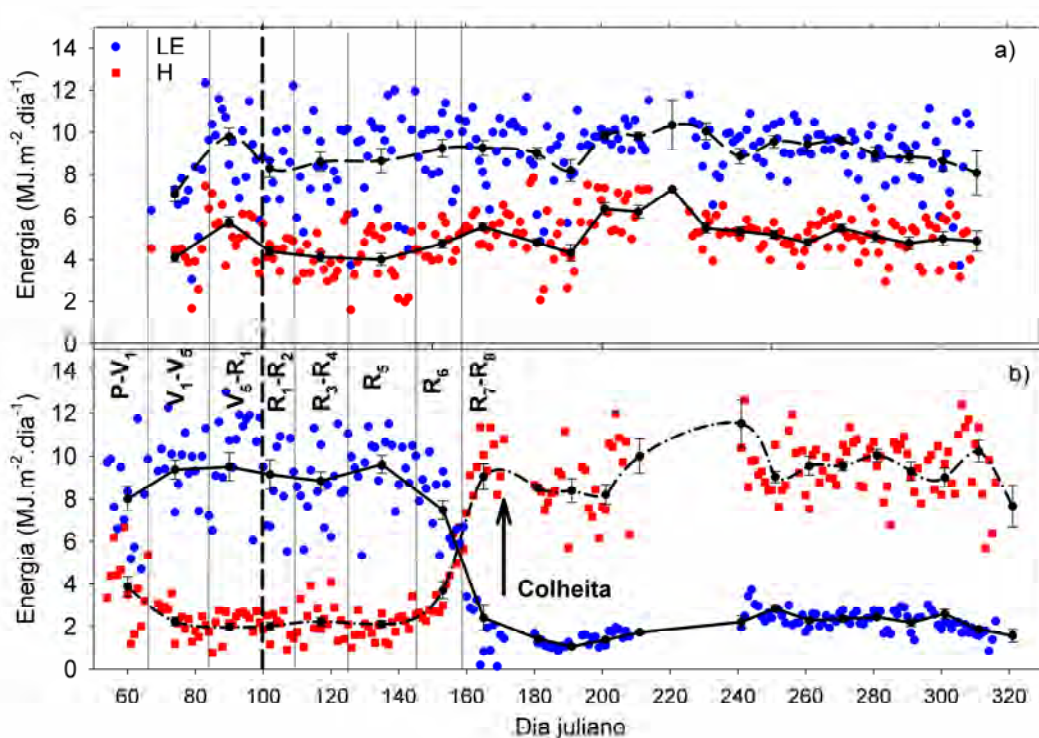


Figura 3 – Componentes médias do balanço de energia durante o ano na floresta (a) e na soja (b). Barras verticais representam o erro padrão.

Um fato interessante, no entanto, é a ocorrência de uma brusca alteração no balanço de energia após o período da colheita. Durante a entressafra a energia consumida na forma de calor latente raramente ultrapassa 2 MJm^{-2} , sendo grande parte da energia consumida como calor sensível (máximos de 12 MJm^{-2}).

Esta mudança na partição de energia e consequente redução na fração de calor latente é uma das principais conseqüências das atividades agrícolas nos ecossistemas terrestres devido à diminuição no período de crescimento das culturas em relação às espécies de plantas nativas (CHEN et al., 2009).

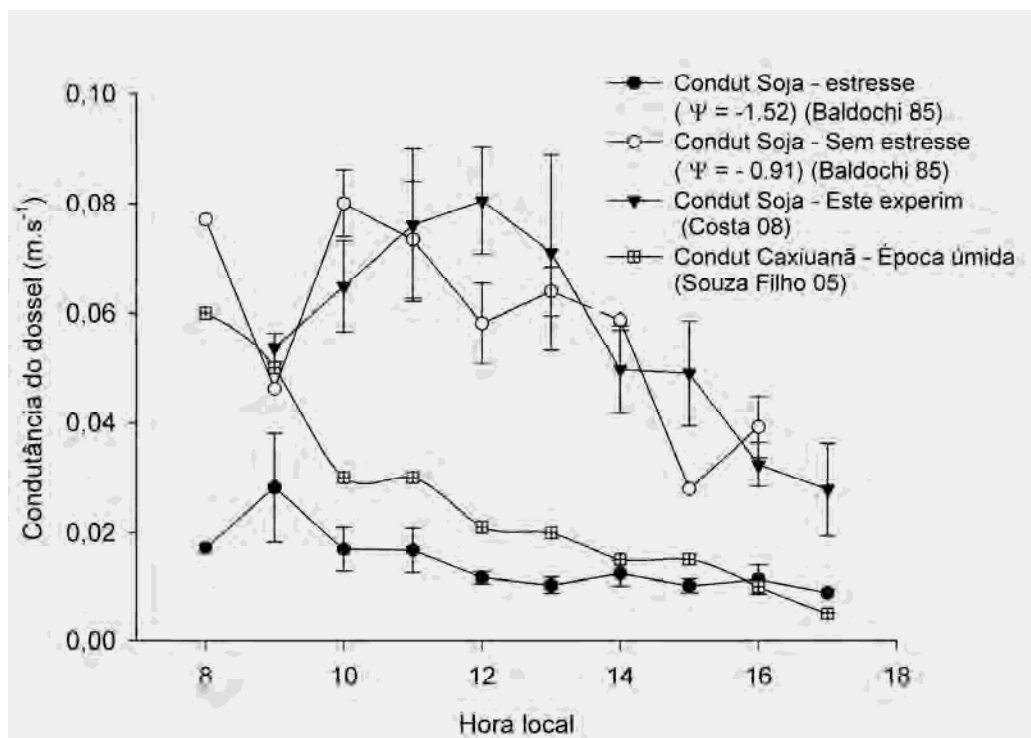
No caso do ecossistema florestal a sazonalidade é bem menos acentuada, apresentando picos diários de LE em torno de 12 MJm^{-2} durante o período correspondente ao ciclo da soja e extremos de no máximo 11 MJm^{-2} na entressafra (Figura 3a). A ausência de intensa sazonalidade está diretamente associada à cobertura vegetal presente o ano todo, o que não ocorre no ecossistema de soja.

Pelo fato do período de semeadura da soja na Amazônia coincidir com a maior disponibilidade de água nesta região, o aumento no IAF e a maior condutância da

superfície (SOUZA et al., 2007) justificam a maior utilização de energia na evapotranspiração da soja em comparação com a cobertura original da floresta uma vez que o consumo de energia por LE aumenta de forma logarítmica com o aumento da condutância estomática nesta cultura (BALDOCHI et al., 1985).

Os valores de condutância da superfície encontrados neste experimento são superiores aos obtidos por Baldochi et al. (1985) para a soja sob estresse hídrico e para ecossistemas de floresta na Amazônia (SOUZA FILHO et al., 2005). Esta diferença está diretamente associada à disponibilidade de água existente durante esta época do ano como também ao elevado IAF observado na soja.

Costa (2008) estudou a variação ao longo do dia da condutância de superfície para o mesmo experimento e verificou valores máximos ocorridos próximo ao meio dia de $0,10 \text{ ms}^{-1}$ e mínimas de $0,03 \text{ ms}^{-1}$ no final da tarde para a soja com IAF entre 3 e 4. Resultados muito semelhantes foram obtidos por Baldochi et al. (1985) para a soja cultivada sem estresse hídrico em Nebraska, Estados Unidos (Figura 4).



Fonte: Costa (2008), Baldochi et al. (1985) e Souza Filho et al. (2005).

Figura 4 – Variação média horária da condutância da superfície na soja com IAF entre 3 e 4, na soja submetida a estresse e sem estresse hídrico com IAF entre 3,4 e 3,8 e em ecossistema florestal na Amazônia.

A grande questão em relação ao uso da terra para fins agrícolas na Amazônia é a contínua mudança no albedo, na arquitetura do dossel e conseqüentemente na perda por ondas longas ao longo do ciclo da cultura, tendo como resultado um impacto muito maior nos processos de troca entre a superfície e atmosfera durante um único período do ano (SOUZA et al., 2008a). De acordo com Cohen et al. (2007), o principal problema dos modelos de circulação geral e de meso-escala é justamente não considerar esta dinâmica que ocorre ao longo do tempo, o que pode comprometer a veracidade dos resultados simulados.

Em termos médios, nota-se que durante o ciclo da cultura ocorre um impacto positivo em LE de até 11% em algumas fases da soja. Este comportamento no fluxo de calor latente da soja está associado à elevada condutância do dossel da soja em relação ao encontrado na floresta. Em contrapartida observa-se uma redução de mais de 40% no fluxo de calor sensível até antes da maturação (Figura 5).

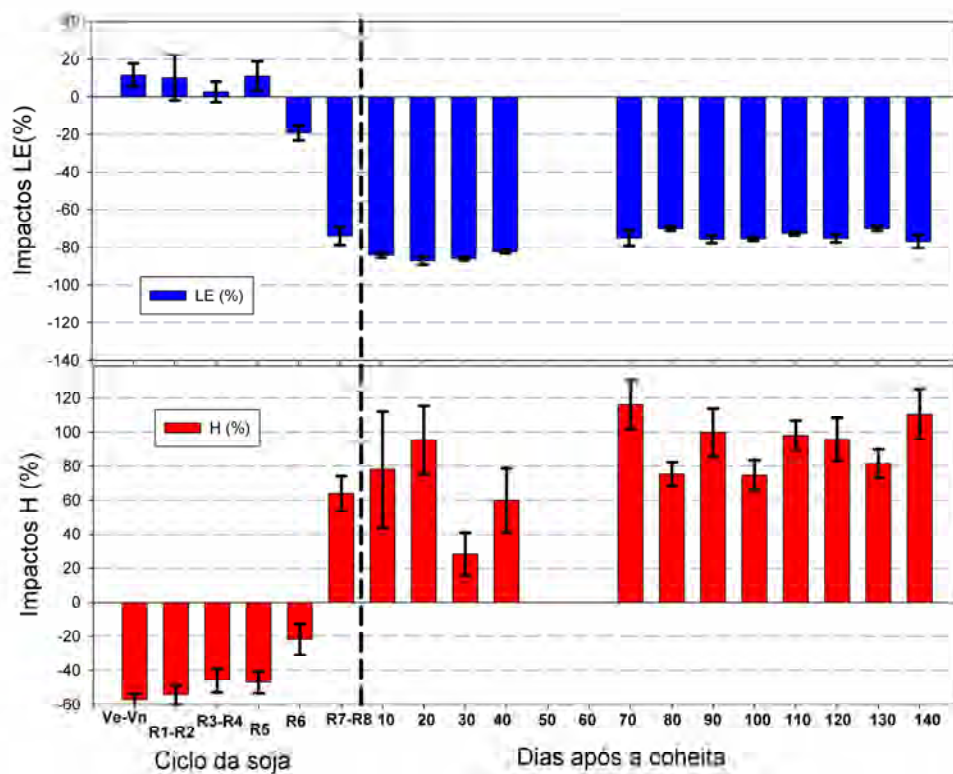


Figura 5 – Impacto médio nos componentes H e LE devido a substituição da floresta por soja na Amazônia.

Entretanto, durante a entressafra ocorre uma considerável redução no fluxo de calor latente representando um impacto negativo de quase 80% em relação ao valor normalmente observado na floresta. Em consequência disso, nota-se um aumento considerável na energia consumida na forma de calor sensível (+85%) (Tabela 2).

Tabela 2 – Impacto médio nos componentes do balanço de energia ao longo do sistema de produção da soja na Amazônia

Período	Rn (MJ.m ² .dia ⁻¹)	H (MJ.m ² .dia ⁻¹)	LE (MJ.m ² .dia ⁻¹)	Rn (%)	H (%)	LE (%)
Ciclo	-2,03* (±0,35)	-1,09* (±0,96)	-0,93 ^{ns} (±1,26)	-14,87* (±2,22)	-27,0* (±18,86)	-9,59 ^{ns} (±13,73)
Entressafra	-2,33* (±0,41)	+4,30* (±0,31)	-7,06* (±0,20)	-16,33* (±2,81)	+85,01* (±6,92)	-77,74* (±1,63)
Anual	-2,23* (±0,29)	+2,50* (±0,71)	-5,02* (±0,82)	-15,84* (±1,98)	+47,72* (±14,82)	-55,02* (±8,96)

Valores em parênteses representam erro padrão de estimativa. * = significativo ao nível de 5% pelo teste t. ^{ns} = não significativo.

A Tabela 2 apresenta um resumo geral dos impactos observados nos componentes do balanço de energia pela substituição da floresta por soja. Percebe-se que a redução que ocorre durante o ciclo no fluxo de calor latente não chega a 10%, não sendo estatisticamente significativa. Isto se dá pelo fato de que em algumas fases da cultura o consumo de energia na forma de LE ser superior ao observado na floresta.

O grande problema está na entressafra, quando há um aumento considerável no fluxo de calor sensível (85%) e uma brusca redução no calor latente (78%). Os principais fatores responsáveis por estas características estão relacionados primeiro à ausência de cobertura vegetal e intensa diminuição das chuvas nesta época do ano. O manejo adequado do solo logo após a colheita, como o emprego de rotação de culturas ou plantio de forrageiras como o milheto poderia vir a reduzir consideravelmente este impacto (SUYKER; VERMA, 2008; CHEN et al., 2009).

No caso de substituição da floresta por pastagens na Amazônia os impactos sazonais encontrados são da ordem de +44% e +28% no fluxo de calor sensível e de

-21% e -42% no fluxo de calor latente durante a estação chuvosa e seca, respectivamente (RANDOW et al., 2004).

Resultados de Sampaio et al. (2007) apontam para um aumento anual médio de apenas 5% no fluxo de calor sensível e uma redução média anual de 5,6% na evapotranspiração ao considerar 20% de substituição da floresta por soja. Para casos de substituição total da floresta por soja, o impacto anual gera um aumento de 54% em H e uma redução de 31,2% na evapotranspiração.

Percebe-se aqui que os dados medidos em campo não concordam com os resultados gerados por modelagem, talvez pelo fato de não se considerar no modelo a dinâmica na arquitetura do dossel ao longo do ciclo e principalmente por não incluir o efeito das interações ocorridas durante a entressafra. Tais contradições podem resultar em diferentes conclusões acerca da redução que ocorreria na precipitação da Amazônia resultante do avanço da soja

Ressalta-se, porém que ao se transformar grandes áreas de florestas para fins agrícolas, deve-se considerar o “*feedback*” que ocorre no balanço de energia à superfície em consequência de importantes interações existentes entre a superfície, a camada limite e os campos de nuvens (BETTS et al., 2007). Entretanto, para casos, por exemplo, de desmatamento local, de menor escala, os efeitos podem contribuir para um aumento na quantidade de nuvens sobre a região desmatada, devido ao efeito de circulações locais geradas pela intensificação dos gradientes horizontais de temperatura (AVISSAR et al., 2002; SILVA DIAS et al., 2005; CORREIA et al., 2006).

4. CONCLUSÕES

Observaram-se impactos médios anuais de -55% no LE e de +47% em H, havendo, porém uma influencia marcante da entressafra nesta média.

Ao contrário do que se imaginava a soja chega a consumir mais energia na forma de calor latente do que ecossistema florestal durante algumas fases do ciclo, devido a fatores como elevado IAF, e elevada condutância à difusão de vapor do dossel.

A simulação dos impactos no balanço de energia devido o avanço da soja obtida por Costa et al. (2007) e Sampaio et al. (2007) não condizem com o que foi observado neste trabalho. Tais contradições podem resultar em diferentes conclusões acerca da redução que ocorreria na precipitação da Amazônia resultante do avanço da soja.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento da pesquisa através do projeto CTHIDRO (processo nº 552738/2005-0) e ao projeto CARBO-PARÁ por disponibilizar os dados referentes ao ecossistema de floresta. O primeiro autor também agradece à CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

6. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AL-KAISI, M. M.; YIN, X. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn–soybean rotations. **Journal of Environmental Quality**, v. 34, p. 437-445, 2005.

ARIA, 1998.

AVISSAR, R.; SILVA DIAS, P. L.; SILVA DIAS, M. A. F.; NOBRE, C. The large-scale biosphere-atmosphere experiment in Amazônia (LBA): insights and future research needs. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 20, p. 54.1-54.6, 2002.

BALDOCHI, D. D.; VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J. Water use efficiency in a soybean field: influence of plant water stress. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 34, p. 53-65, 1985.

BERNACCHI, C. J.; HOLLINGER, S. E.; MEYERS, T. The conversion of the corn/soybean ecosystem to no-till agriculture may result in a carbon sink. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1867-1872, 2005.

BETTS, A. K.; DESJARDINS, R. L.; WORTH, D. Impact of agriculture, forest and cloud feedback on the surface energy budget in BOREAS. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 142, p. 156-169, 2007.

CARSWELL, F. E.; COSTA, A. C. L.; PALHETA, M.; MALHI, Y.; MEIR, P.; COSTA, J. P. R.; RUIVO, M. L.; LEAL, L. S. M.; COSTA, J. M. N.; CLEMENT, R. J.; GRACE, J. Seasonality in CO₂ and H₂O flux at an eastern Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 20, p. 1-16, 2002.

CHEN, S.; CHEN, J.; LIN, G.; ZHANG, W.; MIAO, H.; WEI, L.; HUANG, J.; HAN, X. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 129, p. 1800-1809, 2009.

COHEN, J. C. P.; BELTRÃO, J. C.; GANDU, A. W.; SILVA, R. R. Influência do desmatamento sobre o ciclo hidrológico da Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 36-39, 2007.

CORREIA, F. W. S.; ALVALÁ, R. C. S.; MANZI, A. O. Impacto das modificações da cobertura vegetal no balanço de água na Amazônia: um estudo com modelo de circulação geral da atmosfera (MCGA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 153-167, 2006.

