

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E
CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

FABIO CALIXTO CABRAL

**ESTUDO NUMÉRICO SOBRE OS IMPACTOS DA EXPANSÃO DE
ÁREAS DE PASTAGEM E CULTIVO DE SOJA NAS CIRCULAÇÕES
LOCAIS DA REGIÃO AMAZÔNICA.**

SÃO PAULO

2008

Fabio Calixto Cabral

**ESTUDO NUMÉRICO SOBRE OS IMPACTOS DA EXPANSÃO DE ÁREAS DE
PASTAGEM E CULTIVO DE SOJA NAS CIRCULAÇÕES LOCAIS DA REGIÃO
AMAZÔNICA.**

Dissertação apresentada ao Instituto de
Astronomia, Geofísica e Ciências
Atmosféricas, Universidade de São Paulo,
como condição parcial para obtenção do título
de Mestre em Ciências, Área de Concentração:
Meteorologia
Orientador: Prof. Dr. Edmilson Dias de Freitas

São Paulo
2008

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Edmilson Dias de Freitas pela orientação, paciência, compreensão e, acima de tudo, pela confiança e entusiasmo durante todo o trabalho. Certamente, o sucesso deste trabalho deve-se muito a esse grande mestre.

Aos colegas e amigos: Msc. America Murguia, Msc. Bruno Biazeto, Enzo Todesco, Msc. Fabricio Branco, Kléber Rocha, Pedro Lopes, Wladimir José de Santis Junior, “tia” Inês Iwashita e vários outros que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho fosse elaborado e finalizado, auxiliando nas atividades ou simplesmente compartilhando da alegria de bons e inesquecíveis momentos de descontração.

A todos os professores do IAG que contribuíram na minha formação. Em especial:

Ao Dr. Adilson Wagner Gandú pelas valiosas sugestões durante o exame de qualificação.

Ao Dr. Humberto Ribeiro da Rocha também pelas sugestões durante o exame de qualificação e pela competente orientação durante o Programa de Aperfeiçoamento de ensino.

Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À Elisabete Flores e a todos os funcionários do IAG pela competência e ajuda nas questões burocráticas.

Ao Prof. Marcos Heil Costa pela cessão dos parâmetros relativos à cultura de soja.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo auxílio financeiro, tornando possível a realização deste trabalho (Processos: 05/57770-6 – Bolsa de Mestrado e 02/09289-9 – Projeto Temático “Interação Biosfera-Atmosfera Fase 2: Cerrados e Mudanças de Uso da Terra).

Aos meus pais, Clovis Moreira Cabral e Maria Rosa Calixto Cabral, a minha avó Isabel do Nascimento (*in memoriam*) e ao meu irmão, Marcio Calixto Cabral pelo imenso incentivo aos estudos, carinho e compreensão.

À minha amiga e esposa Maria Rita Camilo de Carvalho pelo apoio, amizade e compreensão em todos os momentos.

A todos os meus amigos que, de uma forma ou de outra, contribuíram na minha formação acadêmica e moral.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ii
LISTA DE TABELAS.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT	ix
1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Dinâmica do uso do solo na Amazônia Legal	13
1.2 Cenários futuros para a soja.....	14
1.3 Características da cultura de Soja.....	15
1.4 Estudos Numéricos sobre a mudança no uso do solo.....	19
1.5 Objetivos.....	22
2 DESCRIÇÃO DO MODELO, CENÁRIOS UTILIZADOS E VALIDAÇÃO	24
2.1 Modelo Numérico.....	24
2.2 Parametrização da difusão turbulenta.....	26
2.3 Parametrização de cumulus	27
2.4 Parametrização da radiação	28
2.5 Parametrização da microfísica.....	29
2.6 Parametrização da vegetação.....	30
2.7 Modificação dos parâmetros da vegetação e Implantação da soja no sub-modelo LEAF-3.....	33
2.8 Topografia e umidade inicial do solo	36
2.9 Esquema ilustrativo do BRAMS	37
2.10 Descrição dos Cenários Utilizados.....	39
2.11 Parâmetros estatísticos.....	41
2.12 Validação do Modelo.....	42
2.13 Configuração das Simulações Controle 1 e 2.....	42
2.14 Comparação entre as Simulações Controle 1 e 2	43
3 SIMULAÇÕES DE CENÁRIOS DE DESMATAMENTO.....	46
3.1 Configuração das simulações de cenários de desmatamento	46
3.2 Análise da variabilidade espacial	47
3.2.1 Mudanças regionais: PAS2009 - CTL e SOJA2009 – CTL.....	47
3.2.2 Mudanças regionais: PAS2025 - CTL e SOJA2025 – CTL.....	52
3.2.3 Análise estatística	57
3.3 Análise das circulações locais	65
3.3.1 Circulações locais: PAS2009 - CTL e SOJA2009 – CTL.....	65
3.3.2 Circulações locais: PAS2025 - CTL e SOJA2025 – CTL.....	70
3.3.3 Perfil Vertical	74
3.4 O cenário Cultura.....	77
3.4.1 Mudanças regionais: CULTURA2025 – CTL	77
3.4.2 Análise estatística	82
3.4.3 Circulações locais: CULTURA2025 – CTL	86
3.4.4 Perfil vertical	88
4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
4.1 Sugestões para trabalhos Futuros	93
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Taxa média do desflorestamento na Amazônia ($\text{km}^2 \text{ ano}^{-1}$) para o período de 1977 à 2003. Fonte: INPE(2004).	11
Figura 2 - Proporção do desmatamento em função da distância na Amazônia Legal (obtida de FERREIRA, 2001).	12
Figura 3 – Área total desmatada na Amazônia legal. Fonte: Ferreira et al. (2005).....	12
Figura 4 – Etapas do modelo tradicional de ocupação da Amazônia legal: (A) abertura de estradas, (B) extração seletiva de madeiras nobres, (C) pecuária extensiva e (D) agricultura tradicional ou mecanizada. Fonte: Ferreira et al. (2005).....	14
Figura 5 – Variação Sazonal do IAF e do albedo para a cultura de soja. Fonte: Heil et al. (2007).	19
Figura 6 – Diagrama esquemático das interações solo-biosfera-atmosfera (fonte: BRUNO, 2004.).....	20
Figura 7 – Evolução dos parâmetros (a)-albedo, (b)-índice de área foliar, (c) comprimento de raiz, (d)-comprimento de rugosidade, (e)-fração de cobertura vegetal e (f)-altura do dossel para a soja.	35
Figura 8 - Perfil inicial do grau de saturação de água no solo.....	36
Figura 9 – Topografia da região em 2 dimensões (a) e em 3 dimensões (b).....	37
Figura 10 – Ilustração esquemática do funcionamento do modelo BRAMS (Adaptado de: http://cires.colorado.edu/science/groups/pielke/gallery/rams/gem/gemramimage.pdf . Acesso em 19/08/2007).	38
Figura 11 - Cenário Controle (a), Pastagem2009 (b), Pastagem2025 (c), Soja2009 (d), Soja2025 (e) e Cultura2025(f). As coberturas corpos d'água, floresta e pastagem/soja/cultura correspondem respectivamente a azul, verde e laranja/vermelho/preto.....	40
Figura 12 - Variação diária de: (a) fração evaporativa (LE/RN), razão (Rn/Ki) e (c) razão de Bowen (H/LE) para o experimento Controle 1.	44
Figura 13 - Variação diária de: (a) fração evaporativa (LE/RN), razão (Rn/Ki) e (c) razão de Bowen (H/LE) para o experimento Controle 2.	45
Figura 14 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] para a Precipitação acumulada no período.	49
Figura 15 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] do Saldo de Radiação(Rn) para o período.	49
Figura 16 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da Irradiância Solar (Ki) para o período.	50