COSTA, J. P. R. **Modelagem e simulação das interações biosfera-atmosfera em plantio de soja na Amazônia**. 2008. 127 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia. **J. Clim.**, v. 13, p. 18-34, 2000.

COSTA, M. H.; YANAGY, S. M. N.; PONTE DE SOUZA, P. J. O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 34, 2007.

DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A. Modelling tropical deforestation: a study of GCM land-surface parameterizations. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 114, p. 439-462, 1988.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. (Special Report, 80).

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 3, p. 403-410, 1991a.

GAVILAN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v. 25, p. 127-140, 2007.

MALHI, Y. R.; ARAGÃO, L. E. O. C.; METCALFE, D. B.; PAIVA, R.; QUESADA, C. A.; ALMEIDA, A.; ANDERSON, L.; BRANDO, P.; CHAMBERS, J. Q.; COSTA, A. C. L.; HUTYRA, L. R.; OLIVEIRA, P.; PATIÑO, S.; PYLE, E. H.; ROBERTSON, A. L.; TEIXEIRA, L. M. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. **Global Change Biology**, p. 1365-2486, 2009.

MEYERS, T. P.; HOLLINGER, S. R. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125, p. 105-115, 2004.

MOORE, C. J.; FISCH, G. Estimating heat storage in Amazonian Tropical Forest. **Agric. For. Meteorol.**, v. 38, p. 147-169, 1986.

- NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, Washington, v. 4, n. 10, p. 957-987, 1991.
- PAUSTIAN, K.; ANDRÉN, O.; JANZEN, H. H.; LAL, R.; SMITH, P.; TIAN, G.; TIESSEN, H.; VAN NOORDWIJK, M.; WOOMER, P. L. Agricultural soil as a sink to mitigate CO₂ emissions. **Soil Use and Management**, v. 13, p. 230-244, 1997.
- PEREIRA, A. R. Radiation regime of tropical rain forest. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 2, p. 1-7, 1998.
- PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141-150, 1999.
- RANDOW, C. V.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M.; GASH, J.; ELBERS, J. A.; WATERLOO, M. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 5-26, 2004.
- ROSEMBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment**. 2.ed. New York: John Wiley, 1983. 495 p.
- SALATI, E. Recycling of water in the Amazon, Brazil: an isotopic study. **Geophysical Research. Water Resources Research**, v. 15, n. 5, p. 1250-1258, 1978.
- SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M. H.; SATYAMURT, P.; SOARES-FILHO, B. S.; CARDOSO, M. F. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letter**, v. 34, p. 1-7, 2007.
- SAUERBECK, D. R. CO₂ emissions and C sequestration by agriculture – perspective and limitations. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 60, p. 253-266, 2001.
- SILVA DIAS, M. A. F.; COHEN, J. C. P.; GANDU, A. W. Interações entre nuvens, chuvas e a biosfera na Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 215-222, 2005.
- SIMON, M. F.; GARAGORRY, F. L. The expansion of agriculture in the Brazilian Amazon. **Environmental Conservation**, v. 32, n. 3, p. 203-212, 2005.
- SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C.; SOUSA, A. M. L. Balanço de energia na soja em áreas de fronteira agrícola na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007, Aracaju. **CD-ROM...** Aracaju: SBAGRO, 2007.

SOUZA, P. J. O. P.; ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, A.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C. Impactos no albedo em consequência do avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, n. 1, p. 87-95, 2008a.

SOUZA FILHO, J. D. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M. H.; COHEN, J. C. Mecanismos de controle da variação sazonal da transpiração de uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 223-229, 2005.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 417-427, 2008.

WEST, T. O.; MARLAND, G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. **Agricultural, Ecosystems and Environment**, v. 91, p. 217-232, 2002.

CAPÍTULO 11

MODELO DE CRESCIMENTO DE RENDIMENTO DA SOJA

1. INTRODUÇÃO

A fronteira agrícola na Amazônia vem avançando continuamente e a cultura da soja tem sido apontada como a principal responsável por isso (DANTAS; FONTELES, 2006). Existe uma preocupação generalizada sobre os impactos da substituição da floresta Amazônica com o monocultivo da soja sobre os ecossistemas e o clima regional e global (FEARNSIDE, 2001; COSTA et al., 2007; SAMPAIO et al., 2007, SOUZA et al., 2008a).

Modelos de crescimento de culturas são ferramentas poderosas para teste de hipótese e para compreender sistemas complexos e são comumente usados para comparar diferentes cenários (MARCELIS et al., 1998). Um modelo de crescimento da soja seria uma ferramenta essencial para avaliar o real impacto da substituição de floresta com cultivo de soja, em especial quando incorporados em modelos climáticos regionais.

Baseado na produtividade média da soja observada na região, a quantidade de carbono que seria removida do campo pelos grãos (C_g) seria em torno de 1944 kgC ha^{-1} (BERNACCHI et al., 2005). No entanto, parte do carbono seqüestrado pela cultura ficaria no solo por conta das raízes, retornando para a atmosfera posteriormente com o preparo do solo para as próximas safras (AL-KAISI; YIN, 2005).

Algumas pesquisas têm demonstrado que com a adoção de práticas de manejo adequadas existe uma grande possibilidade de aumentar a quantidade de carbono armazenado no solo através da agricultura (PAUSTIAN et al., 1997; SAUERBECK, 2001; WEST; MARLAND, 2002). Entretanto, mesmo com técnicas de plantio direto (no till) a cultura da soja apresenta baixa eficiência no seqüestro de carbono da atmosfera, apresentando uma produtividade média do bioma ($NEE + C_g$) de + 938 kg C.ha⁻¹, ou seja, um emissor de carbono (BERNACCHI et al., 2005).

Embora este novo modelo de uso da terra na Amazônia ocasione sérios impactos ambientais (COSTA et al., 2007; SAMPAIO et al., 2007; SOUZA et al., 2008a), é importante lembrar que o avanço desta cultura para as regiões de baixas latitudes surgiu como estratégia para atender ao crescente aumento da população e da demanda por alimentos e pela pressão decorrente da busca por biocombustíveis. Outro detalhe, no entanto, é o fato de que em algumas cidades da Amazônia, a soja foi adotada como estratégia para levar desenvolvimento e agregar valores aos serviços gerados direta e indiretamente na região.

Atualmente, os maiores produtores de soja são os Estados Unidos, o Brasil, a Argentina e a China, que juntos são responsáveis por 80% da produção mundial. Os três primeiros são responsáveis por 90% da comercialização mundial da oleaginosa, sendo o Brasil o segundo maior exportador (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2008). Dos 21,7 milhões de hectares cultivados com soja no Brasil, 45,5% localiza-se na região centro-oeste, com 5,6 milhões apenas no estado do Mato Grosso, e menos de 500 mil nos estados Amazônicos da região Norte do Brasil (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2009).

Apesar dos altos níveis pluviométricos, altas temperaturas e do favorecimento à proliferação de pragas e doenças dificultarem o avanço da soja na Amazônia (BENCHIMO et al., 2005), o desenvolvimento de novas variedades menos sensíveis a elevadas temperaturas e principalmente ao fotoperíodo, tornou possível a expansão da sojicultura para as regiões de baixa latitude (SINCLAIR et al., 2005). Para este caso em especial, o uso da modelagem na soja sob tais condições climáticas serviria como uma excelente ferramenta para o auxílio ao agricultor no manejo da cultura, como apoio à pesquisa com o melhoramento genético e como suporte ao zoneamento ecológico econômico que vem sendo implantado pelo poder público na região.

Dois modelos de crescimento de soja amplamente utilizados são o SOYCROS (PENNING DE VRIES et al., 1992) e o CROPGRO (BOOTE et al., 1998). Ambos os

modelos têm sido avaliados em uma ampla gama de condições ambientais e os resultados vêm sendo satisfatórios na simulação de efeitos de déficit hídrico (DOGAN, et al., 2007), de efeitos de “*tillage*” (ANDALES et al., 2000) ou da duração de desenvolvimento (KANTOLIC et al., 2007).

Na classificação dos modelos de crescimento existe um conjunto com nível de complexidade intermediário e com reduzido número de coeficientes demandados, sendo estes modelos conhecidos como modelos mecanísticos simplificados (SINCLAIR et al., 1992; STRECK; ALBERTO, 2006). Tais modelos (SINCLAIR, 1986; AMIR; SINCLAIR, 1991; SINCLAIR; AMIR, 1992; MUCHOW; SINCLAIR, 1991; SINCLAIR et al., 2003) utilizam um número reduzido de parâmetros, são compostos por funções matemáticas robustas e são de ampla aplicabilidade, sendo considerados intermediários entre os de regressão (empíricos) e modelos mais complexos (baseado em processos).

O objetivo deste estudo foi calibrar e validar uma versão modificada de um modelo de crescimento da soja que simula o desenvolvimento da cultura, formação de matéria seca e área foliar, balanço de água e nitrogênio e a produtividade da soja para as condições ambientais da Amazônia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Experimento de campo

O experimento foi realizado na região nordeste do estado do Pará, a cerca de 320 km da cidade de Belém. O campo experimental ficou localizado em uma área com 200 ha de plantio de soja (latitude 2°59'08"S, longitude 47°19'57"W, altitude: 122 m). O solo da região é classificado como Latossolo Amarelo Argiloso (Xanthic Haplodox) de textura variando de franco-arenosa a muito argilosa (71% de argila) com conteúdo volumétrico de água de 0,43 m⁻³m⁻³ na capacidade de campo e de 0,19 m⁻³m⁻³ no ponto de murcha.

O solo foi convencionalmente preparado durante a estação chuvosa e posteriormente foi semeado mecanicamente com a cultivar BRS Tracajá (maturidade precoce) a qual é a cultivar mais recomendada para esta região (EL-HUSNY et al., 2003a). A população de plantas foi de 200.000 plantas ha⁻¹ a um espaçamento entre colunas de 0,50 m.

Antes da sementeira, as sementes foram preparadas adequadamente com inoculante (*rhizobium*), fungicida e inseticida. A sementeira foi realizada em 05 de fevereiro de 2006, 23 de fevereiro de 2007 e 07 de fevereiro de 2008, a uma taxa de 26-28 sementes m⁻². Durante a sementeira realizou-se fertilização do solo com 2-20-18 de N, P e K a 350 kg ha⁻¹ de fertilizante químico. Em todos os experimentos, herbicidas e pesticidas foram utilizados quando necessário.

A colheita foi realizada nos dias 15, 21 e 06 de junho de 2006, 2007 e 2008, respectivamente. Além destes dados de produtividade, 12 coletas extras foram realizadas e utilizadas para avaliar o resultado de produtividade simulado pelo modelo. Estes experimentos foram conduzidos em 2007 e 2009 com as mesmas características citadas acima e com os respectivos manejos descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Experimentos extras para validação da produtividade final do modelo

Identificação	Sementeira	Colheita	População (plantas.m ⁻²)
2007 ^b	18/01/07	25/05/07	22,4
2007 ^c	23/01/07	26/05/07	22,4
2007 ^d	02/02/07	29/05/07	22,4
2009 ^a	17/02/09	16/06/09	22
2009 ^b	24/02/09	18/06/09	10
2009 ^c	24/02/09	18/06/09	20
2009 ^d	24/02/09	18/06/09	30
2009 ^e	24/02/09	18/06/09	40
2009 ^f	14/03/09	20/07/09	10
2009 ^g	14/03/09	20/07/09	20
2009 ^h	14/03/09	20/07/09	30
2009 ⁱ	14/03/09	20/07/09	40

2.2. Medidas meteorológicas

Uma torre micrometeorológica de 3 metros de altura foi instalada no centro da área experimental (Tabela 2). Os sensores foram conectados a um datalogger CR10X (Campbell Scientific, Inc.) e a um multiplexador AM416 (Campbell Scientific, Inc.). As

medidas dos dados durante o experimento foram realizadas a cada 10 segundos, fornecendo totais e médias a cada 10 minutos.

Tabela 2 – Lista de instrumentos, alturas e medições da estação meteorológica automática instalada no experimento da soja

Variável meteorológica	Instrumento usado, fabricante (modelo)	Alturas
Radiação global incidente e refletida	Pyranometers Kipp & Zonen (CMP3)	2,45 (m)
Radiação fotossinteticamente ativa incidente (PAR)	Quantum sensor LI-COR (LI-190)	4 (m)
PAR refletida	Quantum sensor LI-COR (LI-190)	2 (m)
Radiação global transmitida	Tubo solarímetro	Superfície do solo
PAR transmitida	line quantum sensor LI-COR (LI-191)	Superfície do solo
Saldo de radiação	NR Lite (Campbell Sci.)	2,45 (m)
Temperatura do ar	Vaisala thermohygrometer (HMP35A), PT100 resistors	0,5; 1; 2 (m)
Umidade relativa do ar	Vaisala thermohygrometer (HMP35A),	0,5; 1; 2 (m)
Umidade do solo	Soil Reflectometers (CS615)	10; 20; 0 to 30 (cm de profundidade)
Velocidade do vento	Cup Anemometers vector R.M. Young ()	0,5; 1; 2 (m)
Chuva	Rain gauge TB4	3,9 (m)
Fluxo de calor no solo	Flux plates Hukseflux (HFP01SC-L)	10; 10 (cm de profundidade)

A evapotranspiração da cultura foi medida usando a técnica da razão de Bowen, a qual foi avaliada e corrigida seguindo as recomendações sugeridas por Perez et al. (1999). O balanço de energia na soja foi medido apenas nos anos 2006 e 2007 pela disponibilidade de informações. A evapotranspiração da soja foi então obtida em função dos valores diurnos de fluxo de calor latente e usados na validação do modelo.

2.3. Medidas de crescimento e desenvolvimento

Dados para análise de crescimento foram coletados semanalmente a partir dos 10 dias após a semeadura (DAS). A amostragem das plantas consistiu de escolhas

aleatórias de linhas de um metro de comprimento com seis repetições. Todas as amostras eram mantidas em saco de papel após terem sido coletadas até o processamento final no laboratório. As amostras eram então separadas em folhas, caules, pecíolos, flores e vagens e eram colocadas para secar em estufa aerada a 70°C.

Na maturação fisiológica (R7-R8), a produtividade foi medida por meio de coleta de seis repetições de um metro quadrado de área. O desenvolvimento fenológico foi avaliado diariamente usando a escala descrita por Fehr e Caviness (1977) conforme Tabela 1A e Figura 1B apresentadas nos Apêndices A e B, respectivamente, e também durante a amostragem das plantas.

A área foliar foi estimada através do método dos discos (BENINCASA, 2003). Trinta discos de área conhecida foram coletados por repetição, colocados pra secar e pesados. O índice de área foliar foi estimado considerando estas medidas e o peso seco das folhas.

2.4. Descrição do modelo

O modelo usado neste estudo foi uma versão modificada do modelo desenvolvido especificamente para a soja por Sinclair (1986) e Sinclair et al. (2003). Este modelo é definido como “fenomenológico” por representar fenômenos gerais ao invés de descrições detalhadas dos mecanismos envolvidos no crescimento da cultura. O modelo considera os três principais constituintes da planta: carbono, nitrogênio e água, e faz uma alocação destes constituintes nos dois principais componentes, que são: material vegetativo e grãos.

Este modelo já foi calibrado e testado em diferentes condições agroecológicas com bons resultados, como por exemplo, os observados na Argentina (SINCLAIR et al., 1992b e 2007), no Japão (SPAETH et al., 1987), na Austrália (MUCHOW; SINCLAIR, 1986), na França (WOLF, 2002) e mais recentemente no Sul do Brasil no estado do Paraná (SINCLAIR et al., 2003) e no Estado do Rio Grande do Sul (ALBERTO et al., 2006; STRECK; ALBERTO, 2006).

O modelo simula o crescimento foliar em função da temperatura média diária. Baseado no crescimento foliar obtém-se o índice de área foliar que é usado para determinar a radiação interceptada pela cultura. O acúmulo de biomassa é então derivado em função da eficiência do uso da radiação e da radiação interceptada. A biomassa produzida é dividida em folhas e ramos (representando todo o restante da

planta) até o período de início do enchimento de grãos. A partir deste estágio o crescimento do grão é simulado em função do índice de colheita e da duração do período de enchimento, considerando a translocação de massa e de nitrogênio das partes vegetativas para o grão. Todos estes processos são penalizados por um balanço de nitrogênio e de água que também são simulados diariamente (Figura 1).