Figura 17 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor sensível para o período.	50
Figura 18 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor latente para o período.	51
Figura 19 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de temperatura média para o período.	51
Figura 20 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da razão de mistura do vapor d'água para o período.	52
Figura 21 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] para a Precipitação acumulada no período.	53
Figura 22 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] do Saldo de Radiação (Rn) para o período.	54
Figura 23 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da Irradiância Solar (Ki) para o período.	54
Figura 24 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor sensível para o período.	55
Figura 25 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor latente para o período.	55
Figura 26 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de temperatura média para o período.	56
Figura 27 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da razão de mistura do vapor d'água para o período.	56
Figura 28 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] para a Precipitação acumulada no período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).	58
Figura 29 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] do Saldo de Radiação (Rn) para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).	59
Figura 30 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da Irradiância Solar (Ki) para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).	60
Figura 31 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor sensível para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).	61

- Figura 32 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor latente para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d). 62
- Figura 33 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de temperatura média para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d). 63
- Figura 34 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da razão de mistura do vapor d'água para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d). 64
- Figura 35 - Corte vertical na latitude 10,476° S: Campo médio para o horário de 21 UTC (a,b), 00 UTC (c,d) e 03 UTC (e,f) da temperatura potencial (sombreado) (K) da diferença (PAS2009-CTL) (a,c,e) e (SOJA2009-CTL) (b,d,f). As setas indicam a velocidade vertical e zonal do vento (w e u) em cm s^{-1} . A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com soja (vermelho). 67
- Figura 36 - Corte vertical na latitude 10,476° S: Campo médio para o horário de 21 UTC (a,b), 00 UTC (c,d) e 03 UTC (e,f) da razão de mistura (sombreado) (g/kg) da diferença (PAS2009-CTL) (a,c,e) e (SOJA2009-CTL) (b,d,f). As setas indicam a velocidade vertical e zonal do vento (w e u) em cm s^{-1} . A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com soja (vermelho). 68
- Figura 37 - Corte vertical na latitude 10,476° S: Campo médio para o horário de 21 UTC (a,b), 00 UTC (c,d) e 03 UTC (e,f) da precipitação (mm h^{-1}) da diferença (PAS2009-CTL) (a,c,e) e (SOJA2009-CTL) (b,d,f). A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com soja (vermelho). 69
- Figura 38 - Corte vertical na latitude 11,196° S: Campo médio para o horário de 21 UTC (a,d), 00 UTC (b,e) e 03 UTC (c,f) da temperatura potencial (sombreado) (K) da diferença (PAS2009-CTL) (a,b,c) e (SOJA2009-CTL) (d,e,f). As setas indicam a velocidade vertical e zonal do vento (w e u) em cm s^{-1} . A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com soja (vermelho). 71
- Figura 39 - Corte vertical na latitude 11,196° S: Campo médio para o horário de 21 UTC (a,b), 00 UTC (c,d) e 03 UTC (e,f) da razão de mistura (sombreado) (g/kg) da diferença (PAS2009-CTL) (a,c,e) e (SOJA2009-CTL) (b,d,f). As setas indicam a velocidade vertical e zonal do vento (w e u) em cm s^{-1} . A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com soja (vermelho). 72

- Figura 40 - Corte vertical na latitude 11,196° S: Campo médio para o horário de 21 UTC (a,b), 00 UTC (c,d) e 03 UTC (e,f) da taxa de precipitação (mm h^{-1}) da diferença (PAS2009-CTL) (a,c,e) e (SOJA2009-CTL) (b,d,f). A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com soja (vermelho). 73
- Figura 41 – Perfil vertical médio do período da (a,b) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (c,d) razão de mistura (g/kg), (e,f) velocidade zonal (m s^{-1}), (g,h) velocidade meridional (m s^{-1}) e (i,j) vento horizontal (m s^{-1}) para os cenários CTL, PAS2009, SOJA2009, PAS2025 e SOJA2025..... 75
- Figura 42 – Diferença [Cultura – Controle] para a Precipitação acumulada no período. 78
- Figura 43 – Diferença [Cultura – Controle] do Saldo de Radiação(R_n) para o período. 78
- Figura 44 – Diferença [Cultura – Controle] da Irradiância Solar (K_i) para o período. 79
- Figura 45 – Diferença [Cultura – Controle] de fluxo de calor sensível para o período. 79
- Figura 46 – Diferença [Cultura – Controle] de fluxo de calor latente para o período..... 80
- Figura 47 – Diferença [Cultura – Controle] de temperatura média para o período..... 80
- Figura 48 – Diferença [Cultura – Controle] da razão de mistura do vapor d'água para o período. 81
- Figura 49 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] para a Precipitação acumulada no período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d). 82
- Figura 50 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] do Saldo de Radiação(R_n) para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d). 83
- Figura 51 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da Irradiância Solar (K_i) para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d). 83
- Figura 52 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor sensível para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d). 84
- Figura 53 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor latente para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito

- elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d). 84
- Figura 54 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de temperatura média para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d). 85
- Figura 55 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da razão de mistura do vapor d’água para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d). 85
- Figura 56 - Corte vertical na latitude 11,196° S: Campo médio para o horário de 21 UTC, 00 UTC e 03 UTC da temperatura potencial (K) (a, c, e) e razão de mistura (g/kg) (b, d, f) (sombreado) da diferença CULTURA2025-CTL. As setas indicam a velocidade vertical e zonal do vento (w e u) em cm s^{-1} . A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com cultura (preto). 87
- Figura 57 - Corte vertical na latitude 11,196° S: Campo médio para o horário de 21 UTC(a), 00 UTC (b) e 03 UTC (c) da precipitação (mm h^{-1}) da diferença (CULTURA2025-CTL). A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com cultura (preto)..... 88
- Figura 58 – Perfil vertical médio do período da (a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (b) razão de mistura (g/kg), (c) velocidade zonal (m s^{-1}), (d) velocidade meridional (m s^{-1}) e (e) vento horizontal (m s^{-1}) para os cenários CTL, SOJA2025 e CULTURA2025..... 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Duração em dias dos principais estádios fenológicos (EF) de alguns cultivares de soja. <i>Fonte: Peixoto, 2000.</i>	17
Tabela 2 - Componentes do balanço de radiação, estágio de desenvolvimento e índice de área foliar da soja.	18
Tabela 3 - Parâmetros biofísicos modificados para Floresta e Pastagem. <i>Fonte: Rosolem*, 2005.</i>	34
Tabela 4 - Parâmetros biofísicos para cultura genérica. (BRAMS)	34
Tabela 5 – Principais configurações utilizadas nas simulações de validação.	43
Tabela 6 – Principais configurações utilizadas nas simulações de cenários.	46
Tabela 7 – Valores médios para o interior da área perturbada e percentual de aumento ou diminuição. (Valores obtidos para área definida nos cenários SOJA2009 e SOJA2025, no interior da região coberta por soja).....	57
Tabela 8 – Valores médios para o interior da área perturbada e percentual de aumento ou diminuição. Valores obtidos para área definida nos cenários CULTURA2025, no interior da região coberta por soja.	81

RESUMO

CABRAL, F. C. **Estudo numérico sobre os impactos da expansão de áreas de pastagem e cultivo de soja nas circulações locais da região amazônica. 2008.** 100f. Dissertação de Mestrado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