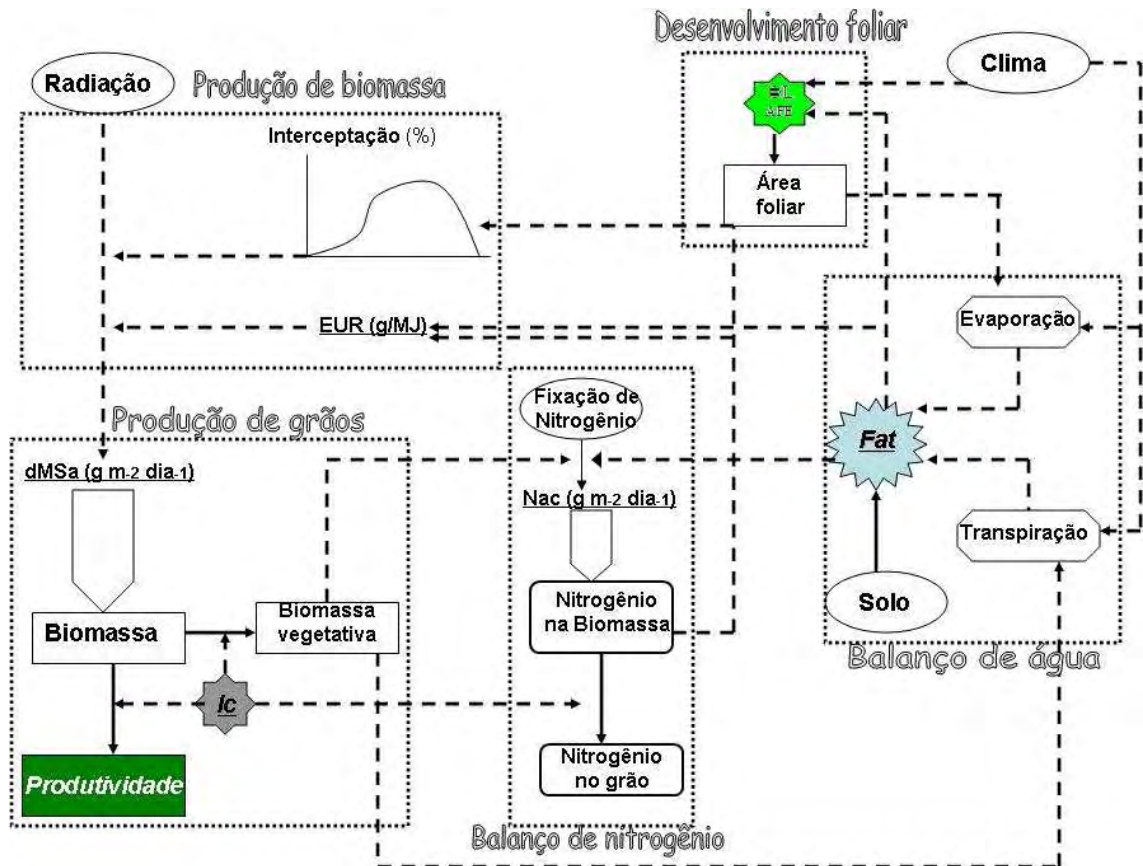


Figura 1 – Fluxograma do modelo de crescimento e produtividade da soja.

2.4.1. Desenvolvimento fenológico

A versão original do modelo não apresentava um módulo de desenvolvimento fenológico, sendo necessário indicar através de datas a ocorrência de algumas fases para determinados processos. Na nova versão os estádios de desenvolvimento são simulados usando a escala térmica normalizada (θ), onde o tempo térmico é calculado de acordo com o modelo de “*dente de serra*” considerando o efeito redutivo de elevadas

temperaturas (FERREIRA et al., 1997) e os tempos térmicos medidos para as fases R1, R3, R5 e R6 são os normalizadores (PENNING DE VRIES et al., 1992; COSTA et al., 2009). A correção de fotoperíodo não foi considerada pelo fato das cultivares usadas serem adaptadas a região norte do Brasil (SINCLAIR et al., 2005). O tempo térmico normalizado para as fases fenológicas usadas no modelo são $\theta = 1$ para o florescimento (R1), $\theta = 2$ para o término do crescimento foliar (\approx R3), $\theta = 3$ para o início do enchimento de grãos (R5) e $\theta = 4$ para a fase e enchimento pleno do grão (R6).

2.4.2. Formação de área foliar

O modelo original simula o crescimento foliar como função da temperatura média diária por meio do índice de plastocrono, uma vez que a taxa diária de desenvolvimento do plastocrono apresenta uma relação linear com a temperatura (SINCLAIR, 1983). A área foliar da planta é então obtida empiricamente em função do índice de plastocrono.

Na presente versão, a área foliar é simulada em função da matéria seca acumulada multiplicada pela área foliar específica (AFE). A quantidade de matéria seca alocada nas folhas (Δ_L) é obtida segundo De Melo-Abreu et al. (1994):

$$d\Delta_L = \frac{d\Phi_L}{d\tau} \Delta_V d\tau + \Phi_L d\Delta_V \quad (1)$$

em que Δ_L é a matéria seca nas folhas; Δ_V a matéria seca total da parte aérea presente nas estruturas vegetais (folhas e caules), τ o tempo térmico normalizado.

A fração de matéria seca nas folhas (Φ_L) e a área foliar específica (AFE) são ambas funções do tempo térmico normalizado (θ), as quais são:

$$\Phi_L = \begin{cases} a + b \exp(-c \theta) & \theta \leq 3 \\ d - e \theta & \theta > 3 \end{cases} \quad (2)$$

e

$$AFE = A - B\theta + C\theta^2 - D\theta^3 + E\theta^4 \quad (3)$$

Com seus respectivos coeficientes apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Principais funções, variáveis e parâmetros usados modelo de simulação

Seção do modelo e saídas	Equações do modelo	Dados de entrada
Estádio de desenvolvimento		
Temperatura efetiva	<p>Ferreira et al. (1997)</p> $T_e = T_b + f(T)(T_o - T_b)$ $f(T) = \begin{cases} \frac{T - T_b}{T_o - T_b} & T_b \leq T < T_o \\ \frac{T - T_b}{T_x - T_b} & T_o \leq T < T_x \end{cases}$	<p>Tb=5 °C; To=23.3 °C; Tx=30.2 °C Este Experimento (E.E)</p>
Tempo térmico normalizado (θ)	Penning de Vries et al. (1992); Costa et al. (2009)	R1=414,4°C d ⁻¹ ; R3=538,2 °C d ⁻¹ ; R5=691,0 °C d ⁻¹ ; R6=934,4 °C d ⁻¹ (E.E)
Crescimento foliar		
Partição de material seca (Φ_L)	De Melo-Abreu et al. (1994)	a=0,21; b=0,55; c=0,52; d=70,65; e=-13,34 (E.E)
Área foliar específica (AFE)		A=0,032; B=-0,0064; C= 0,0032; D=-0,0007; E=6,8E-05 (E.E)
Acumulo de material seca		
Produção potencial de assimilados	Monteith (1977)	RUE=1,82 (g MJ ⁻¹) k = 0,72 (E.E)
Fator de nitrogênio da folha	Sinclair et al. (2003)	LFN=2,4 (g N m ⁻²)
Fator de água transpirável disponível	Sinclair (1986)	a=14
Fator de radiação difusa	Anderson et al. (2000)	Δ_{dir} =0,4
Crescimento de grãos		
	Sinclair (1986)	Conteúdo de N no grão=51.8 (mg.g ⁻¹) (E.E)
	Sinclair (1986)	Taxa de aumento do índice de colheita =0,012 (dia ⁻¹) (E.E)
Balanco de Nitrogênio		
	Sinclair (1986)	N específico nos ramos =12,4 (mg g ⁻¹) (E.E) N dos ramos senescidos =6,76(mg g ⁻¹) (E.E) N de folhas senescidas =14.6(mg g ⁻¹) (E.E)
Fator de água transpirável disponível	Sinclair et al. (2003)	a=6
Balanco de água		
Evapotranspiração da cultura	Allen et al. (1998) Costa (2008)	
Resistência estomática (s m ⁻¹)	$\left[a * \exp\left(\frac{b * VPD * T_{mean}}{S_{in}}\right) \right]$	a=28.11; b=10.5
Altura da cultura	$h = \left[\left(\frac{A}{1 + \exp\left(-\left(\frac{\theta - X_0}{B}\right)\right)} \right) \right]$ $h = \begin{cases} \theta & \theta < 4 \\ [Y_0 + C\theta] & \theta \geq 4 \end{cases}$	A=106,74; B=0,407; X0=0,949 (E.E) Y0=262,79; C= -38,52 (E.E)
Evaporação do solo	Ritchie (1972)	

A simulação da área foliar se estende até o final do período de crescimento foliar ($\approx R3 \Leftrightarrow \theta = 2$). A partir desta fase, a área foliar é mantida constante e sua redução torna-se dependente da translocação de massa e de nitrogênio para os grãos. O incremento diário de área foliar é controlado pela quantidade de matéria seca formada, como mostrado na equação 1, a qual pode ser reduzida, em relação ao seu valor potencial, por baixos níveis de água no solo e de concentração de nitrogênio na planta (SINCLAIR, 1986).

2.4.3. Produção de biomassa

O acúmulo de biomassa é derivado em função da eficiência do uso da radiação (EUR) e da radiação interceptada pela cultura a qual é simulada em função do índice de área foliar e do coeficiente de extinção (equação 4).

$$dMSa = \int FRI * EUR * PAR_{int} dt \quad (4)$$

em que $dMSa$ é a produção diária de matéria seca aérea ($g\ m^{-2}$); FRI, fração de radiação PAR interceptada (%); EUR, eficiência do uso da radiação ($g\ MJ^{-1}$); e PAR_{int} , radiação PAR interceptada pela cultura ($MJ\ m^{-2}$).

EUR é reduzido quando o solo se torna suficientemente seco. A redução na EUR é interpretada por meio do efeito do estresse hídrico no controle estomatal, causando uma restrição na perda de vapor d'água pela planta e, conseqüentemente, reduzindo a entrada de CO_2 na mesma. A relação entre a transpiração e a fração de água transpirável do solo (FATS) segue uma função logística de acordo com Sinclair e Ludlow (1986), conforme equação 5:

$$dMSa_w = dMSa * \left(\frac{2}{1 + \exp^{(-2FATS)}} \right) - 1 \quad (5)$$

em que $dMSa_w$ é a produção de matéria seca da parte aérea penalizada pela água (gm^{-2}).

A produção potencial de biomassa também sofrerá penalização nutricional. Para valores de nitrogênio específico da folha abaixo de $2,4\ g\ N_2\ m^{-2}_{folha}$, Sinclair e Horie (1989) encontraram que a eficiência do uso da radiação decresce linearmente,

aproximando-se de zero quando o conteúdo de nitrogênio da folha é igual a $1 \text{ gN}_2\text{m}^{-2}$ folha.

Uma nova função foi incluída no modelo para simular a dependência da EUR com a radiação difusa conforme sugerido por Anderson et al. (2000), já que uma das características específicas da região Amazônica é que durante o ciclo da soja (período chuvoso), maior parte da radiação incidente que atinge a superfície do solo chega na forma difusa. A penalização devido a radiação difusa proposta por Anderson et al. (2000) é descrita conforme equação 6:

$$EUR' = EUR * [1 + 2 * \Delta_{dif} * (f_{dif} - 0,5)] \quad (6)$$

em que EUR' é a eficiência do uso da radiação penalizado, Δ_{dif} é um fator fisiológico para culturas C3 e f_{dif} é a fração de radiação difusa.

A produção de biomassa é então particionada em folhas e caule até o início do enchimento de grãos (R5), simulado em função do tempo térmico normalizado ($\theta = 3$).

2.4.4. Crescimento dos grãos

A taxa de crescimento de grãos é simulada em função do índice de colheita devido o seu aumento linear com o tempo (SALADO-NAVARRO et al., 1985; SPAETH; SINCLAIR, 1985). À medida que o grão cresce, existe translocação de carbono e de nitrogênio para o mesmo. O modelo simula tal ocorrência, desviando parte das reservas de carbono e nitrogênio para os grãos reduzindo as quantidades de carbono e conteúdo de nitrogênio presente nas partes vegetativas (SINCLAIR et al., 2003).

A redução no conteúdo de nitrogênio da folha é obtida pelo produto da taxa do crescimento do grão e do conteúdo de nitrogênio presente nos grãos. O valor original de concentração de nitrogênio nos grãos existente no modelo é igual a $0,065 \text{ g N}_2 \text{ g}^{-1}$ (SINCLAIR et al., 2003). A concentração de N de várias partes da planta foram medidas e incluídas na calibração do modelo (Tabela 4).

A redução do nitrogênio das folhas produz senescência das mesmas e perda adicional de biomassa durante a fase reprodutiva. Esta teoria foi inicialmente sugerida por Sinclair e De Wit (1976), onde se identifica a “autodestruição” da soja uma vez que grande quantidade de nitrogênio é transferida do material vegetativo para os grãos, para suprir o crescimento dos mesmos durante esta fase

2.4.5. Balanço de nitrogênio

O modelo original desenvolvido por Sinclair (1986) inclui uma sub-rotina totalmente empírica e precisava ser calibrado para cada ambiente, devido as incógnitas presentes no balanço de nitrogênio do solo. Sinclair et al. (2003), baseado no trabalho de Jamieson e Semonov (2000), consideraram a fixação biológica como única fonte de nitrogênio para a planta, sendo capaz de compensar as eventuais deficiências de nitrogênio do solo, evitando assim as dificuldades em simular o balanço de nitrogênio no solo.

A contribuição da fixação biológica de nitrogênio pela soja chega a representar 88% de todo o nitrogênio acumulado na parte área da planta, podendo aumentar em até 5% ao se considerar a contribuição das raízes, garantindo desta forma, elevados níveis de produtividade e um balanço de nitrogênio do solo, quando não positivo, ao menos próximo da neutralidade (ALVES et al., 2006).

O balanço de nitrogênio na soja é simulado diferentemente durante a fase vegetativa e reprodutiva cuja transição acontece na fase R5 ($\theta = 3$):

2.4.5.1. Fase vegetativa

O acúmulo diário de nitrogênio (NAC) se baseia na quantidade exigida por cada parte da planta (folha e ramos) para desenvolver nova área foliar e produzir nova biomassa de ramos (equação 7).

$$NAC = MSr * Ner + (IAF) * Nef \quad (7)$$

em que NAC é o nitrogênio acumulado diariamente ($\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); MSr, biomassa produzida nos ramos (g m^{-2}); Ner, nitrogênio específico nos ramos ($15 \text{ mg N}_2 \text{ g}^{-1}_{\text{ramos}}$); e Nef, nitrogênio específico nas folhas ($2,5 \text{ g N}_2 \text{ m}^{-2}_{\text{folha}}$).

Nos casos em que o acúmulo diário de nitrogênio não seja suficiente para atender o desenvolvimento de nova área foliar e biomassa dos ramos, ocorrerá redução preferencial no nitrogênio dos ramos até um limite mínimo que deverá ser suprido pela redução de nova área foliar. Caso o nitrogênio fornecido pelas folhas seja ainda

insuficiente para a produção de nova biomassa dos ramos, ocorrerá então senescência das folhas como fonte de nitrogênio translocado.

2.4.5.2. Fase reprodutiva

Nesta fase o crescimento dos grãos apresenta prioridade para o nitrogênio disponível, sendo sua demanda diária obtida em função da concentração padrão de nitrogênio nos grãos e o aumento diário dos mesmos como discutido anteriormente. Quando ocorre produção de fotossintetizados além do necessário para suprir a demanda de nitrogênio dos grãos, o acúmulo adicional de nitrogênio pela planta é alocado preferencialmente nos ramos (SINCLAIR et al., 2003).

Quando a fixação de nitrogênio for inadequado para o crescimento potencial dos grãos, ocorre translocação de nitrogênio das partes vegetativas para os mesmos, dependendo da quantidade relativa de nitrogênio translocável em cada parte, induzindo mais ainda a senescência das folhas (SINCLAIR; DE WIT, 1976).

O conteúdo de água no solo controla a taxa de absorção de nitrogênio tanto na fase vegetativa como na reprodutiva (SINCLAIR, 1986; SINCLAIR et al., 2003). A taxa de acúmulo de nitrogênio será dependente de FATS, de acordo com Sinclair (1986) (equação 8).

$$NAC_w = NAC \cdot \left(\frac{2}{1 + \exp(-6 \cdot FATS)} \right) - 1 \quad (8)$$

em que NAC_w é o acúmulo de nitrogênio diário penalizado pela água ($\text{g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Considera-se ainda no modelo que sob condições de solo saturado ($FATS > 1$), a taxa de acúmulo de nitrogênio pela planta torna-se nulo devido à redução na aeração do solo (SINCLAIR et al., 2003). O efeito do excesso hídrico na soja depende da fase em que o mesmo ocorre, sendo mais prejudicial quando acontece durante a fase reprodutiva (SCOTT et al., 1989; SCHOEFFEL et al., 2001). Portanto, adotou-se no modelo uma penalização empírica devido o excedente de água no solo de acordo com Scott et al. (1989), em que considera uma redução de 18 e 26% na absorção de nitrogênio para antes e depois do florescimento ($\theta = 1$), respectivamente.

Entretanto, resultados de Becanamwo e Purcell (1999) mostraram que a suplementação de plantas de soja com adubação nitrogenada pode melhorar sua tolerância ao alagamento em relação aquelas que dependem exclusivamente da fixação biológica.

A redução na área foliar continuará até se atingir valores de IAF < 0,1, determinando então a ocorrência da maturação fisiológica (R7) (SINCLAIR, 1986).

2.4.6. Balanço de água

Este módulo simula tanto a evaporação do solo como a transpiração das plantas (RITCHIE, 1981). A fração de água transpirável do solo usado nas penalizações é calculada como a razão entre a quantidade atual de água transpirável (AT) e o total potencial de água transpirável do solo (TT).

O total potencial de água transpirável do solo é obtido em função do total de água disponível e a profundidade efetiva das raízes, que varia diariamente até a fase de início de enchimento de grãos ($\theta = 3$). A quantidade atual de água transpirável é reduzida diariamente pela evaporação e pela transpiração das plantas.

A evaporação potencial do solo é calculada pelo método de Penman, sendo a evaporação real obtida pela correção do grau de radiação interceptado pela cultura e que atinge o solo (equação 9) e em função do tempo desde o último evento de chuva (equação 10), seguindo o modelo de dois estágios de evaporação do solo de Ritchie (1972):

$$E_v = \frac{R_g \cdot \exp^{-k \cdot IAF} \cdot \Delta + \Delta e \cdot \gamma \cdot 0,4}{\Delta + \gamma} \quad (9)$$

em que E_v é a evaporação do solo (mm dia^{-1}); R_g , radiação solar incidente ($\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$); Δ , inclinação da curva de saturação ($\text{mb } ^\circ\text{C}^{-1}$); k , coeficiente de extinção da soja; e γ , coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

$$E_{v_{i+1}} = E_{v_i} \left(\sqrt{(D+1)} - \sqrt{(D)} \right) \quad (10)$$

em que D é o número de dias de ocorrência do segundo estágio de evaporação do solo.