A Amazônia abrange uma extensa área e está posicionada numa região em que as trocas de energia entre a superfície continental e a atmosfera são bastante intensas. A forma mais detectável de mudanças do uso da terra na Amazônia tem sido a conversão de florestas de dosséis fechados em campos de pastagens e de cultivos. Este trabalho buscou, através da modelagem numérica, avaliar os impactos causados pela mudança no uso do solo sobre a cultura de soja e sobre as áreas desmatadas para a atividade da pecuária. Foi utilizado o modelo BRAMS, que conta com um módulo de interação solo-vegetação-atmosfera, adaptado neste trabalho para contemplar a evolução temporal da cultura de soja, desde o plantio até a colheita. Para definir as regiões em que ocorre o desmatamento em benefício dessas atividades agropecuárias, foram estudados 6 cenários com base em trabalhos anteriores: (i) sem alterações (Controle), (ii) alterações previstas para o ano de 2009 (Pastagem 2009 e Soja 2009), (iii) alterações previstas para o ano de 2025 (Pastagem 2025, Soja 2025 e Cultura 2025). Inicialmente, foram feitas duas simulações para a validação do modelo numérico tendo como tipo de uso do solo a definição original utilizada no cenário Controle. Os resultados da validação do modelo mostraram-se próximos aos observados na região. Na segunda etapa, foram feitas simulações, para seis meses, considerando a configuração da etapa de validação e utilizando todos os cenários de desmatamento. A distribuição heterogênea do uso da terra induziu à formação de uma célula térmica sobre a região desmatada, que resultou em certa variabilidade espacial da chuva próxima ao setor de desmatamento em todos os cenários. Houve uma pequena mudança na distribuição da chuva ao longo do dia em todos os cenários, e também um pequeno aumento da chuva no período noturno, por volta das 03 UTC. Para os cenários onde houve substituição de floresta por soja, a maior parte da energia disponível foi utilizada nos processos de evaporação e transpiração. Porém, quando a floresta foi substituída pela cultura prescrita originalmente pelo modelo, o comportamento dos fluxos de superfície foi semelhante ao cenário pastagem. Nesse cenário, a energia disponível foi mais utilizada para aquecer a superfície do que nos processos de transpiração e evaporação.

Palavras-Chave: Desmatamento, fluxos de superfície, soja, BRAMS.

ABSTRACT

CABRAL, F. C. **Numerical study on the impacts of pasture and soybean expansion over local circulations in the amazon region. 2008.** 100p. Master Dissertation – Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo, São Paulo, 2008.

The Amazon covers a huge area and is positioned over the tropical region, where energy exchanges between the continental surface and the atmosphere are very intense. The most significant land use change over the region has been the exchange of dense forest by pasture and crops. This work aimed, throughout numerical modeling, evaluate the impacts caused by the land use change over soybean crop and deforested areas for the cattle grazing activity. An adapted version of the soil vegetation atmosphere transfer scheme of the BRAMS model was used in order to reproduce the time evolution of soybean, from the planting up to its harvest. In order to reach the goals of this work, six different deforestation scenarios were created based on previous studies: (i) without any change (Control); (ii) prognoses for the year of 2009 (Pasture 2009 and Soybean 2009); (iii) prognoses for the year of 2025 (Pasture 2025 and Soybean 2025 and generic crop 2025). Initially, two simulations were carried out for sake of model validation, having the Control scenario as land use. The model validation results were very close to observed values. Afterwards, six months period simulations were carried out considering the previously mentioned scenarios. The heterogeneous distribution of land use type induced the formation of a thermal cell over the deforested region, which caused some spatial variability of the precipitation close to the deforestation sector for all scenarios. There was a small change in the precipitation distribution along the day in all scenarios and also a small increase in the precipitation during night time, around 03 UTC. When the scenarios using soybean instead of forest were used, the largest part of the available energy was used for the transpiration and evaporation processes. However, when the scenario using a generic crop was used instead of forest, the surface fluxes behavior was similar to the pasture scenario. In this scenario the energy was most used in the surface heating.

Key words: Deforestation, surface fluxes, soybean, BRAMS.

1 INTRODUÇÃO

As florestas tropicais têm grande importância para o clima regional e global, devido aos fluxos de energia e água da superfície com a atmosfera. Aproximadamente metade da precipitação sobre a Amazônia é originada através da evapotranspiração da própria floresta, enquanto que a outra metade provém do Oceano Atlântico Tropical (NOBRE; SELLERS; SHUKLA, 1991). Nas últimas décadas, porém, o desflorestamento na Amazônia avançou rapidamente. De acordo com a FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*), o desflorestamento está concentrado em países em desenvolvimento, que perderam aproximadamente 62 milhões de hectares. Vários fatores, tais como a expansão da agricultura, a atividade madeireira e a pecuária bovina, foram responsáveis por muitos dos 239 mil km² de florestas derrubadas na América do Sul entre 1980 e 1995. Segundo levantamento do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o desflorestamento na Amazônia foi de 23.750 km² de 2002 a 2003 (cerca de 2,1% a mais do que no período de 2001-2002, período este maior que o de 2000-2001), sendo a região sul-sudeste da Amazônia (Rondônia, Pará e Mato Grosso) a mais afetada (INPE, 2004). A extensão total aproximada da floresta Amazônica é de 5,5 milhões de km² e cerca de 20% de sua área já foi desflorestada. Como pode ser visto na Figura 1, após uma substancial diminuição do desflorestamento no período de 1989 a 1991, houve um brusco aumento no período de 1994-1995. Na segunda metade dos anos 90 a taxa de desflorestamento variou entre 13 mil km² ano⁻¹ em 1996/97 a 18 mil km² ano⁻¹ em 1999/2000. A previsão do INPE para 2006/2007 foi de 11.224 km² ano⁻¹ (Fonte: <http://www.obt.inpe.br/prodes> . Acesso em 25/01/2008).

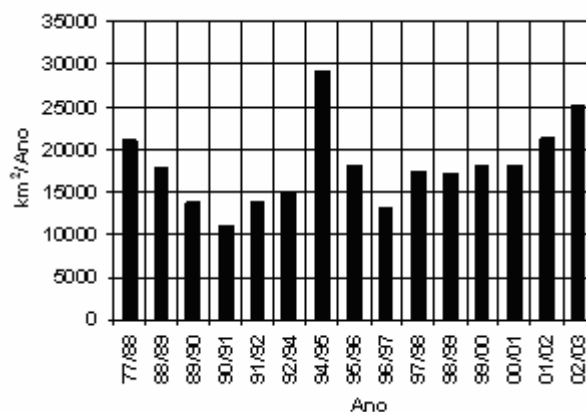


Figura 1 - Taxa média do desflorestamento na Amazônia ($\text{km}^2 \text{ano}^{-1}$) para o período de 1977 à 2003. Fonte: INPE(2004).