Na versão atual do modelo, a transpiração da cultura é obtida de acordo com o método de Penman-Monteith aplicado para as resistências aerodinâmicas e da cultura (ALLEN et al., 1998). No modelo original a transpiração da cultura era obtida em função da produção de biomassa e do uso eficiente da água (SINCLAIR, 1986).

2.4.7. Validação do modelo

Os critérios estatísticos para análise da simulação do modelo foram o coeficiente de determinação (r^2), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o índice de concordância desenvolvido por Wilmott et al. (1985).

O r^2 representa o quanto da variação encontrada na variável Y é explicado pela regressão, quanto mais próximo da unidade estiver r^2 , melhor será a qualidade do ajuste do modelo de regressão, com isso o resíduo terá pouca influencia das causas aleatórias. Por outro lado, existe um problema em se utilizar este único parâmetro como um medidor do desempenho do modelo pelo fato de sua magnitude não estar coerentemente relacionada com a precisão da simulação, sendo em muitos casos considerado um parâmetro enganador mesmo apresentando altos valores, pois muitas vezes não está associado aos tamanhos das diferenças entre a observação e a previsão (WILMOTT, 1982).

O RMSE é de fácil interpretação desde que os valores observados (O_i) e simulados (P_i) estejam com as mesmas medidas escalares. Durante a validação, o RMSE assume um papel determinante como validador estatístico, pois informa o tamanho real do erro produzido pelo modelo, ao contrário dos coeficientes “ r e r^2 ” que podem mascarar os erros em função de estarem relacionados pelos desvios entre os valores observados e simulados, mesmo apresentando altos valores (WILMOTT, 1981). O RMSE é descrito conforme equação 11:

$$RMSE = \sqrt{\left(N^{-1} \cdot \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right)} \quad (11)$$

Por outro lado, o RMSE não esclarece as fontes ou tipos de erros a serem considerados caso haja necessidade de refinamento do modelo, ou seja, não informa quanto do erro produzido é sistemático e quanto do erro é não-sistemático (aleatório).

Para um melhor desempenho do modelo, os erros sistemáticos devem tender a zero e os erros não-sistemáticos devem se aproximar de RMSE (WILMOTT, 1982)

O índice de concordância, por sua vez, não é uma medida de correlação ou associação, mas uma razão do grau de exatidão com quais as simulações estão livres de erro. O “d” varia entre “0 e 1”, onde valores próximos a “1” indicam a perfeita concordância entre os valores observados e os valores simulados, e “0” conota uma série de completa discordância (WILMOTT et al., 1985), conforme equação (12):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (12)$$

em que P_i é o valor predito; O_i , valor observado; e \bar{O} , valor médio observado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Índice de área foliar (IAF)

Em todos os anos, os valores simulados de IAF foram muito próximos dos observados (Figura 2). Embora a curva descrita pelo modelo seja similar aos dados observados, após atingir os valores máximos, esta apresenta redução desses valores mais acentuadamente. Isto ocorre por se considerar uma taxa linear no aumento do índice de colheita durante esta fase, reduzindo de forma análoga a área foliar devido à translocação de assimilados para o grão (SPAETH; SINCLAIR, 1985). O máximo IAF simulado foi 7% superestimado em 2007 e foi subestimado em 16 e 10% em 2006 e 2008, respectivamente.

Isto sugere que o modelo subestima a área foliar na maior parte do ciclo sob condições úmidas, principalmente após o termino do crescimento foliar ($\theta = 2$), mas superestima durante condições mais secas. As estatísticas da análise de regressão entre os valores de IAF simulado e observado são mostrados na Tabela 4. Apesar da pequena discrepância, nota-se que o modelo apresenta boa precisão para todo o ciclo, com diferenças absolutas de no máximo 20% (Tabela 4).

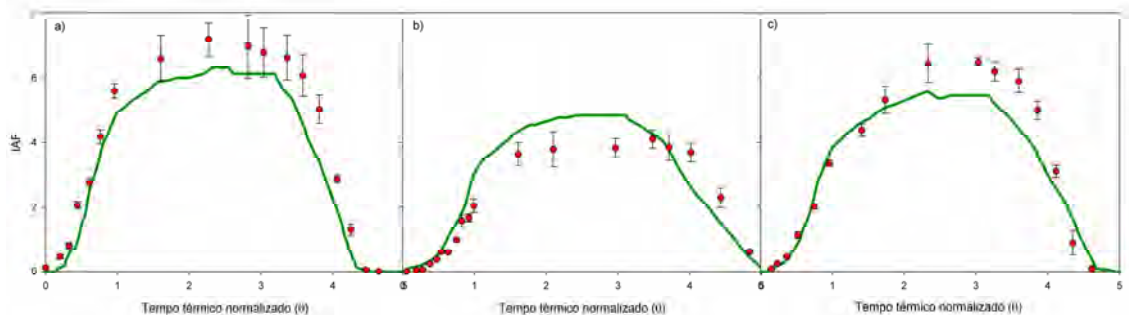


Figura 2 – Índice de área foliar simulado (linha contínua) e observado (pontos) (\pm SE) em 2006 (a), 2007 (b) e 2008 (c).

Tabela 4 – Estatísticas do Índice de área foliar simulado e observado

Ano	Índice de área foliar				
	\bar{O}	\bar{P}	Dif (%)	RMSE	d
2006	3,85 \pm 0,65	3,11 \pm 0,59	- 19	0,86	0,97
2007	1,78 \pm 0,35	2,01 \pm 0,39	+ 12	0,59	0,96
2008	3,19 \pm 0,62	2,86 \pm 0,52	- 10	0,71	0,97

$$Dif(\%) = (\bar{P} - \bar{O}) / \bar{O}.$$

Embora o modelo apresente tais características na simulação dos máximos IAFs, nota-se que o mesmo consegue reproduzir de forma satisfatória o índice de área foliar médio de todo o ciclo, apresentando elevados índices de concordância e baixos erros médios e RMSE (Tabela 3). A incorporação de modelos como este que simula a dinâmica da vegetação, por exemplo, em modelos de circulação geral da atmosfera como feito por Correia et al. (2006) poderia contribuir positivamente para a melhoria das simulações de impactos ambientais pela mudança do uso da terra já que muitos não levam em consideração esta evolução temporal.

3.2. Evapotranspiração da cultura (Etc)

O modelo simulou muito bem a evapotranspiração da cultura em 2006 e 2007, tanto para $IAF < 3$ como para $IAF > 3$ (Figura 3). As estatísticas da análise de regressão linear do valor previsto versus observado são apresentadas na Tabela 5. Os piores valores estatísticos ocorreram no ano de 2007, um ano mais seco, quando o modelo subestimou a evolução de Etc na maioria do tempo, principalmente durante a cobertura parcial do solo ($IAF < 3$), apresentando os maiores erros e os menores coeficientes de determinação e índice de concordância.

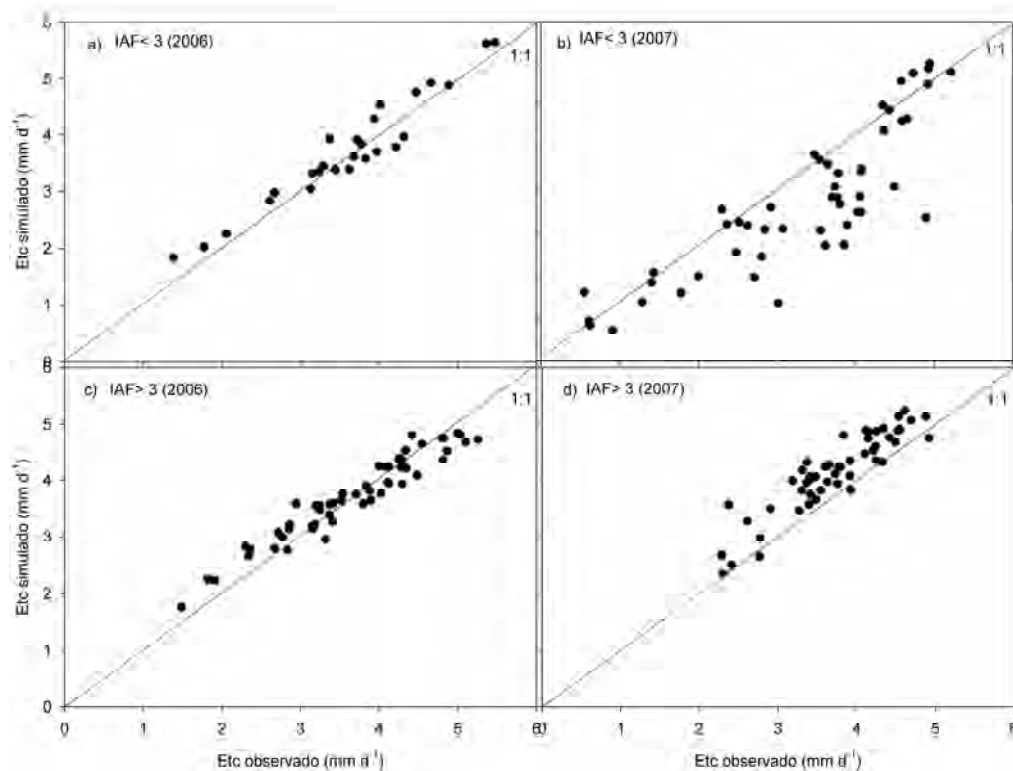


Figura 3 – Evapotranspiração da soja observada e simulada em 2006 e 2007 para diferentes IAFs.

Tabela 5 – Estatística do desempenho do modelo para a evapotranspiração da cultura

Condições	Parâmetros estatísticos							
	\bar{O} (mm)	\bar{P} (mm)	n	RMSE (mm)	d	a	b	R ²
2006 – LAI <3	3,61±0,19	3,72±0,19	26	0,28	0,98	0,33	0,94	0,93
2007 – LAI <3	3,32±0,18	3,37±0,12	50	0,68	0,88	1,43	0,58	0,73
2006 – LAI >3	3,66±0,12	3,72±0,09	55	0,27	0,97	0,79	0,79	0,93
2007 – LAI >3	3,71±0,09	4,14±0,09	51	0,52	0,87	0,63	0,94	0,83

\bar{O} = média observada; \bar{P} = média simulada; n = número de dados.

No entanto, o método de Penman-Monteith (PM) mostrou-se satisfatório na simulação da evapotranspiração, com bons resultados mesmo com a cobertura incompleta do solo (IAF < 3) (Figuras 3a e 3b). Uma provável causa para isso é que o modelo que simula a resistência do dossel usado na equação de PM foi obtido para condições de fechamento completo da soja (COSTA, 2008), gerando, portanto uma subestimativa desta resistência sob condições de dossel incompleto.

Com exceção da condição de cobertura incompleta em 2007, o modelo apresentou exatidão acima de 79% nos demais casos (coeficiente angular) e erros aditivos menores do que 1 (coeficiente linear), mostrando que o mesmo pode ser utilizado com elevado grau de confiança na simulação da evapotranspiração da soja na região Amazônica.

3.3. Matéria seca total da parte aérea

A matéria seca da parte aérea foi menor em 2007 do que nos outros anos devido à menor ocorrência de precipitação durante o ciclo da cultura (Figura 4). Em geral, o modelo simulou muito bem a matéria seca aérea com algumas discrepâncias na fase de enchimento de grãos em 2006 ($\theta = 3$). Uma comparação dos valores finais simulados e observados é apresentada na Tabela 6.

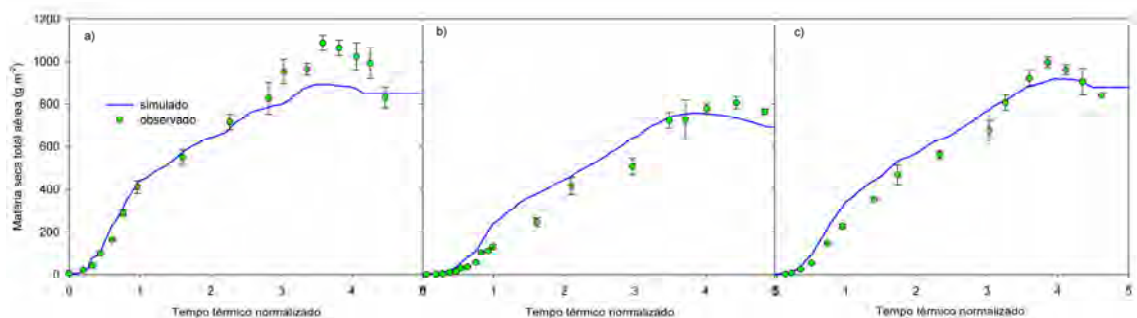


Figura 4 – Biomassa total da parte aérea da soja simulada e observada (\pm erro padrão) (g m^{-2}) em 2006 (a), 2007 (b) e 2008 (c).

Tabela 6 – Produção total de biomassa da parte aérea simulada e observada (\pm erro padrão) (g m^{-2}) na maturação fisiológica (R7)

Ano	Matéria seca (g.m^{-2})		
	\bar{O}	\bar{P}	Dif (%)
2006	830,09 (± 49)	848,82	+ 2
2007	764,84 (± 11)	692,97	- 9
2008	841,26 (± 6)	878,59	+ 4

$$\bar{O} = \text{media observada}; \bar{P} = \text{media simulada}; \text{Dif}(\%) = (\bar{P} - \bar{O}) / \bar{O}.$$

O modelo conseguiu reproduzir adequadamente a matéria seca total na maturação nos anos analisados, e mais do que isso conseguiu simular a redução na produção de biomassa em função da diminuição na disponibilidade de água ocorrida em 2007. Os erros absolutos encontrados variaram entre -9 e +4, indicando boa concordância do modelo com os dados observados (Tabela 6).

Um detalhe importante no modelo foi a introdução do efeito do aumento da nebulosidade na eficiência do uso da radiação (ANDERSON et al., 2000), fazendo com o que em anos mais chuvosos, consequentemente mais nublados, a soja aumente sua eficiência no uso da radiação pelo aumento da componente difusa. Tal processo

contribuiu para o aperfeiçoamento na simulação entre os anos estudados, como observado na Tabela 6.

Uma simulação adequada da produção de matéria seca permite a estimativa do seqüestro de carbono ao longo do ciclo da cultura e contribui para avaliar o impacto ambiental das mudanças no uso da terra na Amazônia. Entretanto, embora exista uma importante alocação de biomassa para as raízes (CASSMAN et al., 1980), espera-se que a maior parte do carbono seqüestrado seja devolvido à atmosfera através da decomposição da cobertura morta e do consumo de grãos após a colheita (BERNACHI et al., 2005).

3.4. Rendimento da soja

O modelo simulou muito bem, tanto a biomassa seca dos grãos durante a fase de enchimento como também a produtividade final (Figura 5). Em 2006, o modelo ligeiramente subestimou a evolução da produção de matéria seca do grão, mas seus valores estiveram próximos do erro padrão observado. Nos outros anos o crescimento dos grãos foi simulado com precisão, apesar dos pequenos erros na simulação da matéria seca e do índice de área foliar discutidos anteriormente.

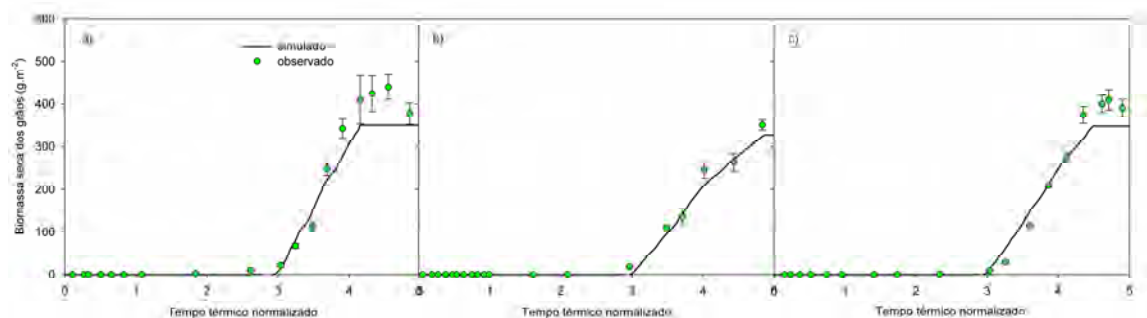


Figura 5 – Biomassa dos grãos da soja simulada e observada (\pm erro padrão) (g m^{-2}) em 2006 (a), 2007 (b) e 2008 (c).

Uma possível causa para a subestimativa em anos chuvosos (2006 e 2008) e superestimativa em anos secos (2007) pode estar associada à penalização imposta no balanço de nitrogênio devido ao alagamento do solo ($\text{FATS} > 1$). Com isso, a

quantidade de nitrogênio absorvida diariamente pela fixação biológica estaria ocorrendo em uma taxa menor em anos com condições mais úmidas. Com a redução do conteúdo de nitrogênio presente na planta, espera-se que ocorra uma redução na produção de biomassa e na produtividade final uma vez que durante o crescimento dos grãos existe a translocação de nitrogênio e assimilados do material vegetativo para os mesmos (SINCLAIR; DE WIT, 1976).

No entanto, Becanamwo e Purcell (1999) encontraram que no caso da soja, a aplicação de adubação nitrogenada torna-a menos sensível ao excesso de água do que quando se considera a fixação biológica como única fonte de nitrogênio para a planta. Nestas condições o nitrato proveniente da adubação é usado como alternativa à falta de oxigênio agindo como um acceptor de elétrons pelas raízes submetidas a alagamento. Em todos os experimentos, houve suplementação com 350 kg ha^{-1} de fertilizante químico (N-P-K), o que pode ter amenizado o efeito de possíveis alagamentos, mas que infelizmente não é considerado na simulação.

Por outro lado, o modelo conseguiu reproduzir muito bem o efeito da redução de água tanto na produção de biomassa como no rendimento da soja. Os menores valores simulados ocorreram em condições de menor disponibilidade de água (2007), concordando com os valores observados em campo. Entretanto, o efeito do déficit hídrico não foi tão significativo na simulação do rendimento final dos grãos, chegando a 3273 kg.m^{-2} em 2007, e 3504 e 3479 kg.m^{-2} em 2006 e 2008 respectivamente.

Isto pode ter ocorrido pelo fato da menor área foliar simulada em 2007 (Figura 2) ter diminuído a taxa de evapotranspiração, principalmente na fase de máximo consumo de água, mantendo tanto a retirada de água do solo como a taxa de fixação de nitrogênio a níveis satisfatórios não comprometendo o rendimento final simulado (MUCHOW; SINCLAIR, 1986).

Introduzindo todos os dados disponíveis de rendimento da soja, incluindo os 12 experimentos extras, observou-se que o rendimento final de grãos simulado esteve muito próximo dos valores observados (Figura 6). As condições meteorológicas observadas nestes experimentos foram bastante diferentes, o que resultou em um intervalo de rendimentos observados bem variado para a validação do modelo (3.168 - 3.984 kg.m^{-2})

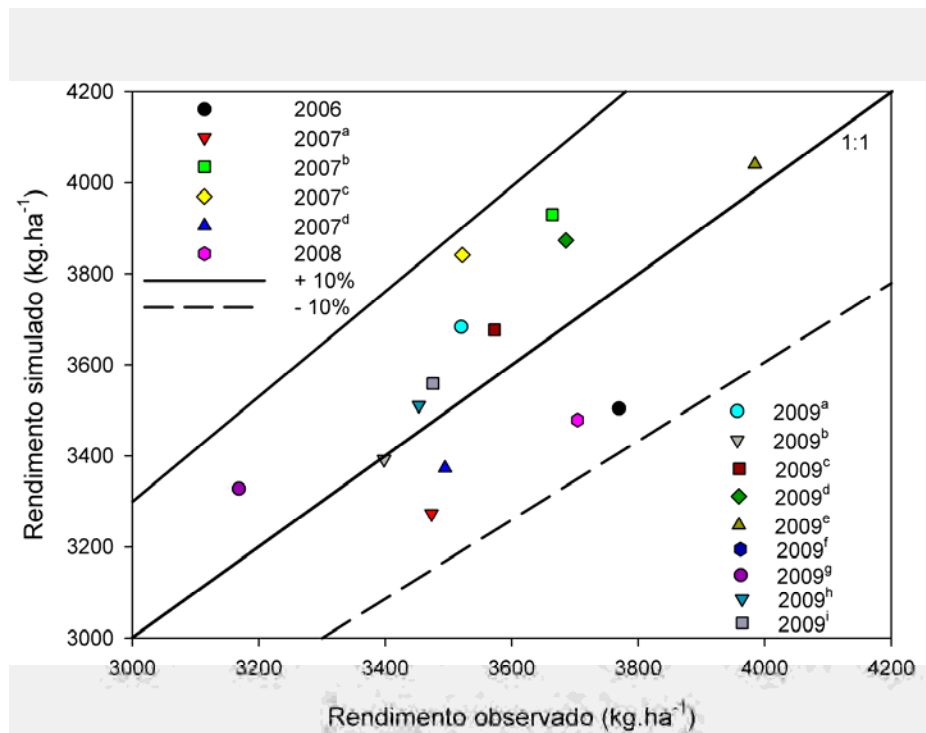


Figura 6 – Produtividade final da soja simulada versus observada (kg ha^{-1}).

Em todos os casos o erro absoluto dos valores simulados esteve dentro do intervalo de $\pm 10\%$ comumente considerado na simulação do rendimento da soja na América do Sul (FONTANA et al., 2001; FERREIRA et al., 2007, MERCAU et al., 2007). As estatísticas que mostram o bom desempenho do modelo em simular o rendimento final são mostradas na Tabela 7. O índice de concordância de 0,86 corrobora esta afirmação. O rendimento médio final simulado pelo modelo apresentou uma pequena diferença em relação aos valores observados.

Tabela 7 – Rendimento da soja simulado e observado (\pm erro padrão) (kg ha^{-1})

Todos os dados	Rendimento ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)				
	\bar{O}	\bar{P}	Dif (%)	RMSE	d
	3498,11 (± 80)	3563,38 (± 73)	+ 1	203,02	0,86

De forma geral, os resultados mostraram que a versão modificada do modelo de Sinclair (1986) e Sinclair et al. (2003) simulou satisfatoriamente o crescimento e o rendimento da soja nas condições climáticas da Amazônia. Logo, o modelo pode vir a auxiliar os agricultores, por exemplo, na definição da melhor época de semeadura da soja, já que por coincidir com o início do período chuvoso, acaba tendo sua colheita ainda dentro do período chuvoso em função do regime de chuvas existente na região.

4. CONCLUSÕES

A versão modificada do modelo de Sinclair apresentou ótimo desempenho na simulação da evapotranspiração da soja, e principalmente na produção de área foliar, biomassa total e rendimento final nas condições climáticas da Amazônia.

Os resultados apresentados mostram que o modelo conseguiu reproduzir satisfatoriamente a evolução temporal da área foliar e da produção de biomassa da cultura da soja em função das diferentes condições climáticas ocorridas nos anos agrícolas estudados.

Apesar de o modelo simular muito bem a evapotranspiração da soja, há a necessidade de se melhorar este processo durante as fases de fechamento incompleto do dossel.

Por outro lado, a validação do modelo mostrou que a simulação do rendimento da soja apresentou baixíssimos erros, com diferenças em relação aos dados observadas menores que 10%.

O modelo encontra-se parametrizado, calibrado e validado para as condições climáticas da Amazônia, e pode ser usado como ferramenta de apoio aos agricultores na tomada de decisões bem como ferramenta de ensino nas instituições de ensino de ciências agrárias da região.

Além disso, o modelo mostrou ser útil para usos futuros na simulação de impactos ambientais, principalmente quando acoplado a outros modelos como os de esquema de transferência biosfera-atmosfera.

5. REFERÊNCIAS

AL-KAISI, M. M.; YIN, X. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn–soybean rotations. **Journal of Environmental Quality**, v. 34, p. 437-445, 2005.

ALBERTO, C. M.; STRECK, N. A.; HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; MEDEIROS, S. L. P. Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 7, p. 1067-1075, 2006.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; FERNANDES, F. M.; HECKLER, J. C.; MACEDO, R. A. T.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S. Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 3, p. 449-456, 2006.

AMIR, J.; SINCLAIR, T. R. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. **Field Crops Research**, v. 29, p. 59-96, 1991.

ANDALES, A. A.; BATCHELOR, W. D.; ANDERSON, C. E.; FARNHAM, D. E.; WHIGHAM, D. K. Incorporating tillage effects into a soybean model. **Agricultural System**, v. 66, p. 69-98, 2000.

ANDERSON, M. C.; NORMAN, J. M.; MEYERS, T. P.; DIAK, G. R. An analytical model for estimating canopy transpiration and carbon assimilation fluxes based on canopy light-use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 101, p. 265-289, 2000.

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. New York: Academic Press, 1998, 307 p.

BECANAMWO, M.; PURCELL, L. C. Soybean dry matter and N accumulation responses to flooding stress, N sources and hypoxia. **Journal of Experimental Botany**, v. 50, n. 334, p. 689-696, 1999.

BENCHIMO, R. L.; EL-HUSNY, J. C.; FILHO, A. S.; BARRIGA, J. P. **A mela da soja no estado do Pará nas safras de 2003 e 2005**. Belém: Embrapa-CPATU, 2005. 4p. Comunicado Técnico, 152.

BENINCASA, M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. Jaboticabal: Funep, 2003. 41 p

BERNACCHI, C. J.; HOLLINGER, S. E.; MEYERS, T. The conversion of the corn/soybean ecosystem to no-till agriculture may result in a carbon sink. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1867-1872, 2005.

BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth. CROPGRO-soybean model. In: PEART, R. M.; CURRY, R. B. (Eds.). **Agricultural systems modeling and simulations**. New York: Marcel Dekker, 1998. p. 1-42.

CASSMAN, K. G.; WHITNEY, A. S.; STOCKINGER, K. R. Root growth and dry matter distribution of soybean as affected by phosphorus stress, nodulation, and nitrogen source. **Crop Science**, v. 20, p. 239-244, 1980.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos-safra 2008/2009**. Brasília, 2009. 39 p.

CORREIA, F. W. S.; ALVALÁ, R. C. S.; MANZI, A. O. Impacto das modificações da cobertura vegetal no balanço de água na Amazônia: um estudo com modelo de circulação geral da atmosfera (MCGA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 153-167, 2006.

COSTA, J. P. R. **Modelagem e simulação das interações biosfera-atmosfera em plantio de soja na Amazônia**. 2008. 127 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

COSTA, M. H.; YANAGY, S. M. N.; PONTE DE SOUZA, P. J. O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 34, 2007.

COSTA, L. C.; JUSTINO, F.; OLIVEIRA, L. J.; SEDIYAMA, G. C.; FERREIRA, W. P. M.; LEMOS, C. F. Potential forcing of CO₂, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. **Environmental Research Letter**, v. 4, 2009.

DANTAS, T. M.; FONTELES, L. V. **Avanço da fronteira agrícola na Amazônia**. Disponível em: <<http://www.oktiva.net/sispub/anexo/9168>>. Acesso em: 15 out. 2006.

DE MELO-ABREU, J. P.; ABREU, F. M.; CAMPBELL, G. S. Assimilate partitioning in spring wheat under Mediterranean conditions. In: MONTEITH, J. L.; SCOTT, R. K. **Resource capture by crops**. Unsworth: Nottingham University Press, 1994. p. 387-388.

DOGAN, E.; KIRNAK, H.; COPUR, O. Deficit irrigations during soybean reproductive stages and CROPGRO-soybean simulations under semi-arid climatic conditions. **Field Crops Research**, v. 103, p. 154-159, 2007.

EL-HUSNY, J. C.; ANDRADE, E. B.; SOUZA, F. R. S.; FILHO, A. S.; KEPLER, D.; ALMEIDA, L. A.; MEYER, M. C. **Recomendação de cultivares de soja para microrregião de Paragominas, Pará**. Belém: Embrapa-CPATU, 2003a. 6 p. (Comunicado técnico, 82).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja**: região Central do Brasil. Brasília, 2008. 282 p. (Sistemas de produção, 12).

FEARNSIDE, P. M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, v. 28, n. 1, p. 23-28, 2001.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Iowa State University, 1977. (Special Report, 80).

FERREIRA, M. E.; ABREU, J. P. M.; BIANCO, V. V.; MONTEIRO, A. Predicting phasic development of green beans for processing using a model with high temperature reduction of thermal time accumulation. **Scientia Horticulturae**, v. 69, p. 123-133, 1997.

FERREIRA, W. P. M.; COSTA, L. C.; SOUZA, C. F. Teste de um modelo agrometeorológico para estudo da influência da variabilidade climática na cultura da soja. **Revista Ceres**, v. 54, n. 312, p. 206-213, 2007.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; LAUSCHER, M. H.; DE MELLO, R. W. Modelo de estimativa de rendimento de soja no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 3, p. 399-403, 2001.

JAMIESON, P. D.; SEMONOV, M. A. Modelling nitrogen uptake and redistribution in wheat. **Field Crops Research**, p. 68, p. 21-29, 2000.

KANTOLIC, A.G.; MERCAU, J. L.; SLAFER, G. A.; SADRAS, V. O. Simulated yield advantages of extending post-flowering development at the expense of a shorter pre-flowering development in soybean. **Field Crops Research**, v. 101, p. 321-330, 2007.

MARCELIS, L. F. M.; HEUVELINK, E.; GOUDRIAN, J. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. **Scientia Horticulturae**, v. 74, p. 83-111, 1998.

MERCAU, J. L.; DARDANELLI, J. L.; COLLINO, D. J.; ANDRIANI, J. M.; IRIGOYEN, A.; SATORRE, E. H. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. **Field Crops Research**, v. 100, p. 200-209, 2007.

MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. Series B, Biological Sciences, v.281, p.277-294, 1977.

- MUCHOW, R. C.; SINCLAIR, T. R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. II. Field and model analyses. **Field Crop. Res.**, v. 15, p. 143-156, 1986.
- MUCHOW, R. C.; SINCLAIR, T. R. Water deficit effects on maize yields modeled under current and "Greenhouse" climates. **Agronomy Journal**, v. 83, p. 1052-1059, 1991.
- PAUSTIAN, K.; ANDRÉN, O.; JANZEN, H. H.; LAL, R.; SMITH, P.; TIAN, G.; TIESSEN, H.; VAN NOORDWIJK, M.; WOOMER, P. L. Agricultural soil as a sink to mitigate CO₂ emissions. **Soil Use and Management**, v. 13, p. 230-244, 1997.
- PENNING DE VRIES, F. W. T.; TIMSINA, J.; ALAGOS, M. J. C.; VELASCO, L.; PANDEY, R. K. Opportunities for soya beans after rice in the Philippines: an exploration by simulation. 1992. (CABO-DLO, Simulation Report, 25).
- PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141-150, 1999.
- RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.
- RITCHIE, J. T. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. **Plant and Soil**, v. 58, p. 81-96, 1981.
- SALADO-NAVARRO, L. R.; HINSON, K.; SINCLAIR, T. R. Nitrogen partitioning and dry matter allocation in soybeans with different seed protein concentration. **Crop Sci.**, v. 25, p. 451-455, 1985.
- SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M. H.; SATYAMURT, P.; SOARES-FILHO, B. S.; CARDOSO, M. F. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letter**, v. 34, p. 1-7, 2007.
- SAUERBECK, D. R. CO₂ emissions and C sequestration by agriculture – perspective and limitations. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 60, p. 253-266, 2001.
- SCHOFFEL, E. R.; SACCOL, A. V.; MANFRON, P. A.; MEDEIROS, S. L. P. Excesso hídrico sobre os componentes de rendimento da cultura da soja. **Ciência Rural**, v. 32, n. 1, p. 7-72, 2001.
- SCOTT, H. D.; DEANGULO, J.; DANIELS, M. B. et al. Flood duration effects on soybean growth and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 631-636, 1989.
- SINCLAIR, T. R. Leaf area development in field-grown soybeans. **Agronomy Journal**, v. 76, p. 141-146, 1983.

- SINCLAIR, T. R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. I. Model development. **Field Crops Research**, v. 15, p. 125-141, 1986.
- SINCLAIR, T. R.; DE WIT, C. T. Analysis of the carbon and nitrogen limitations to soybean yield. **Agronomy Journal**, v. 68, p. 320-325, 1976.
- SINCLAIR, T. R.; LUDLOW, M. M. Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. **Aust. J. Plant Physiol.**, v. 13, p. 329-421, 1986.
- SINCLAIR, T. R.; HORIE, T. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. **Crop Science**, v. 29, p. 90-98, 1989.
- SINCLAIR, T. R.; AMIR, J. A model to assess nitrogen limitations on the growth and yield of spring wheat. **Field Crops Research**, v. 30, p. 63-78, 1992.
- SINCLAIR, T. R.; SALADO-NAVARRO, L. R.; MORANDI, E. N.; BODRERO, M. L.; MARTINGNONE, R. A. Soybean yield in Argentina in response to weather variation among cropping seasons. **Field Crops Research**, v. 30, p. 1-11, 1992b.
- SINCLAIR, T. R.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Modeling nitrogen accumulation and use by soybean. **Field Crops Research**, v. 81, p. 149-158, 2003.
- SINCLAIR, T. R.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L. Comparison of vegetative development in soybean cultivars for low-latitude environments.. **Field Crops Research**, v. 92, p. 53-59, 2005.
- SINCLAIR, T. R.; SALADO-NAVARRO, L. R.; SALAS, G.; PURCELL, L. C. Soybean yields and soil water status in Argentina: Simulation analysis. **Agricultural Systems**, v. 94, p. 471-477, 2007.
- SOUZA, P. J. O. P.; ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, A.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C. Impactos no albedo em consequência do avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, n. 1, p. 87-95, 2008a.
- SPAETH, S. C.; SINCLAIR, T. R. Linear increase in soybean harvest index during seed-filling. **Agronomy Journal**, v. 77, p. 207-211, 1985.
- SPAETH S. C.; SINCLAIR, T. R.; OHNUMA, T.; KONNO, S. Temperature, radiation, and duration dependence of high soybean yields: measurement and simulation. **Field Crop Res.**, v. 16, p. 297-307, 1987.
- STRECK, N.A.; ALBERTO, C. M. Estudo numérico do impacto da mudança climática sobre o rendimento de trigo, soja e milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 9, p. 1351-1359, 2006.

WEST, T. O.; MARLAND, G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. **Agricultural, Ecosystems and Environment**, v. 91, p. 217-232, 2002.

WILMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

WILMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 3, n. 7, p. 1309-1313, 1982.

WILMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

WOLF, J. Comparison of two soya bean simulation models under climate change. I. Model calibration and sensitivity analyses. **Climate Research**, v. 20, p. 55-70, 2002.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Objetivou-se neste trabalho de tese estudar o comportamento agrometeorológico e micrometeorológico da soja cultivada em condições naturais de campo na região Amazônica. Este trabalho surgiu da necessidade de compreender as respostas desta cultura às condições climáticas da região Amazônica, e também pela necessidade de avaliar quais os possíveis impactos decorrentes deste novo modelo de uso da terra na região sob alguns parâmetros meteorológicos: Balanço de radiação e energia.

Apesar de muitos trabalhos já terem sido realizados sobre o uso da terra na Amazônia, e de existirem muitos resultados sobre o comportamento agrônomo da soja no Brasil, são escassas as informações sobre os processos biofísicos gerados neste ecossistema na Amazônia assim como dos efeitos do clima desta região na produtividade desta cultura.