A ocupação da Amazônia Legal¹ nos últimos 50 anos ocorreu no contexto de um projeto de integração nacional, que incluiu o estabelecimento dos chamados eixos e pólos de desenvolvimento, a apropriação de terras para projetos agropecuários e a reforma agrária, a mineração (MACHADO, 1998) e, mais recentemente, a produção e a exportação de grãos. Esse projeto integracionista tinha como justificativa a percepção de que a região continuaria estrategicamente vulnerável se permanecesse vazia e subutilizada economicamente. Para acelerar esse processo de ocupação da Amazônia aos centros dinâmicos de desenvolvimento do Brasil, as políticas públicas priorizaram a abertura rápida de fronteiras através da construção de rodovias e de incentivos fiscais. Nas últimas décadas, a pecuária extensiva tornou-se a principal forma de uso da terra na Amazônia, especialmente ao longo das rodovias Belém - Brasília, Cuiabá - Santarém, Cuiabá - Porto Velho, incluindo o sul do Pará, Norte do Mato Grosso e Tocantins. A proporção do desmatamento como função da distância das estradas na Amazônia legal tem, normalmente, padrões exponenciais, ou seja, grande proporção de desmatamento próximo às estradas. Esses padrões já foram observados por diversos estudos realizados na região. Ferreira (2001), encontrou curvas exponenciais do desmatamento em função da distância das estradas (Figura 2). Nepstad et al. (2001)

¹ Amazônia Legal compreende os atuais estados do Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão (a oeste de 44° W), Mato Grosso, Pará, Rondônia e Tocantins.

demonstraram que três quartos dos desmatamentos entre 1978 e 1994 ocorreram dentro de uma faixa de 100 km de largura ao longo das rodovias BR 010 (Belém - Brasília), BR 364 (Cuiabá - Porto Velho) e PA 150 (Paulo Fonteles) que liga o nordeste ao sudeste do Pará.

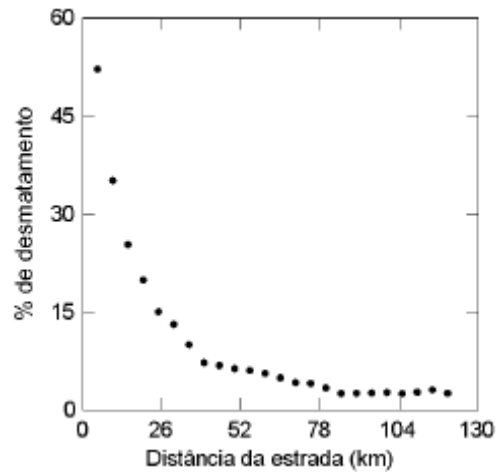


Figura 2 - Proporção do desmatamento em função da distância na Amazônia Legal (obtida de FERREIRA, 2001).

A área cumulativa desmatada na Amazônia legal brasileira chegou a cerca de 650 mil km², em 2003. Esse desmatamento é concentrado ao longo do denominado “arco do desmatamento”, cujos limites se estendem do sudeste do estado do Maranhão, ao norte do Tocantins, sul do Pará, norte do Mato Grosso, Rondônia, sul do Amazonas e sudeste do estado do Acre (Figura 3).

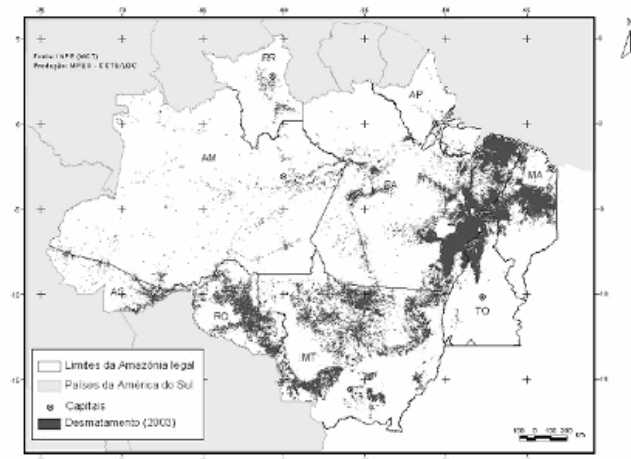


Figura 3 – Área total desmatada na Amazônia legal. Fonte: Ferreira et al. (2005).

1.1 Dinâmica do uso do solo na Amazônia Legal

Nas décadas de 1980 e 1990 repetiu-se, na região tropical do Brasil, o explosivo crescimento da produção ocorrido nas duas décadas anteriores na Região Sul. Em 1970, menos de 2% da produção nacional de soja era colhida no centro-oeste. Em 1980, esse percentual passou para 20%, em 1990 já era superior a 40% e em 2003 ficou próximo dos 60%. Essa transformação promoveu o Estado do Mato Grosso, de produtor marginal a líder nacional de produção e de produtividade de soja, com boas perspectivas de consolidar-se nessa posição. (Fonte: <http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm>. Acesso em 25/01/2008).

Vários agricultores e cientistas ambientais têm salientado que grandes extensões de terra ociosas e não produtivas (como pastagens) ou menos lucrativas na Amazônia Legal estão sendo convertidas em cultivos de soja. No ano de 2004, cerca de 41% do valor de toda a produção agrícola nacional derivou da soja, e foi também a cultura com maior área plantada com cerca de 22 milhões de hectares, (Fonte: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 25/01/2008).

O processo de desmatamento normalmente começa com a abertura oficial ou clandestina de estradas que permitem a expansão humana e a ocupação irregular de terras à exploração predatória de madeiras nobres. As áreas florestais são desmatadas através dos processos denominados “broca e derruba”, atividades que, segundo Castro et al. (2002) vêm sofisticando suas técnicas, fator que acelera a abertura de novas áreas, inclusive incorporando práticas para despistar o controle das áreas desmatadas via satélite. Posteriormente, converte-se a floresta explorada em agricultura familiar e pastagens para a criação extensiva de gado, especialmente em grandes propriedades, sendo este fator responsável por cerca de 80% das florestas desmatadas na Amazônia legal. Mais recentemente, as pastagens estão dando lugar à agricultura mecanizada, principalmente àquela ligada à cultura de soja (Figura 4). No Estado

do Mato Grosso, há indícios que o prazo de aproximadamente cinco anos entre desmatamento e mecanização - estimado pela maior parte dos observadores - esteja se reduzindo para aproximadamente 2-3 anos. (Grupo de trabalho de florestas, 2004).

Essa dinâmica do desmatamento aponta para o fato de que a soja desloca a pecuária para novas áreas causando um desmatamento adicional. Isso pode ser observado pelo fenômeno da redução do rebanho bovino nos principais municípios produtores de soja, acompanhado por um aumento do rebanho nas regiões limítrofes (Grupo de trabalho de florestas, 2004).



Figura 4 – Etapas do modelo tradicional de ocupação da Amazônia legal: (A) abertura de estradas, (B) extração seletiva de madeiras nobres, (C) pecuária extensiva e (D) agricultura tradicional ou mecanizada. Fonte: Ferreira et al. (2005).

1.2 Cenários futuros para a soja

Dentre os grandes produtores mundiais da oleaginosa, o Brasil figura como o país que apresenta as melhores condições para expandir a produção e prover o esperado aumento da demanda mundial. Com exceção, talvez, da Argentina, que ainda poderá crescer até um máximo de dez milhões de hectares, a área cultivada com soja nos EUA, na China e na Índia,

que juntos com o Brasil produzem mais de 90% da soja mundial, só crescerá se diminuïrem as áreas de outros cultivos, sendo as fronteiras agrïcolas quase ou totalmente esgotadas.

A abertura e a integraçãõ de novas vias de escoamento da produçãõ têm grande influênciã na competitividade da soja no mercado global. A anãlise parcial de fatores limitantes e estïmulos para a futura definiçãõ de cenãrios de expansãõ da soja na regiãõ centro-oeste mostrou que os principais corredores disponïveis para escoamento tornam grandes áreas, em torno de rodovias e vicinais, susceptïveis à conversãõ para cultura da soja. Iniciativas nesse sentido jã estãõ sendo tomadas com a implementaçãõ dos Corredores de Exportaçãõ Noroeste, Centro-Norte, Cuiabã-Santarém e Paranã-Paraguai, integrando rodovias, ferrovias e hidrovias aos sistemas de transporte da produçãõ agrïcola nacional.

Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), em seu primeiro relatãrio de oferta e demanda globais de grãos para a safra 2007/08, o Brasil voltará a liderar as exportações de soja em grãõ, com embarques de 29,69 milhões de toneladas, 18,8% mais que em 2006/07. O complexo soja é formado por soja em grãos, óleo de soja bruto, óleo de soja refinado, farelo de soja e demais óleos e derivados do óleo. De toda soja exportada, 56,4% é exportada na forma de grãos; 30,2% como farelo de soja; 10,8% como óleo de soja bruto; e 2,6% como óleo de soja refinado. A soja responde por 90% da produçãõ de óleo vegetal no Brasil. Isso significa que a indïstria processadora brasileira é fortemente amparada pela cultura da soja, tornando-a promissora para contribuir na produçãõ de biodiesel.

1.3 Características da cultura de Soja

A soja é uma cultura anual, herbãcea, ereta, com 60 a 90 cm de altura. A soja germina quando atinge 50% de umidade e a águã retida no solo apresenta potencial superior a -6,6 atmosferas, desde que exposta a temperaturas favorãveis (25 a 30°C). Da raiz primãria, 4 a 5 dias apõs a sementeira, surgem as primeiras ramificações laterais. A emergênciã da plãntula se

inicia de 5 a 8 dias após a semeadura (CÂMARA et al., 1982*, apud CASTRO e KLUGE, 1999).

O crescimento radicular ocorre durante quase todo o ciclo de vida da planta. A raiz primária cresce em profundidade; as primeiras raízes laterais, durante 40 a 50 dias atingindo 35 a 40 cm de comprimento, e em seguida, curvam-se para baixo aprofundando-se no solo.

Um dia após a emergência, os cotilédones estão totalmente abertos e as folhas primárias são expostas entre o 5º e o 7º dia. A primeira folha abre-se entre 9 a 11 dias, completando sua expansão entre o 15º e o 17º dia (MITCHELL e RUSSEL, 1971*; SUN, 1955*, apud CASTRO e KLUGE, 1999). Dependendo do cultivar, da época de semeadura e das condições climáticas, o florescimento se inicia 40 a 70 dias após a emergência das plântulas (CÂMARA et al., 1982, apud CASTRO e KLUGE, 1999).

A temperatura influencia todas as fases do ciclo vegetativo da soja, sendo considerada ótima entre 25°C e 30°C. Sempre que possível, a semeadura da soja não deve ser realizada quando a temperatura do solo estiver abaixo de 20°C, pois prejudica a germinação e a emergência. A soja apresenta fotossíntese com ciclo de Calvin característico (SHIBLES et al., 1975*, apud CASTRO e KLUGE, 1999).

A Tabela 1 apresenta a duração em dias dos principais estádios fenológicos da soja. O mês de novembro é um período do ano que representa a transição da estação seca para a chuvosa na região da Amazônia Legal. Por esse motivo, esse mês é escolhido por muitos agricultores para o início do plantio da soja.

* Câmara, G.M.S. et al. 1982: Soja: produção, pré-processamento e transformação agroindustrial. In: Governo do Estado de São Paulo, Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia. Série Extensão Agroindustrial, v.7.

* Mitchell, R. L., Russel, W. J., 1971: Root development and rooting patterns of soybeans [*Glycine max* (L.) Merrill] evaluated under field conditions. *Agronomy journal*, v.63, pp.313-316.

* Sun, C.N., 1955: Growth and development of primary tissues in aerated and non-aerated roots of soybean. *Bulletin of torrey botanical club*, v.82, pp. 491-502.

* Shibles, R. et al., 1975: Soybean. In: Evans, L.T. *Crop physiology – some case histories*. Londres: Cambridge University Press, cap 6, 151-189.

Tabela 1- Duração em dias dos principais estádios fenológicos (EF) de alguns cultivares de soja. *Fonte: Peixoto, 2000.*

EF	Normal (12 de novembro)			Tardia (19 de dezembro)			Safrinha (18 de março)		
	IAC-12	IAC-17	IAC-19	IAC-12	IAC-17	IAC-19	IAC-12	IAC-17	IAC-19
S-VE	8	8	8	8	8	8	8	8	8
VE-R1	46	46	46	39	39	39	19	44	52
R1-R3	16	16	16	14	11	18	7	8	14
R3-R5	17	17	17	10	10	11	17	17	18
R5-R7	31	31	35	25	22	35	25	21	24
R7-R8	16	15	24	15	10	18	14	11	14
VE-R7	110	110	114	88	82	103	98	87	108
VE-R8	126	125	138	103	92	121	112	98	122
S-R8	134	133	146	111	100	129	120	106	130

(S) -semeadura	(R3) -início da frutificação
(VE) -emergência	(R4) -frutificação plena
(V1) -primeiro nó	(R5) -início de enchimento dos grãos (granacao)
(Vn) -enésimo nó	(R6) -granacao plena
(R1) -início do florescimento	(R7) -maturidade fisiológica
(R2) -pleno florescimento	(R8) -maturidade a campo

O índice de área foliar (IAF) da soja, necessário para garantir rendimentos elevados da cultura, varia entre 3,5 a 4,5 m² para cada m² de área de solo. O máximo de IAF ocorre no estádio fenológico R5, correspondente ao início da granação, decrescendo a partir daí em decorrência da perda de folhas por senescência (HEIFFIG, 2002).

André e Viswanadham (1983) estudaram uma cultura de soja e observaram que o albedo variou com o desenvolvimento desta, porém se mostrou inversamente relacionado com a altura das plantas. Segundo Fontana et al. (1991), o albedo diário da soja para um IAF variando entre 4,7 e 7,7 (estádios V8 a R6) foi de 0,26. A evolução de alguns componentes do balanço de radiação e do índice de área foliar é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Componentes do balanço de radiação, estágio de desenvolvimento e índice de área foliar da soja.

Data	Estádio	IAF	Rn24h	Rnd	Rs	Rr	a	Rs(1-a)	L24h	Ld
8/1/1986	V8	4,70	9,60	11,30	18,70	-5,40	0,29	13,30	-3,70	-2,10
15/1/1986	V11	5,40	17,10	18,30	27,20	-7,10	0,26	20,10	-3,10	-1,80
22/1/1986	R1	6,10	14,00	15,30	23,30	-5,90	0,25	17,50	-3,50	-3,00
30/1/1986	R2	7,20	5,50	6,10	10,00	-2,70	0,27	7,30	-1,80	-1,10
5/2/1986	R2	7,40	16,20	17,50	26,50	-7,20	0,27	19,40	-3,20	-1,90
14/2/1986	R3	7,50	13,30	14,40	23,20	-5,60	0,24	17,60	-4,30	-3,10
19/2/1986	R4	7,60	14,30	16,40	26,60	-6,90	0,26	19,70	-5,40	-3,10
25/2/1986	R5	7,70	10,70	11,30	18,50	-5,00	0,27	13,50	-2,80	-2,20
21/2/1986	R5	5,50	10,50	12,20	17,90	-4,60	0,26	13,30	-2,80	-1,20
5/4/1986	R6	6,30	7,70	8,80	13,90	-2,90	0,22	10,80	-3,40	-2,30

IAF – índice de área folia; Rn24h – saldo de radiação das 24 horas ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$); R_{nd} – saldo de radiação diurno ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$); R_s – radiação solar global ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$); R_r – radiação de ondas curtas refletida ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$); a – albedo; L_{24h} – saldo de radiação de ondas longas das 24 horas ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$); L_d – saldo de radiação de ondas longas diurno ($MJ.m^{-2}.dia^{-1}$). Fonte: Fontana et al. (1991).