O experimento foi realizado durante os anos de 2006, 2007 e 2008 no município de Paragominas, localizado na região nordeste do estado do Pará pelo fato desta região ter apresentado uma rápida expansão do monocultivo da soja nos últimos anos. Dados referentes a um ecossistema florestal foram utilizados nas discussões e foram obtidos na floresta nacional de Caxiuanã, localizado no setor central do estado do Pará.

A análise do crescimento e rendimento da soja apresentado no capítulo 1 mostrou que a presença de um moderado estresse hídrico ocorrido no experimento de 2007 ocasionou uma redução no índice de área foliar (IAF) e na produção de matéria

seca da parte aérea em comparação com o ano de 2008. Entretanto, apesar das diferenças encontradas no IAF e biomassa entre os anos, o rendimento final não foi muito diferente, supostamente por uma compensação ocasionada pela suficiente fixação de nitrogênio em 2007 para suprir a demanda dos grãos.

No capítulo 2 analisou-se a exigência térmica da soja, a qual demonstrou ser sensível a elevadas temperaturas aumentando seu ciclo com o aumento da temperatura do ar. A inclusão do efeito redutivo de elevadas temperaturas mostrou ser um método bastante eficiente para as condições térmicas da Amazônia reduzindo de 4,7 para 2,3 dias o erro (RMSE) na determinação da maturação fisiológica da soja.

O estudo da exigência hídrica da soja apresentado no capítulo 3 mostrou um consumo máximo de água durante o período reprodutivo, com valor médio de 4,1 mm dia⁻¹ durante o enchimento de grãos. Este valor foi inferior aos já reportados em outros trabalhos no Brasil e pode ter sido causado pela inibição na produção de área foliar a qual limitou a perda de água neste valor mesmo havendo água e energia disponíveis.

Os capítulos 4 a 7 apresentam o comportamento radiativo e energético ao longo do ciclo da soja e os resultados mostraram que o monocultivo da soja na Amazônia ocasiona uma alteração na interação entre a radiação e a superfície, tendo como consequência uma redução na energia disponível ao longo do ciclo devido o aumento contínuo no albedo da superfície e na emissão de ondas longas em função da evolução do IAF. Durante o fechamento incompleto do dossel a soja intercepta mais radiação durante dias nublados mesmo com menor radiação incidente, sugerindo a importância da componente difusa neste processo.

A soja utilizou mais energia na forma de calor latente, em especial entre as fases de florescimento e enchimento de grãos em função de sua elevada condutância estomática. Maior parte da energia é direcionada para a evapotranspiração, havendo uma redução no fluxo de calor latente próximo da maturação, devido o redirecionamento da energia para a componente H. A eficiência com que a soja usa a radiação e a transforma em biomassa (EUR) foi afetada pelas condições climáticas locais, havendo uma redução neste valor no ano de 2007 devido ao efeito combinado da temperatura e DPV com o déficit hídrico. Por outro lado, em anos normais a EUR foi superior aos valores encontrados na literatura provavelmente como efeito do aumento na componente difusa da radiação incidente durante este período nesta região.

O estudo dos impactos gerados no balanço de radiação e energia pela soja (capítulos 8 a 10) mostrou que o contínuo aumento no albedo da superfície ocasionou

uma redução no saldo de radiação em relação ao normalmente observado na floresta. Durante o ciclo da cultura ocorre um impacto negativo de 16,6% no saldo de radiação e de 15,5% durante a entressafra. No entanto, mesmo com menos energia disponível, observou-se impactos positivos no fluxo de calor latente até antes da fase de grão cheio da soja devido a elevada condutância estomática da cultura. Por outro lado, ocorre um impacto negativo significativo em LE e um aumento considerável em H durante o período da entressafra devido à ausência de cobertura vegetal.

No capítulo 11 avaliou-se a simulação do crescimento e rendimento da soja por meio da versão modificada do modelo de Sinclair (1986) e Sinclair et al. (2003) o qual apresentou ótimo desempenho na simulação da evapotranspiração da soja, e principalmente na produção de área foliar, biomassa total e rendimento final nas condições climáticas da Amazônia. A validação do modelo mostrou que a simulação do rendimento da soja apresentou baixíssimos erros, com diferenças em relação aos dados observadas menores que 10%. O modelo encontra-se parametrizado, calibrado e validado para as condições climáticas da Amazônia, e pode ser usado como ferramenta de apoio aos agricultores na tomada de decisões bem como ferramenta de ensino nas instituições de ensino de ciências agrárias da região.

Recomendações e trabalhos futuros

Baseado nos resultados encontrados sugere-se analisar o uso de outras culturas economicamente viáveis durante o período da entressafra na região a fim de se tentar avaliar se há redução nos impactos causados logo após a colheita da soja.

Sugere-se aos modeladores a melhoria na calibração dos modelos climáticos em função dos resultados encontrados na cadeia de produção de soja na região a fim de se melhorar os estudos sobre impactos pela mudança do uso da terra na Amazônia.

Diante da necessidade de se estreitar a relação entre as diversas áreas de conhecimento, sugere-se o acoplamento do modelo de produção e rendimento utilizado com outros modelos de transferência biosfera-atmosfera como, por exemplo, o utilizado por Costa (2008), calibrado para o mesmo tipo de ecossistema.

O modelo de rendimento da soja deve ser melhorado a fim de possa estar adequado para estudos futuros sobre impactos das mudanças climáticas, além de adaptá-lo para outras culturas similares comercialmente produzidas na região como o feijão caupi.

REFERÊNCIAS

AL-KAISI, M. M.; YIN, X. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn–soybean rotations. **Journal of Environmental Quality**, v. 34, p. 437-445, 2005.

ALBERTO, C. M.; STRECK, N. A.; HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; MEDEIROS, S. L. P. Água no solo e rendimento do trigo, soja e milho associados ao El Niño Oscilação Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 7, p. 1067-1075, 2006.

ALBRIZIO, R.; STEDUTO, P. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea I. Radiation use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 130, p. 254-268, 2005.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALTON, P. B.; NORTH, P. R.; LOS, S. O. The impact of diffuse sunlight on canopy light-use efficiency, gross photosynthetic product and net ecosystem exchange in three forest biomes. **Global Change Biology**, v. 13, p. 776-787, 2007.

ALVALÁ, R. C. S.; CORREIA, F. W. S.; MANZI, A. O. Modelagem dos impactos das mudanças da cobertura da terra na Amazônia: avaliação do balanço de radiação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2007. p. 6573-6570.

ALVES, F. S. M.; FISCH, G.; VENDRAME, I. F. Modificações do microclima e regime hidrológico devido ao desmatamento na Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 29, p. 395-409, 1998.

ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; FERNANDES, F. M.; HECKLER, J. C.; MACEDO, R. A. T.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S. Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 3, p. 449-456, 2006.

AMIR, J.; SINCLAIR, T. R. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. **Field Crops Research**, v. 29, p. 59-96, 1991.

ANDALES, A. A.; BATCHELOR, W. D.; ANDERSON, C. E.; FARNHAM, D. E.; WHIGHAM, D. K. Incorporating tillage effects into a soybean model. **Agricultural System**, v. 66, p. 69-98, 2000.

ANDERSON, M. C.; NORMAN, J. M.; MEYERS, T. P.; DIAK, G. R. An analytical model for estimating canopy transpiration and carbon assimilation fluxes based on canopy light-use efficiency. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 101, p. 265-289, 2000.

ANDERSON, L. O.; ROJAS, E. H. M.; SHIMABUKURO, Y. E. Avanço da soja sobre os ecossistemas cerrado e floresta no Estado do Mato Grosso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 19-25.

ANDRADE, F.H.; UHART, S.A.; CIRILO, A. Temperature affects radiation use efficiency in maize. **Field Crops Research**, v. 32, p. 17-25, 1993.

ANDRE, R.G. B.; VISWANADHAM, Y. Distribuição de energia numa cultura de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 1, p. 29-37, 1986.

ARKEBAUER, T.J.; WEISS, A.; SINCLAIR, T.R.; BLUM, A. In defense of radiation use efficiency: a response to Demetraides-Shah et al. (1992). **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 68, p. 221-227, 1994.

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. New York: Academic Press, 1998. 307 p.

AVISSAR, R.; SILVA DIAS, P. L.; SILVA DIAS, M. A. F.; NOBRE, C. The large-scale biosphere-atmosphere experiment in Amazônia (LBA): insights and future research needs. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 20, p. 54.1-54.6, 2002.

BALDOCHI, D. D.; VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J. Water use efficiency in a soybean field: influence of plant water stress. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 34, p. 53-65, 1985.

BARNI, N. A.; COSTA, J. A. Efeitos de períodos de inundação do solo sobre o rendimento de grãos de soja. **Agronomia Sulriograndense**, v. 11, p. 207-222, 1975.

BECANAMWO, M.; PURCELL, L. C. Soybean dry matter and N accumulation responses to flooding stress, N sources and hypoxia. **Journal of Experimental Botany**, v. 50, n. 334, p. 689-696, 1999.

BENCHIMO, R. L.; EL-HUSNY, J. C.; FILHO, A. S.; BARRIGA, J. P. **A mela da soja no estado do Pará nas safras de 2003 e 2005**. Belém: Embrapa-CPATU, 2005. 4 p. (Comunicado Técnico, 152).

BENINCASA, M. P. **Análise de crescimento de plantas (noções básicas)**. Jaboticabal: Funep, 2003. 41 p

BERBET, M. L. C.; COSTA, M. H. Climate change after tropical deforestation: seasonal variability of surface albedo and its effects on precipitation change. **Journal of Climate**, v. 16, p. 2099-2104, 2003.

BERLATO, M. A.; MATZENUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja, relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação de tanque “classe A” e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p. 243-259, 1986.

BERNACCHI, C. J.; HOLLINGER, S. E.; MEYERS, T. The conversion of the corn/soybean ecosystem to no-till agriculture may result in a carbon sink. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1867-1872, 2005.

BETTS, A. K.; DESJARDINS, R. L.; WORTH, D. Impact of agriculture, forest and cloud feedback on the surface energy budget in BOREAS. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 142, p. 156-169, 2007.

BLACK, C.; ONG, C. Utilization of light and water in tropical agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 104, p. 25-47, 2000.

BLAD, B. L.; BACKER, D. G. Reflected radiation from a soybean crop. **Agronomy Journal**, v. 64, p. 277-280, 1972.

BONHOMME, R. Bases and limits to using “degree.day” units. **European Journal of Agronomy**, v. 13, p. 1-10, 2000.

BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G. Simulation of crop growth. CROPGRO-soybean model. In: PEART, R. M.; CURRY, R. B. (Eds.). **Agricultural systems modeling and simulations**. New York: Marcel Dekker, 1998. p. 1-42.

BROWN, E. A.; CAVINESS, C. E.; BROWN, D. A. Response of selected soybean cultivars to soil moisture deficit. **Agron. J.**, v. 77, p. 274-278, 1985.

BRUNINI, O.; LISBÃO, R. S.; BERNARDI, J. B.; FORNASIER, J. B.; PEDRO JUNIOR, M. J. Temperatura-base para alface cultivar “White Boston”, em um sistema de unidades térmicas. **Bragantia**, v. 35, p. 215-219, 1976.

CAMARA, G. M. S.; SEDIYAMA, T.; DOURADO-NETO, D.; BERNARDES, M. S. Influence of photoperiod and air temperature on the growth, flowering and maturation of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). **Scientia Agricola**, v. 54, p. 149-154, 1997.

CAMARGO, M. B. P.; BRUNINI, O.; MIRANDA, M. A. C. Temperatura-base para cálculo dos graus-dia para cultivares de soja em São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 2, p. 115-121, 1987.

CARSWELL, F. E.; COSTA, A. C. L.; PALHETA, M.; MALHI, Y.; MEIR, P.; COSTA, J. P. R.; RUIVO, M. L.; LEAL, L. S. M.; COSTA, J. M. N.; CLEMENT, R. J.; GRACE, J. Seasonality in CO₂ and H₂O flux at an eastern Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 20, p. 1-16, 2002.

CASSMAN, K. G.; WHITNEY, A. S.; STOCKINGER, K. R. Root growth and dry matter distribution of soybean as affected by phosphorus stress, nodulation, and nitrogen source. **Crop Science**, v. 20, p. 239-244, 1980.

CESARACCIO, C.; SPANO, D.; DUCE, P.; SNYDER, R. L. An improved model for determining degree-day values from daily temperature data. **International Journal of Biometeorology**, v. 45, p. 161-169, 2001.

CHEN, S.; CHEN, J.; LIN, G.; ZHANG, W.; MIAO, H.; WEI, L.; HUANG, J.; HAN, X. Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 129, p. 1800-1809, 2009.

COBER, E. R.; STWEART, D. W.; VOLDENG, H. D. Photoperiod and temperature responses in early-maturing, near-isogenic soybean lines. **Crop Science**, v. 41, p. 721-727, 2001.

COHEN, J. C. P.; BELTRÃO, J. C.; GANDU, A. W.; SILVA, R. R. Influência do desmatamento sobre o ciclo hidrológico da Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 36-39, 2007.

COHENCA, D. **A expansão da fronteira agrícola e sua relação com o desmatamento detectado em imagens de Landsat TM ETM+ na região norte da BR-163, Pará entre os anos de 1999 a 2004**. 2005. Monografia (Pós-Graduação em Gestão e Manejo Ambiental em Sistemas Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

COLLINO, D.J.; DARDANELLI, J.L.; SERENO, R.; RACCA, R.W. Physiological response of Argentine peanut varieties to water stress. Light interception, radiation use efficiency and partitioning of assimilates. **Field Crops Research**, v. 70, p. 177-184, 2001.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Central de informações agropecuárias**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/index.php?PAG=101>>. Acesso em: 21 set. 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos-safra 2008/2009**. Brasília, 2009. 39 p.

CONFALONE, A.; DUJMOVICH, M.N. Influência do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, p. 183-187, 1999.

CONFALONE, A.E.; NAVARRO, M.D. Influencia do déficit hídrico sobre a eficiência da radiação solar em soja. **Revista Brasileira de Agrocência**, v. 5, n. 3, p. 195-198, 1999.

CONFALONE, A.E.; COSTA, L.C.; PEREIRA, C.R. Crescimento e captura de luz em soja sob estresse hídrico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, p. 165-169, 1998.

CORREIA, F. W. S.; ALVALÁ, R. C. S.; MANZI, A. O. Impacto das modificações da cobertura vegetal no balanço de água na Amazônia: um estudo com modelo de circulação geral da atmosfera (MCGA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 153-167, 2006.

CORREIA, F. W. S.; MANZI, A. O.; CANDIDO, L. A.; SANTOS, R. M. N.; PAULIQUEVIS, T. Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 39-43, 2007.

COSTA, J. P. R. **Modelagem e simulação das interações biosfera-atmosfera em plantio de soja na Amazônia**. 2008. 127 p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia. **J. Clim.**, v. 13, p. 18-34, 2000.

COSTA, J. A.; TEIXEIRA, M. C. C.; MARCHEZAN, E. Taxa e duração do acúmulo de matéria seca nos grãos de soja e sua relação com o rendimento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, p.1577-1582, 1991.

COSTA, L. C.; CONFALONE, A.; PEREIRA, C. R. Effect of water stress on the efficiency of capture of water and radiation by soybean. **Tropical Science**, v. 39, p. 91-97, 1999.

COSTA, M. H.; YANAGY, S. M. N.; PONTE DE SOUZA, P. J. O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 34, 2007.

COSTA, L. C.; JUSTINO, F.; OLIVEIRA, L. J.; SEDIYAMA, G. C.; FERREIRA, W. P. M.; LEMOS, C. F. Potential forcing of CO₂, technology and climate changes in maize (*Zea mays*) and bean (*Phaseolus vulgaris*) yield in southeast Brazil. **Environmental Research Letter**, v. 4, 2009.

CULF, A. D.; FISCH, G.; HODNETT, H. G. The albedo of Amazonian forest and ranch land. **Journal of Climate**, Washington, v. 8, p. 1544-1554, 1995.

CULF, A. D.; ESTEVES, J. L.; MARQUES FILHO, A. O.; ROCHA, H. R. Radiation temperature and humidity over forest and pasture in Amazônia. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C.; ROBERTS, J.; VICTORIA, R. L. (Eds.). **Amazonian deforestation and climate**. Chichester: John Wiley, 1996. p. 175-191.

DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 481-489, 2005.

DANTAS, T. M.; FONTELES, L. V. **Avanço da fronteira agrícola na Amazônia**. Disponível em: <<http://www.oktiva.net/sispub/anexo/9168>>. Acesso em: 15 out. 2006.

D'AVILA, N. **Desmatamento na Amazônia**: o novo nome da soja. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/agronegocio/14.shtml>>. Acesso em: 2 maio 2006.

DE MELO-ABREU, J. P.; ABREU, F. M.; CAMPBELL, G. S. Assimilate partitioning in spring wheat under Mediterranean conditions. In: MONTEITH, J. L.; SCOTT, R. K. **Resource capture by crops**. Unsworth: Nottingham University Press, 1994. p. 387-388.

DEMETRIADES-SHAH, T. H.; FUCHS, M.; KANEMASU, E. T.; FLITCROFT, I. D. A note of caution concerning the relationship between cumulated intercepted solar radiation and crop growth. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 58, p. 193-207, 1992.

DESCLAUX, D.; ROUMET, P. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. **Field Crops Research**, v. 46, p. 61-70, 1996.

DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A. Modelling tropical deforestation: a study of GCM land-surface parameterizations. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 114, p. 439-462, 1988.

DOGAN, E.; KIRNAK, H.; COPUR, O. Deficit irrigations during soybean reproductive stages and CROPGRO-soybean simulations under semi-arid climatic conditions. **Field Crops Research**, v. 103, p. 154-159, 2007.

DOSS, B. D.; PEARSON, R.W.; ROGERS, H. T. Effect of soil water stress at various growth stages on soybean yield. **Agron. J.**, v. 66, p. 297-299, 1974.