Dentro do Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (Large-Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia - LBA), Heil et al. (2007) realizaram alguns estudos no sentido de implementar a cultura da soja em um sub-modelo de superfície IBIS (Integrated Biosphere Simulator) acoplado a um modelo de circulação geral da atmosfera CCM3 (Community Climate Model version 3). A calibração do sub-modelo foi feita com base em dados observacionais de uma torre micrometeorológica instalada em Paragominas, leste da Amazônia. A Figura 5 ilustra a variação sazonal do albedo e do índice de área foliar (IAF).

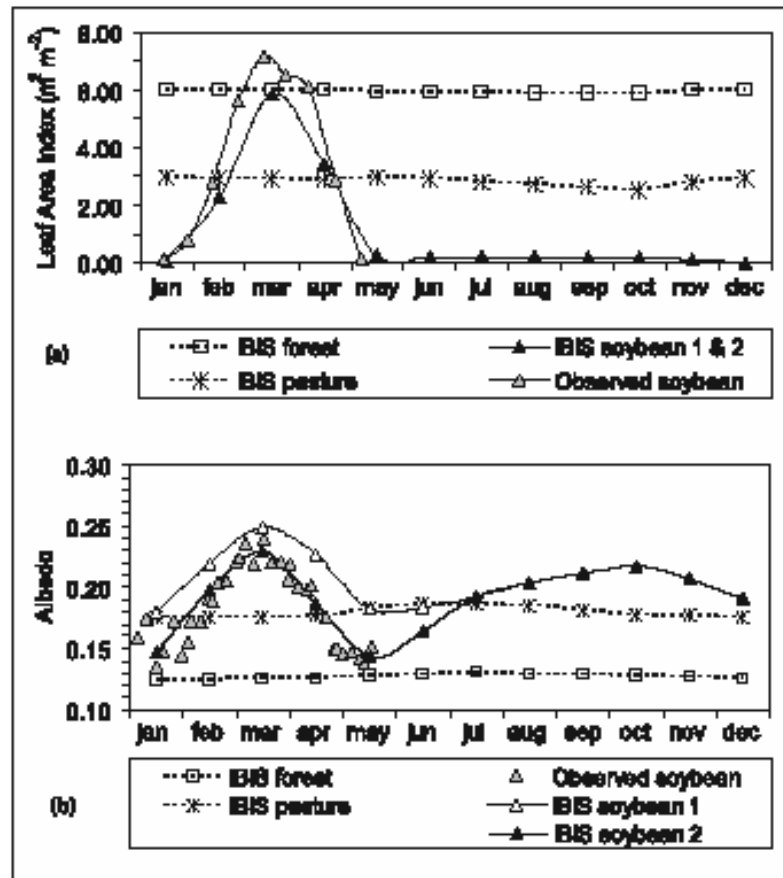


Figura 5 – Variação Sazonal do IAF e do albedo para a cultura de soja. Fonte: Heil et al. (2007).

1.4 Estudos Numéricos sobre a mudança no uso do solo

A superfície terrestre e a atmosfera nos trópicos formam um sistema fortemente acoplado. Os fluxos de superfície definem as entradas e saídas de água e energia na baixa atmosfera e dependem, principalmente, da oferta de radiação, da umidade do solo, da evapotranspiração, da cobertura vegetal e da nebulosidade, além das propriedades dinâmicas e termodinâmicas da camada limite planetária (LBA, 1996). O desmatamento e as alterações no uso do solo modificam as interações físico-químicas entre o solo, a vegetação e a atmosfera.

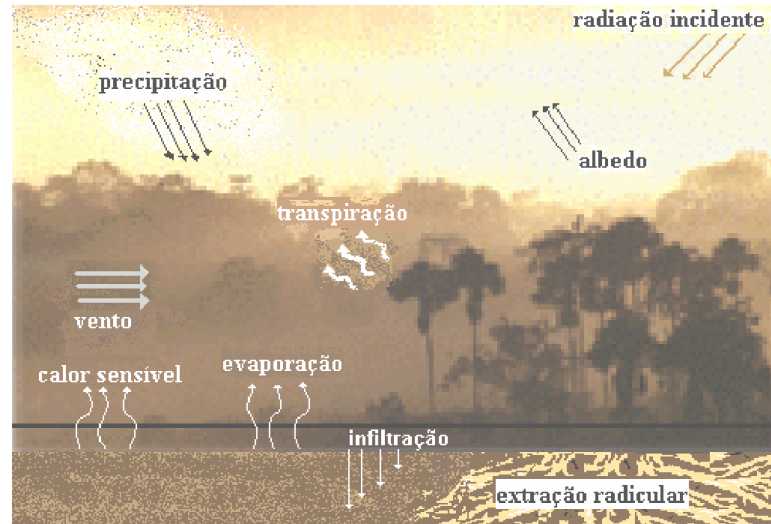


Figura 6 – Diagrama esquemático das interações solo-biosfera-atmosfera (fonte: BRUNO, 2004.)

Vários estudos através do uso de modelos numéricos de circulação geral têm avaliado o impacto da substituição total da floresta amazônica por pastagem. Nobre et al. (1991) utilizaram um modelo realístico de acoplamento atmosfera-biosfera, o qual foi integrado para um ano considerando uma representação da floresta tropical Amazônica e, em seguida, para um ano com floresta substituída por pastagem degradada. Dentre os resultados encontrados destacaram-se o aumento de 1 a 3 °C na temperatura da superfície na área desflorestada e diminuição de 20 a 30% na precipitação. Manzi e Planton (1996) mostraram um enfraquecimento do ciclo hidrológico e uma amplificação do ciclo diurno da temperatura de superfície quando comparada com a simulação de controle. De uma forma geral, os resultados apontam para o aumento da temperatura da superfície do ar e a diminuição da precipitação e da evapotranspiração sobre a região.

Heil et al. (2007) utilizaram o modelo atmosfera-biosfera CCM3-IBIS (DELIRE et al., 2002) para avaliar o impacto causado pela substituição total da floresta amazônica pelo cultivo da soja. Os autores mostram que a diminuição na precipitação é mais significativa depois da expansão da soja quando comparada à expansão da pastagem. Segundo os autores,

o principal responsável por essa anomalia é o albedo da soja que, dependendo da fase de crescimento da cultura, pode ser de 24 a 26%.

O aquecimento diferencial da camada limite planetária, devido à heterogeneidade da superfície, pode gerar circulações atmosféricas em diferentes escalas espaciais e temporais. Em mesoescala, brisas marítimas e lacustres produzidas pelo gradiente térmico entre o continente e corpos d'água adjacentes são exemplos interessantes desse tipo de circulação. Heterogeneidades naturais ou artificiais existentes na superfície, cujas propriedades térmicas e radiativas de uma localidade diferem daquelas ao seu redor, podem também produzir gradientes horizontais de temperatura e de pressão intensos o suficiente para gerar e manter circulações de mesoescala de maneira similar (SEGAL e ARRIT, 1992). Estudos numéricos com modelos de mesoescala (regionais) têm mostrado que as heterogeneidades nos fluxos turbulentos de calor sensível e de calor latente podem produzir fortes circulações de mesoescala (SILVA DIAS e REGNIER, 1996; AVISSAR e LIU, 1996; AVISSAR e SCHMIDT, 1998; WANG et al., 1996, 1998). Essas circulações afetam de maneira significativa a estrutura da CLP, os fluxos de calor e de umidade (LI e AVISSAR, 1994; LYNN et al., 1995; DALU et al., 1996; CHEN e AVISSAR, 1994a), e a organização de nuvens e precipitação (CHEN e AVISSAR, 1994b; WETZEL et al., 1996; WANG et al., 2000, SILVA DIAS et al., 2002). No leste da Amazônia foram observados importantes aspectos do processo de desmatamento, ressaltando efeitos que não foram anteriormente simulados em modelos de Circulação Geral. Ao contrário de estudos com modelos de grande escala, o desmatamento dessa região não provoca uma diminuição generalizada na precipitação (GANDU et al., 2004).