EL-HUSNY, J. Desempenho da soja na safra de 2006/2007. In: REUNIÃO DE PESQUISA DA SOJA DA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL, 29, 2007, Campo Grande. **Relatório técnico...** Campo Grande, 2007.

EL-HUSNY, J. C.; ANDRADE, E. B.; SOUZA, F. R. S.; FILHO, A. S.; KEPLER, D.; ALMEIDA, L. A.; MEYER, M. C. **Recomendação de cultivares de soja para microrregião de Paragominas, Pará.** Belém: Embrapa-CPATU, 2003a. 6 p. (Comunicado técnico, 82).

EL-HUSNY, J. C.; ANDRADE, E. B.; ALMEIDA, L. A.; KLEPER, D.; MEYER, M. C. **BRS Tracajá:** cultivar de soja para a região sul do Pará. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2003b. 5 p. (Comunicado técnico, 83).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido. Laboratório de Climatologia. **Normais climatológicas de Paragominas no período de 1980 a 1988.** Belém, 1988.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja:** Paraná. Brasília, 2005. (Sistemas de produção, 5).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja:** região Central do Brasil. Brasília, 2008. 282 p. (Sistemas de produção, 12).

FARIAS, J. R. B.; ASSAD, E. D.; ALMEIDA, I. R.; EVANGELISTA, B. A.; LAZZAROTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja.** Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular técnica, 48).

FEARNSIDE, P. M. Os efeitos das pastagens sobre a fertilidade do solo na Amazônia brasileira: conseqüências para a sustentabilidade de produção bovina. **Acta Amazônica**, v. 10, n. 1, p. 119-132, 1980.

FEARNSIDE, P. M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, v. 28, n. 1, p. 23-28, 2001.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta Amazônica**, v. 36, n. 3, p. 395-400, 2006.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development.** Ames: Iowa State University, 1977. (Special Report, 80).

FEITOSA, J. R. P.; FERREIRA DA COSTA, R.; FISCH, G.; SOUZA, S. S.; NOBRE, C. A. Radiação solar global em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p. 1-7, 1998.

FERNANDES, E. J. Estudo do calor sensível e latente obtidos por intermédio da razão de bowen em uma cultura de soja irrigada. **Irriga**, v. 12, p. 281-296, 2007.

FERREIRA, M. E.; ABREU, J. P. M.; BIANCO, V. V.; MONTEIRO, A. Predicting phasic development of green beans for processing using a model with high temperature reduction of thermal time accumulation. **Scientia Horticulturae**, v. 69, p. 123-133, 1997.

FERREIRA, W. P. M.; COSTA, L. C.; SOUZA, C. F. Teste de um modelo agrometeorológico para estudo da influência da variabilidade climática na cultura da soja. **Revista Ceres**, v. 54, n. 312, p. 206-213, 2007.

FIDELIS, R. R.; SILVA, J. C.; PELUZIO, J. M.; CAPPELLARI, D.; BARROS, H. B.; CARVALHO, G. L. Performance de cultivares de soja, em diferentes épocas de semeadura na região sul do estado do Tocantins, safra 2006/07. **Amazônia, Ciência & Desenvolvimento**, v. 3, p. 163-175, 2007.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 3, p. 403-410, 1991a.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 3, p. 411-418, 1991b.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Alterações micrometeorológicas na cultura da soja submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 27, n. 5, p. 661-669, 1992.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; LAUSCHER, M. H.; DE MELLO, R. W. Modelo de estimativa de rendimento de soja no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 3, p. 399-403, 2001.

GALERANIE, P. R. Os caminhos de ocupação do território pela soja no Brasil e na Amazônia. In: _____. **Idéias e debates: a geopolítica da soja na Amazônia**. Belém: MPEG, 2003.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; PEREIRA, A. B.; CAMPO, C. J. Medidas e estimativa do albedo em cultura de pepineiro cultivado a campo e em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 2, p. 163-169, 2000.

GALVÃO, J. A. C.; FISCH, G. Balanço de radiação em área de pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2000a.

GALVÃO, J. A. C.; FISCH, G. Balanço de energia em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, n. 2, p. 25-37, 2000b.

GARCIA-HUIDOBRO, J.; MONTEITH, J. L.; SQUIRE, G. R. Time, temperature and germination of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. and H.). I. Constant temperature. **Journal of Experimental Botany**, v. 33, p. 288-296, 1982.

GAVILAN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v. 25, p. 127-140, 2007.

GIAMBELLUCA, T. W.; HOLSCHER, D.; BASTOS, T. X.; FRAZÃO, R. R.; NULLET, M. A.; ZIELGER, A. D. Observations of albedo and radiation balance over postforest land surfaces in the eastern Amazon basin. **Journal of Climate**, v. 10, p. 919-928, 1997.

HENDERSON-SELLERS, A.; GORNITZ, V. Possible climatic impacts of land cover transformations, with particular emphasis on tropical deforestation. **Climatic Change**, v. 6, p. 231-257, 1984.

HESKETH, D. L.; MYHRE, D. L.; WILLEY, C. R. Temperature control of time intervals between vegetative and reproductive events in soybeans. **Crop Science**, v. 13, p. 250-254, 1973.

HIGLEY, L.G.; PEDIGO, L.P.; OSTLIE, K. R. Degday: a program for calculating degree-days, and assumptions behind the degreeday approach. **Environmental Entomology**, v. 15, p. 999-1016, 1986.

HOMMA, A. K. O. Política agrícola ou ambiental para a prese(conse)rvação da Amazônia? **Revista de Política Agrícola**, v. 5, n. 4, p. 16-23, 1996.

HOMMA, A. K. O. Amazônia: como aproveitar os benefícios da destruição? **Estudos Avançados**, v. 19, n. 54, p. 115-135, 2005.

HORTON, R.; BRISTOW, K. L.; KLUITENBERG, G. J.; SAUER, T. J. Crop residues effects on surface radiation and energy balance – review. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 54, p. 27-37, 1996.

IGREJA, A. C. M.; PACKER, M. F.; ROCHA, M. B. **A evolução da soja no Estado de Goiás e seu impacto na composição agrícola**. São Paulo: Instituto de Economia Agrícola, 1988. 20 p.

INAMULLAH, A.; ISODA, A. Adaptive response of soybean and cotton to water stress II. Changes in CO₂ assimilation rate, chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index in relation to leaf temperature. **Plant Production Science**, v. 8, p. 131-138, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Índice de desenvolvimento sustentável**: Brasil 2008. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/recursosnaturais/ids/ids2008.pdf>. Acesso em: 3 maio 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. **Monitoramento e previsão do fenômeno El-Niño**. Disponível em: <www.cptec.inpe.br/enos>. Acesso em: 15 jul. 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Estimativas anuais de desmatamento**. Disponível em: <http://sigma.cptec.inpe.br/produto/queimadas/>. Acesso em: 20 set. 2008.

JACOBS, A. F. G.; VAN PUL, W. A. J. Seasonal changes in the albedo of maize crop during two seasons. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 49, n. 4, p. 351-360, 1990.

JAMIESON, P. D.; SEMONOV, M. A. Modelling nitrogen uptake and redistribution in wheat. **Field Crops Research**, p. 68, p. 21-29, 2000.

JARVIS, P. G.; McNAUGHTON, K. G. Stomatal control of transpiration-scaling up from leaf to region. **Advances in Ecological Research**, v. 15, p. 1-49, 1986.

JENDIROBA, E.; CÂMARA, G. M. S. Rendimento agrícola da cultura da soja sob diferentes fontes de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, n. 8, p. 1201-1209, 1994.

KANTOLIC, A.G.; MERCAU, J. L.; SLAFER, G. A.; SADRAS, V. O. Simulated yield advantages of extending post-flowering development at the expense of a shorter pre-flowering development in soybean. **Field Crops Research**, v. 101, p. 321-330, 2007.

KINIRY, J. R. Response to questions raised by Sinclair and Muchow. **Field Crops Research**, v. 62, p. 245-247, 1999.

KISH, A. J.; OGLE, W. L. Improving the heat unit system in predicting maturity date of snap beans. **HortScience**, v. 15, p. 140-141, 1980.

KISH, A. J.; OGLE, W. L.; LOADHOLT, C. B. A prediction technique for snap bean maturity incorporating soil moisture with the heat unit system. **Agricultural Meteorology**, v. 10, p. 203-209, 1972.

LALLUKKA, U.; RANTANEN, O.; MUKULA, J. The temperature sum requirements of barley varieties in Finland. **Ann. Agric. Fenn.**, v. 17, p. 185-191, 1978.

LEITÃO, M. M. V. B. R.; OLIVEIRA, G. M. Influência da irrigação sobre o albedo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 214-218, 2000.

LEITÃO, M. M. V. B. R.; SANTOS, J. M.; OLIVEIRA, G. M. O. Estimativas do albedo em três ecossistemas da floresta Amazônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 256-261, 2002.

LEMOS FILHO, J. P.; VILLA NOVA, N. A.; PINTO, H. S. A model including photoperiod in degree days for estimating Hevea bud growth. **International Journal of Biometeorology**, v. 41, p. 1-4, 1997.

LI, S.; LAI, C. T.; YOKOYAMA, Y.; OIKAWA, T. Seasonal variation in energy budget and net ecosystem CO₂ exchange over a wet C₃/C₄ co-occurring grassland: effects of development of the canopy. **Ecological Research**, v. 18, p. 661-675, 2003.

LINDQUIST, J. L.; ARKEBAUER, T. J.; WALTERS, D. T.; CASSMAN, K. G.; DOBERMANN, A. Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 72-78, 2005.

MALHI, Y. R.; PEGORARO, E.; NOBRE, A. D.; PEREIRA, M. G. P.; GRACE, J.; CULF, A. D.; CLEMENT, R. The energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 10, 2002.

MALHI, Y. R.; ARAGÃO, L. E. O. C.; METCALFE, D. B.; PAIVA, R.; QUESADA, C. A.; ALMEIDA, A.; ANDERSON, L.; BRANDO, P.; CHAMBERS, J. Q.; COSTA, A. C. L.; HUTYRA, L. R.; OLIVEIRA, P.; PATIÑO, S.; PYLE, E. H.; ROBERTSON, A. L.; TEIXEIRA, L. M. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. **Global Change Biology**, p. 1365-2486, 2009.

MARCELIS, L. F. M.; HEUVELINK, E.; GOUDRIAN, J. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. **Scientia Horticulturae**, v. 74, p. 83-111, 1998.

MARGULIS, S. **Causas do desmatamento da Amazônia brasileira**. Brasília: Banco Mundial, 2003.

MASSIGNAM, A. M.; ANGELOCCI, L. R. Relações entre temperatura do ar, disponibilidade hídrica no solo, fotoperíodo e duração de subperíodos fenológicos do girassol. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 1, p. 63-69, 1993.

MERCAU, J. L.; DARDANELLI, J. L.; COLLINO, D. J.; ANDRIANI, J. M.; IRIGOYEN, A.; SATORRE, E. H. Predicting on-farm soybean yields in the pampas using CROPGRO-soybean. **Field Crops Research**, v. 100, p. 200-209, 2007.

MEYERS, T. P.; HOLLINGER, S. R. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125, p. 105-115, 2004.

MIRAGAYA, J. Demanda mundial de carne bovina tem provocado o desmatamento na Amazônia. **T&C Amazônia**, ano 6, n. 14, jun. 2008.

- MONSI, M.; SAEKI, T. Uber den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung fur die stoff prdktion. **Japanese Journal of Botany**, v. 14, p. 22-52, 1953.
- MONTEITH, J. L. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 68, p. 213–220, 1994.
- MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. Series B, Biological Sciences, v.281, p.277-294, 1977.
- MOORE, C. J.; FISCH, G. Estimating heat storage in Amazonian Tropical Forest. **Agric. For. Meteorol.**, v. 38, p. 147-169, 1986.
- MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; BENINCASA, M.; SOUZA, J. L.; NASCIMENTO FILHO, M. F. Variação do albedo em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 2, p. 163-168, 1999.
- MUCHOW, R. C. Effect of water and nitrogen supply on radiation interception and biomass accumulation of kenaf (*Hibiscus cannabinus*) in a semi-arid tropical environment. **Field Crops Research**, v. 28, p. 281-293, 1992.
- MUCHOW, R. C.; SINCLAIR, T. R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. II. Field and model analyses. **Field Crop. Res.**, v. 15, p. 143-156, 1986.
- MUCHOW, R. C.; SINCLAIR, T. R. Water deficit effects on maize yields modeled under current and “Greenhouse” climates. **Agronomy Journal**, v. 83, p. 1052-1059, 1991.
- MUCHOW, R. C.; ROBERTSON, M. J.; PENGELLY, B. C. Radiation-use efficiency of soybean, mugbean and cowpea under different environmental conditions. **Field Crops Research**, v. 32, p. 1-6, 1993.
- MUELLER, C. C. **Dinâmica, condicionantes e impactos sócio-ambientais da evolução da fronteira agrícola no Brasil**. Brasília: Instituto Sociedade, População e Natureza, 1992. (Documento de trabalho, 7).
- MUELLER, C. C.; BUSTAMANTE, M. **Análise da expansão agrícola no Brasil**. Disponível em: <www.worldbank.org/rfpp/news/debates/mueller.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2006.
- NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, Washington, v. 4, n. 10, p. 957-987, 1991.
- OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. Rio de Janeiro: Broch, 1986. 448 p.

ORTEGA-FARIAS, S.; CUENCA, R. H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 81, p. 131-143, 1996.

ORTEGA-FARIAS, S.; OLIOSO, A.; ANTONIOLETTI, R.; BRISSON, N. Evaluation of the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration. **Irrigation Science**, v. 23, p. 1-9, 2004.

OYA, T.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; TOBITA, S.; ITO, O. Drought tolerance characteristics of Brazilian soybean cultivars: evaluation and characterization of drought tolerance of various Brazilian soybean cultivars in the field. **Plant Produc. Sci.**, v. 7, n. 2, p. 129-137, 2004.

PACHECO, N. A.; BASTOS, T. X.; EL-HUSNY, J. C. Identificação de risco climático para semeadura da soja no município de Paragominas, PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, 2004, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBMET, 2004.

PAUSTIAN, K.; ANDRÉN, O.; JANZEN, H. H.; LAL, R.; SMITH, P.; TIAN, G.; TIESSEN, H.; VAN NOORDWIJK, M.; WOOMER, P. L. Agricultural soil as a sink to mitigate CO₂ emissions. **Soil Use and Management**, v. 13, p. 230-244, 1997.

PEARSON, S.; HADLEY, P.; WHELDON, A. E. A model of the effects of temperature on the and development of cauliflower (*Brassica oleracea* L. botrytis). **Scientia Horticulturae**, v. 59, p. 91-106, 1994.

PENGELLY, B. C.; BLAMEY, F. P. C.; MUCHOW, R. C. Radiation interception and accumulation of biomass and nitrogen by soybean and three tropical annual forage legumes. **Field Crops Res.**, v. 63, p. 99-112, 1999.

PENNING DE VRIES, F. W. T.; TIMSINA, J.; ALAGOS, M. J. C.; VELASCO, L.; PANDEY, R. K. Opportunities for soya beans after rice in the Philippines: an exploration by simulation. 1992. (CABO-DLO, Simulation Report, 25).

PEREIRA, A. R. Radiation regime of tropical rain forest. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 2, p. 1-7, 1998.

PEREIRA, C. R. **Análise do crescimento e desenvolvimento de soja sob diferentes condições ambientais**. 2002. 305 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, p. 141-150, 1999.

PONTE DE SOUZA, P. J. O. et al. Alterações no albedo devidas o avanço da fronteira agrícola na Amazônia: um estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15, 2006, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2006.

PONTE DE SOUZA, P. J. O. et al. **Radiation interception and the radiation use efficiency by soybean in the Amazonia**. Wageningen-Holanda, 2007a. (Submetido ao periódico Field Crops Research).

PONTE DE SOUZA, P. J. O. et al. **Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia**. Campina Grande, 2007b. (Submetido à Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental).

PURCELL, L. C. Comparison of thermal units derived from daily and hourly temperatures. **Crop Science**, v. 43, p. 1874-1879, 2003.

QUEIROZ, E. F.; MOLION, L. C. B.; GAUDÊNCIO, C. A.; GARCIA, A. Um modelo matemático de previsão da data de ocorrência de estádios fenológicos de três cultivares de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, p. 533-542, 1996.

RAMBO, L.; COSTA, J. A.; PIRES, J. L. F.; PARCIANELLO, G.; FERREIRA, F. G. Rendimentos de grãos da soja em função do arranjo de plantas. **Ciência Rural**, v. 33, n. 3, p. 405-411, 2003.

RANDOW, C. V.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M.; GASH, J.; ELBERS, J. A.; WATERLOO, M. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 5-26, 2004.

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.

RITCHIE, J. T. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. **Plant and Soil**, v. 58, p. 81-96, 1981.

ROCHA, E. J. P. **Balanço de umidade e a influência das condições de contorno na precipitação da Amazônia**. 2001. 210 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.

ROCHETTE, P.; DESJARDINS, R. L.; PATTEY, E.; LESSARD, R. Instantaneous measurement of radiation and water use efficiencies of a maize crop. **Agronomy Journal**, v. 88, p. 627-635, 1996.

ROSEMBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment**. 2.ed. New York: John Wiley, 1983. 495 p.

RUSSELE, M. P.; WILHELM, W. W.; OLSON, R. A.; POWER, J. F. Growth analysis based on degree days. **Crop Science**, v. 24, p. 28-32, 1984.

SAKAI, R. K.; FITZJARRALD, D. R.; MORAES, O. L. L.; STAEBLER, R. M.; ACEVEDO, O. C.; CZIKOWSKY, M. J.; SILVA, R.; BRAIT, E.; MIRANDA, V. Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in an Amazonian agricultural field. **Global Change Biology**, v. 10, p. 895-907, 2004.