Correia (2005) mostrou que para um cenário de desflorestamento atual com substituição da floresta Amazônica por pastagem, o aumento da convergência de umidade sobrepujou a redução na evapotranspiração, conduzindo a um aumento na precipitação. Para um cenário

onde o desflorestamento foi maior, houve um aumento na convergência de umidade, porém, a redução na evapotranspiração foi mais significativa, conduzindo a um déficit de precipitação na região, principalmente na estação seca.

Rosolem (2005) estudou o desflorestamento ao longo da rodovia Cuiabá-Santarém (BR-163) e mostrou que a distribuição heterogênea do uso da terra induziu à formação de uma célula térmica sobre a região desmatada, o que resultou em certa variabilidade espacial da chuva. A posição da faixa de desmatamento, que fica ao longo da rodovia BR-163, e a circulação de grande escala deslocaram a célula térmica levemente para oeste, onde ocorreu aumento da precipitação. A leste, e sobre o setor central do desmatamento, houve redução da precipitação.

De uma forma geral, os resultados mostram que, em simulações de mais alta resolução, a topografia, o litoral e os sistemas de grandes rios têm um importante papel nos padrões anômalos de precipitação.

1.5 Objetivos

A forma mais detectável de mudanças do uso da terra na Amazônia tem sido a conversão de florestas de dosséis fechados em campos de pastagens e de cultivos. Diante das modificações que vêm ocorrendo nos usos da terra na Amazônia brasileira, algumas questões são levantadas, tais como: “quais os efeitos causados pela modificação na ocupação do solo sobre as condições atmosféricas na região amazônica? ”; “quais os efeitos sobre os balanços de energia e água na superfície?”. Uma outra questão é a consideração de um panorama mais realista da cobertura vegetal para a Amazônia e, conseqüentemente, a verificação dos efeitos detectados.

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho é explorar os possíveis impactos causados pela modificação na ocupação do solo sobre as condições atmosféricas na região

amazônica. Em particular, os efeitos nos fluxos de superfície e na precipitação sobre a cultura de soja e nas áreas desmatadas para a atividade da pecuária.

Como objetivos específicos:

- Criação de arquivos de ocupação do solo (cenários de desmatamento) para representação da região de estudo.

- Implementar no modelo numérico a evolução temporal da cultura de soja, desde o plantio até a colheita.

2 DESCRIÇÃO DO MODELO, CENÁRIOS UTILIZADOS E VALIDAÇÃO

Neste capítulo será apresentada uma breve descrição do modelo numérico BRAMS, destacando algumas das parametrizações disponíveis no código. Também são apresentados alguns detalhes sobre a implantação de parâmetros para representação da cultura de soja no módulo de interação solo-vegetação-atmosfera e dos cenários criados para a avaliação dos impactos causados pela mudança no uso do solo e, finalmente, o resultado das simulações utilizadas para a validação do modelo.

2.1 Modelo Numérico

O modelo atmosférico utilizado para avaliar os possíveis impactos decorrentes das mudanças na cobertura vegetal da região Amazônica é o *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS, PIELKE et al., 1992, COTTON et al., 2003), desenvolvido inicialmente pela Universidade do Estado do Colorado – EUA e pela MRC/*ASTER, com algumas adaptações realizadas por pesquisadores brasileiros para adequá-lo às condições observadas na região tropical. Esta versão vem sendo tratada como BRAMS e, neste trabalho, foi utilizada a sua versão 3.2. O BRAMS é um modelo numérico de múltipla finalidade, designado para simular circulações atmosféricas que vão desde a micro até a grande escala. Sua mais freqüente aplicação é na simulação de fenômenos atmosféricos de mesoescala (com escalas horizontais da ordem de 2 a 2000 km) com o objetivo de fornecer tanto informações de previsão de tempo operacional quanto suporte à pesquisa.

O BRAMS baseia-se no conjunto completo de equações que governam a evolução do estado atmosférico, baseadas nas leis de movimento de Newton e na termodinâmica de um fluido, incluindo parametrizações dos diversos processos físicos presentes nestas equações. Possui um esquema de aninhamento múltiplo de grades que permite que as equações do modelo sejam resolvidas simultaneamente sob qualquer número de grades computacionais

com diferentes resoluções espaciais. Grades de maior resolução (menores) são utilizadas para modelar detalhes dos sistemas atmosféricos de menor escala, tais como escoamento sobre terrenos complexos e circulações termicamente induzidas pela superfície. Já as de menor resolução (maiores) são utilizadas para modelar o ambiente destes sistemas menores, fornecendo assim as condições de fronteira para as grades mais finas. Além disso, as grades de menor resolução são utilizadas para modelar os sistemas atmosféricos de larga escala, os quais interagem com os sistemas de mesoescala resolvidos nas grades mais finas.

Além do módulo atmosférico, o BRAMS possui um modelo de análise isentrópica denominado ISAN (*ISentropic ANalysis package*) que permite a assimilação de dados de modelos globais e dados observacionais de superfície e de ar superior, para serem utilizados como condições iniciais e de contorno. Para a assimilação de dados de estações de superfície e de sondagens, o BRAMS utiliza um método de análise objetiva, baseado no trabalho de Barnes (1964).

A configuração de cada simulação com o BRAMS é feita através de um arquivo do tipo lista de variáveis, chamado RAMSIN, que é dividido em cinco partes. Na primeira parte são definidos o tamanho de cada grade e suas localizações, o número de grades, o número de pontos de grade e o espaçamento horizontal, o número de níveis verticais e de camadas de solo e o espaçamento vertical e tempo de simulação. Na segunda parte são definidos o tipo de condição inicial, homogênea (através do uso de uma sondagem) ou heterogênea (através do uso de análises como as fornecidas pelo CPTEC, AVN ou pelo NCEP), parâmetros relacionados com o *nudging* vertical e horizontal, frequência de geração de arquivos de saída, os arquivos de topografia, ocupação do solo e temperatura da superfície do mar. Na terceira parte são definidas as opções físicas e numéricas do modelo, tais como o tipo de condição de fronteira lateral, os parâmetros de radiação, convecção, difusão turbulenta e modelo de solo e microfísica. A quarta parte é destinada para a inclusão de sondagens no caso de condição

inicial homogênea. A quinta parte está relacionada com a impressão de resultados para verificação durante a simulação.