SAKURATANI, T. Separate estimation of transpiration and evaporation from soybean field without water shortage. **Journal of Agricultural Meteorology**, v. 42, p. 309-317, 1987.

SALADO-NAVARRO, L. R.; HINSON, K.; SINCLAIR, T. R. Nitrogen partitioning and dry matter allocation in soybeans with different seed protein concentration. **Crop Sci.**, v. 25, p. 451-455, 1985.

SALATI, E. Recycling of water in the Amazon, Brazil: an isotopic study. **Geophysical Research. Water Resources Research**, v. 15, n. 5, p. 1250-1258, 1978.

SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M. H.; SATYAMURT, P.; SOARES-FILHO, B. S.; CARDOSO, M. F. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letter**, v. 34, p. 1-7, 2007.

SANTIAGO, A. V. **Simulações dos efeitos da cobertura vegetal no balanço hídrico da bacia do rio Ji-Paraná, RO**. 2005. 70 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

SANTOS, J. B.; PROCÓPIO, S. O.; SILVA, A. A.; COSTA, L. C. Captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Bragantia**, v. 62, p. 147-153, 2003.

SAUER, T. J.; SINGER, J. W.; PRUEGER, J. H.; DESUTTER, T. M.; HATFILED, J. L. Radiation balance and evaporation partitioning in a narrow-row soybean canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 145, p. 206-214, 2007.

SAUERBECK, D. R. CO₂ emissions and C sequestration by agriculture – perspective and limitations. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 60, p. 253-266, 2001.

SCHNEIDER, R. R.; ARIMA, E.; VERISSIMO, A.; BARRETO, P.; SOUZA JUNIOR, C. **Amazônia sustentável: limitantes e oportunidades para o desenvolvimento rural**. Brasília: Banco Mundial; Belém: Imazon, 2000. (Série Parcelas, 1).

SCHOFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para a produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, p. 241-249, 2001.

SCHOFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. Contribuição relativa da temperatura do ar no desenvolvimento de três cultivares de soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 2, p. 97-104, 2002.

SCHOFFEL, E. R.; SACCOL, A. V.; MANFRON, P. A.; MEDEIROS, S. L. P. Excesso hídrico sobre os componentes de rendimento da cultura da soja. **Ciência Rural**, v. 32, n. 1, p. 7-72, 2001.

SCOTT, H. D.; DEANGULO, J.; DANIELS, M. B. et al. Flood duration effects on soybean growth and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 631-636, 1989.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA – SAGRI. **Evolução da safra de grãos no estado do Pará**. Disponível em: <www.sagri.pa.gov.br/documents/Evolucao_daSafradeGraosnoPara.xls>. Acesso em: 20 set. 2008.

SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA – SAGRI. **Evolução da produção no estado do Pará por município de 1994 a 2008**. Disponível em: <www.sagri.pa.gov.br>. Acesso em: 12 maio 2009.

SENTELHAS, P. C.; NOGUEIRA, S. S. S.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; SANTOS, R. R. Temperatura-base e graus-dia para cultivares de girassol. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 2, p. 43-49, 1994.

SETIYONO, T. D.; WEISS, A.; SPECHT, J.; BASTIDAS, A. M.; CASSMAN, K. G.; DOBERMANN, A. Understand and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, v. 100, p. 257-271, 2007.

SILVA DIAS, M. A. F. Meteorologia, desmatamento e queimadas na Amazônia: uma síntese de resultados do LBA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 190-199, 2006.

SILVA DIAS, M. A. F.; COHEN, J. C. P.; GANDU, A. W. Interações entre nuvens, chuvas e a biosfera na Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 215-222, 2005.

SIMON, M. F.; GARAGORRY, F. L. The expansion of agriculture in the Brazilian. **Amazon. Environmental Conservation**, v. 32, n. 3, p. 203-212, 2005.

SINCLAIR, T. R. Leaf area development in field-grown soybeans. **Agronomy Journal**, v. 76, p. 141-146, 1983.

SINCLAIR, T. R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. I. Model development. **Field Crops Research**, v. 15, p. 125-141, 1986.

SINCLAIR, T. R. Model analysis of plant traits leading to prolonged crop survival during severe drought. **Field Crops Research**, v. 68, p. 211-217, 2000.

- SINCLAIR, T. R.; DE WIT, C. T. Analysis of the carbon and nitrogen limitations to soybean yield. **Agronomy Journal**, v. 68, p. 320-325, 1976.
- SINCLAIR, T. R.; LUDLOW, M. M. Influence of soil water supply on the plant water balance of four tropical grain legumes. **Aust. J. Plant Physiol.**, v. 13, p. 329-421, 1986.
- SINCLAIR, T. R.; HORIE, T. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. **Crop Science**, v. 29, p. 90-98, 1989.
- SINCLAIR, T. R.; AMIR, J. A model to assess nitrogen limitations on the growth and yield of spring wheat. **Field Crops Research**, v. 30, p. 63-78, 1992.
- SINCLAIR, T. R.; MUCHOW, R. C. Occam's Razor, radiation-use efficiency, and vapor pressure deficit. **Field Crops Research**, v. 62, p. 239-243, 1999.
- SINCLAIR, T. R.; MUCHOW, R. C. System analysis of plant traits to increasing grain yield on limited water supply. **Agronomy Journal**, v. 93, p. 263-270, 2001.
- SINCLAIR, T. R.; SHIRAIWA, T.; HAMMER, G. L. Variation in crop radiation-use efficiency with increased diffuse radiation. **Crop Sci.**, v. 32, p. 1281-1284, 1992a.
- SINCLAIR, T. R.; SALADO-NAVARRO, L. R.; MORANDI, E. N.; BODRERO, M. L.; MARTINGNONE, R. A. Soybean yield in Argentina in response to weather variation among cropping seasons. **Field Crops Research**, v. 30, p. 1-11, 1992b.
- SINCLAIR, T. R.; FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Modeling nitrogen accumulation and use by soybean. **Field Crops Research**, v. 81, p. 149-158, 2003.
- SINCLAIR, T. R.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L. Comparison of vegetative development in soybean cultivars for low-latitude environments.. **Field Crops Research**, v. 92, p. 53-59, 2005.
- SINCLAIR, T. R.; SALADO-NAVARRO, L. R.; SALAS, G.; PURCELL, L. C. Soybean yields and soil water status in Argentina: Simulation analysis. **Agricultural Systems**, v. 94, p. 471-477, 2007.
- SIONIT, N.; KRAMER, P. J. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. **Agronomy Journal**, v. 69, p. 174-178, 1977.
- SNYDER, R. L.; SPANO, D.; CESARACCIO, C.; DUCE, P. Determining degree-day thresholds from field observation. **International Journal of Biometeorology**, v. 42, p. 177-182, 1999.

SOARES-FILHO, B. S.; NEPSTAD, D. C.; CURRAN, L.; CERQUEIRA, G.; GARCIA, R. A.; RAMOS, C. A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P.; VOLL, E.; McGRATH, D. Cenários de desmatamento para Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 54, p. 138-152, 2005.

SONG, J. Diurnal assymetry in surface albedo. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 92, p. 181-189, 1998.

SOUZA, J. L.; ESCOBEDO, J. F.; TORNERO, M. T. T. Albedo e estimativas do saldo de radiação em feijão-vagem sob cobertura de plástico e ambiente externo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 10, p. 1763-1774, 1999.

SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; TOTA, J.; PEZZI, L.; FISCH, G.; NOBRE, C. On the influence of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. **Acta Amazônica**, v. 30, n. 2, p. 305-318, 2000.

SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C.; SOUSA, A. M. L. Balanço de energia na soja em áreas de fronteira agrícola na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15, 2007, Aracaju. **CD-ROM...** Aracaju: SBAGRO, 2007.

SOUZA, P. J. O. P.; ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, A.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C. Impactos no albedo em consequência do avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, n. 1, p. 87-95, 2008a.

SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; BISPO, C. J. C.; LOUREIRO, R. S.; SAMPAIO, L. S.; ROCHA, E. J. P. Análise do crescimento da soja na Amazônia. 2008. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15, 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2008b.

SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Impactos do avanço do plantio de soja no balanço de energia na Amazônia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16, 2009, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, 2009a.

SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P.; FARIAS, J. R. B.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. C.; SAMPAIO, L. Radiation use efficiency of soybean in the Amazon region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2009b (no prelo).

SOUZA, P. J. O.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P.; LOUREIRO, R. S.; BISPO, C. J. C. Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, 2009c (no prelo).

SOUZA FILHO, J. D. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M. H.; COHEN, J. C. Mecanismos de controle da variação sazonal da transpiração de uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 223-229, 2005.

SOUZA FILHO, J. D. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M. H.; COHEN, J. C. P.; ROCHA, E. J. P. Variação sazonal do balanço de radiação em uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 318-330, 2006.

SPAETH, S. C.; SINCLAIR, T. R. Linear increase in soybean harvest index during seed-filling. **Agronomy Journal**, v. 77, p. 207-211, 1983.

SPAETH, S. C.; SINCLAIR, T. R. Linear increase in soybean harvest index during seed-filling. **Agronomy Journal**, v. 77, p. 207-211, 1985.

SPAETH S. C.; SINCLAIR, T. R.; OHNUMA, T.; KONNO, S. Temperature, radiation, and duration dependence of high soybean yields: measurement and simulation. **Field Crop Res.**, v. 16, p. 297-307, 1987.

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

STRECK, N. A.; PAULA, G. M.; OLIVEIRA, F. B.; SCHWANTES, A. P.; MENEZES, N. L. Improving node number simulation in soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 661-668, 2009.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, p. 417-427, 2008.

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 443-452, 2009.

THOMAS, A. L.; COSTA, J. A. Influencia do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29, p. 1389-1396, 1994.

TOURINO, M. C. C.; REZENDE, P. M.; SALVADOR, N. Espaçamento, densidade e uniformidade de semeadura na produtividade e características agrônômicas da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 8, p. 1071-1077, 2002.

UNLAND, H. E.; HOUSER, P. R.; SHUTTLEWORTH, W. J.; WANG, Z. L. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 82, p. 119-153, 1996.

VENTUROSO, L. R.; CARON, B. O.; SCHMIDT, D.; BERGAMIN, A. C.; VALADÃO JUNIOR, D. D.; JAKELAITIS, A. Efeito da época de semeadura sobre caracteres agrônômicos em cultivares de soja em Rolim de Moura-RO. **Bioscience Journal**, v. 25, p. 73-81, 2009.

VERA-DIAZ, M. C.; KAUFMANN, R. K.; NEPSTAD, D. C.; SCHLESINGER, P. An interdisciplinary model of soybean yield in the Amazon Basin: the climatic, edaphic, and economic determinants. **Ecological Economics**, v. 65, p. 420-431, 2008.

VIEIRA, C. R.; CABRAL, L. C.; DE PAULA, A. C. O. Composição centesimal e conteúdo de aminoácidos, ácidos graxos e minerais de seis cultivares de soja destinada à alimentação humana. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 1277-1283, 1999.

VILLA NOVA, N. A.; CARRETEIRO, M. V.; SCARDUA, R. Um modelo de avaliação do crescimento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), em termos da ação combinada do fotoperíodo e da temperatura média do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2, 1983, Campinas. **Anais...** Campinas, 1983. p. 31-48.

WERTH, D.; AVISSAR, R. The regional evapotranspiration of the Amazon. **Journal of Hydrometeorology**, v.5, p. 100-109, 2004.

WEST, T. O.; MARLAND, G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. **Agricultural, Ecosystems and Environment**, v. 91, p. 217-232, 2002.

WILMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

WILMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 3, n. 7, p. 1309-1313, 1982.

WILMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

WOLF, J. Comparison of two soya bean simulation models under climate change. I. Model calibration and sensitivity analyses. **Climate Research**, v. 20, p. 55-70, 2002.

YANG, S.; LOGAN, J.; COFFEY, D. L. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree-days. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 74, p. 61-74, 1995.

YIN, X.; KROPFF, M. J.; McLAREN, G.; VISPERAS, R. M. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 77, p. 1-16, 1995.

ZHANG, L.; WANG, R.; HESKHET, J.D. Effects of photoperiod on growth and development of soybean floral bud in different maturity. **Agronomy Journal**, v. 93, p. 944-948, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela 1A - Sistema de classificação dos estádios fenológicos da cultura de soja, proposto por Fehr e Caviness (1977)

Estádio	Descrição
Estádios Vegetativos	
VE (emergência)	Os cotilédones estão acima da superfície do solo.
VC (cotilédone)	As folhas unifolioladas estão estendidas, os bordos das mesmas não estão se tocando.
V1 (primeiro nó)	Folhas unifolioladas completamente desenvolvidas.
V2 (segundo nó)	Primeira folha trifoliolada completamente desenvolvida.
V3 (terceiro nó)	Segunda folha trifoliolada completamente desenvolvida.
Vn (enésimo nó)	Enésima folha trifoliolada completamente desenvolvidas
Estádios Reprodutivos	
R1 (início do florescimento)	Uma flor aberta, em qualquer nó da haste principal.
R2 (florescimento pleno)	Flor aberta, em um dos dois últimos nós da haste principal.
R3 (início da formação de vagem)	Vagem com 5 mm de comprimento, em um dos quatro últimos nós superiores da haste principal.
R4 (Plena formação de vagem)	Vagem com 2 cm de comprimento, em um dos quatro últimos nós superiores da haste principal.
R5 (início de enchimento de grãos)	Grãos com 3 mm de comprimento, localizada em um dos quatro últimos nós superiores da haste principal.
R6 (Pleno enchimento de grãos)	Vagem contendo semente verde, que preencha a cavidade da vagem localizada em um dos quatro últimos nós superiores da haste principal.
R7 (início da maturação)	Uma vagem normal sobre a haste principal com coloração madura.
R8 (maturação plena)	95% de vagens com coloração madura (palha marrom).

Fonte: Adaptado de Farias et al. (2007).

APÊNDICE B

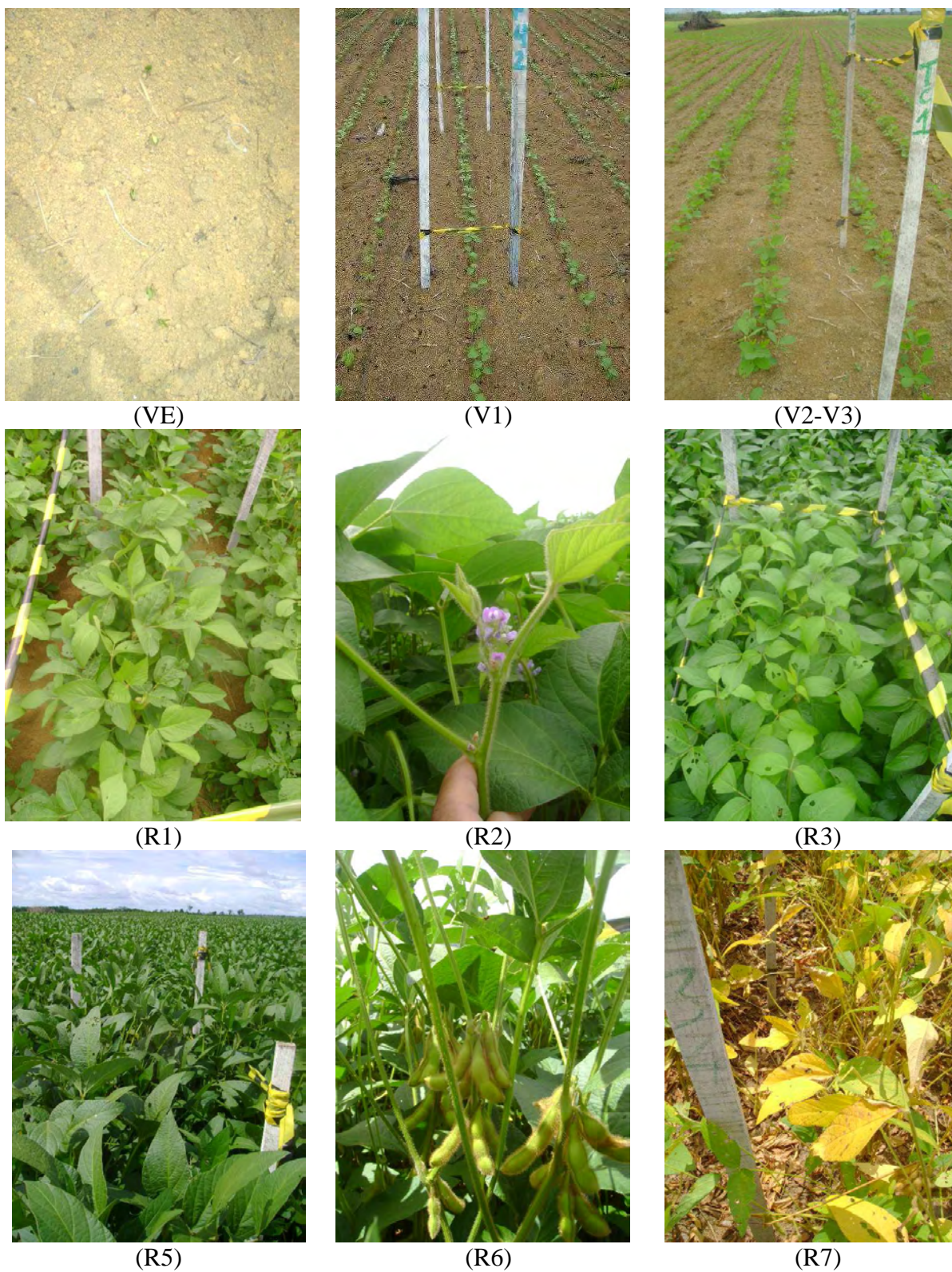


Figura 1B – Exemplo do acompanhamento fenológico da soja.