2.2 Parametrização da difusão turbulenta

O BRAMS possui 4 formas distintas de parametrização da difusão turbulenta. A escolha da opção mais apropriada passa pela relação entre as escalas horizontal e vertical do modelo, dentre outros requisitos. A primeira opção é baseada na formulação de Smagorinsky (1963) para os coeficientes de difusão horizontais. Segundo essa formulação, os coeficientes de difusão são calculados como o produto da taxa de deformação horizontal (gradientes horizontais da velocidade do vento) e do quadrado da escala de comprimento. A escala de comprimento é o produto do espaçamento de grade horizontal por um fator de multiplicação que depende das dimensões da grade utilizada. Esse fator tem o objetivo de filtrar ondas com comprimentos de ondas inferiores a pelo menos duas vezes o espaçamento da grade os quais não são bem resolvidos pelo esquema numérico. Nessa opção, a difusão vertical é parametrizada seguindo o esquema de Mellor e Yamada (1982) através da energia cinética turbulenta prognosticada pelo modelo. A segunda opção difere da primeira apenas na parametrização vertical, onde é usado o análogo unidimensional do esquema de Smagorinsky. A deformação vertical é obtida dos gradientes verticais do vento horizontal (cisalhamento vertical) e a escala de comprimento é o espaçamento vertical local multiplicado por um fator que desempenha o mesmo papel daquele utilizado no primeiro esquema. As opções descritas acima são apropriadas para situações onde o espaçamento horizontal da grade é muito maior que na vertical, tal que os movimentos convectivos dominantes não sejam resolvidos.

Algumas modificações nos coeficientes de difusão verticais devido à estabilidade estática são utilizados, baseados nas formulações de Lilly (1962) e Hill (1974). A modificação de Lilly é na forma de um fator de multiplicação que depende do número de Richardson (Ri) e da razão entre os coeficientes de difusão de temperatura e momento na vertical. Este fator é

maior que 1 em casos instáveis e menor em casos estáveis. A modificação de Hill aplica-se somente em regiões de lapse-rate instáveis e consiste da adição do valor absoluto do quadrado da frequência de Brunt-Vaisala à taxa de deformação, para obter uma escala de tempo modificada para o cálculo dos coeficientes de difusão. Na terceira opção, os coeficientes de difusão na horizontal e na vertical são calculados como um produto entre o tensor tensão de cisalhamento em três dimensões e o quadrado da escala de comprimento. A quarta opção utiliza o esquema de Deardorff (1980) e faz uso da energia cinética turbulenta para o cálculo dos coeficientes de difusão horizontal e vertical. Este esquema é destinado somente para a finalidade específica de simulações de grandes turbilhões os quais consideram que os movimentos turbulentos resolvidos pelo modelo realizam a maior parte de transporte turbulento.

2.3 Parametrização de cumulus

A parametrização de cumulus, ou parametrização convectiva, é usada para redistribuir verticalmente calor e umidade em uma coluna da grade quando o modelo gera uma região convectivamente instável e quando a resolução horizontal é muito pequena para o modelo gerar sua própria circulação convectiva. A parametrização de cumulus original do modelo é a forma generalizada de Kuo (1974), descrita por Molinari (1985). Este esquema assume que a convecção age no sentido de consumir a instabilidade convectiva fornecida pelas escalas maiores.

Outro esquema para parametrizar a convecção, não disponível em versões anteriores do modelo RAMS, foi desenvolvido por Grell (1993) e foi concebido de forma a se evitar fontes primárias de erros. Neste fechamento, as nuvens são representadas por duas circulações estacionárias, provocadas por correntes ascendentes e descendentes. Não há mistura direta entre o ar da nuvem e do ambiente, exceto no topo e na base da mesma. O modelo de nuvens utilizado para calcular as propriedades deste esquema é formulado com um número reduzido

de equações. O fluxo de massa é assumido constante com a altura e não se consideram o entranhamento e o desentranhamento ao longo das laterais da nuvem.

A partir do balanço de umidade das correntes ascendentes é possível calcular a razão de mistura dentro da nuvem supondo saturação. Além disso, pode-se estimar a condensação e a evaporação. Este modelo pressupõe que não há água de nuvem, sendo toda a água líquida convertida em chuva.

Idealmente, para se resolver uma célula convectiva são necessários alguns pontos de grade para expandir horizontalmente uma corrente ascendente, sendo que uma convecção profunda exige uma célula de 1 ou 2 quilômetros no mínimo. As parametrizações convectivas disponíveis assumem que a célula de grade tem tamanho horizontal de 20 quilômetros ou mais. Isso significa que o esquema convectivo pode ser ativado para grades com essa resolução, mas não existe nenhum ajuste adequado para resoluções entre 2 e 20 quilômetros.

2.4 Parametrização da radiação

O BRAMS possui três conjuntos de esquemas radiativos: O esquema mais simples e com menor custo computacional baseado em Mahrer e Pielke (1977), o esquema descrito por Chen e Cotton (1983) e o mais complexo descrito por Harrington (1997). O esquema Mahrer e Pielke possui a vantagem de ser bastante eficiente para a execução, entretanto, esse esquema não inclui o efeito de nuvens. Em simulações em que nuvens não estão presentes, este procedimento é o mais indicado, caso contrário, o esquema Chen e Cotton deve ser utilizado. O esquema de radiação de onda curta de Mahrer e Pielke é um esquema simples que leva em consideração o espalhamento por oxigênio, ozônio e dióxido de carbono de maneira empírica e trata a absorção por vapor d'água. Efeitos da topografia também são levados em conta nesse esquema. Para a radiação de onda longa o esquema Mahrer e Pielke leva em consideração a emissão e absorção infravermelha do dióxido de carbono e do vapor d'água, mas não trata nuvens ou material condensado de maneira alguma. O esquema Chen e Cotton para a radiação

de onda curta é uma solução completa da equação de transferência radiativa. Para a radiação de onda longa o esquema Chen e Cotton é um esquema de 3 bandas que, da mesma maneira que o esquema de onda curta, parametriza os efeitos das nuvens. O terceiro esquema é o de Harrington, sendo mais completo que os demais. Neste esquema são consideradas as diferentes fases da nuvem (diferenciando o efeito se houver somente água ou se houver gelo), também considera um perfil de ozônio que terá efeito na absorção da radiação solar. Teoricamente o esquema de Harrington é mais eficiente, entretanto, tem um custo computacional maior.

2.5 Parametrização da microfísica

Desde a versão 4.3 do RAMS, foi desenvolvido um código microfísico global (*bulk*) descrito em Walko et al. (1995) que é uma generalização das versões anteriores e pode tratar vapor d'água, chuva, *pristine*, gelo, neve, agregados, *graupel* e granizo como uma distribuição gama generalizada. Esse esquema leva em conta a nucleação homogênea e heterogênea de *pristine* de gelo e a conversão entre as categorias de *pristine* grande e pequeno, resultante da deposição de vapor ou sublimação. Uma nova rotina de sedimentação permite velocidades de queda diferenciais baseadas na distribuição gama de tamanhos.

As gotículas de nuvem e gotas de chuva, líquidas, podem ser super-resfriadas. Assume-se que o gelo recente, a neve e os agregados são completamente congelados, ao passo que a saraiva e o granizo são categorias bifásicas, podendo consistir de gelo apenas ou de mistura entre gelo e líquido. À exceção das gotículas de nuvem, todas as categorias são capazes de “cair”. As gotículas de nuvem e o gelo recente são as únicas categorias que sofrem nucleação a partir do vapor. As demais se formam a partir de hidrometeoros pré-existentes; uma vez formadas, porém, podem crescer por deposição do vapor. Este crescimento é o único permitido para o gelo recente. O gelo recente se refere aos cristais relativamente pequenos, enquanto que os maiores cristais são considerados neve.

Esta categoria engloba os cristais de gelo que crescem por deposição do vapor e adesão. Os agregados são definidos como partículas de gelo formadas por colisão e coalescência de gelo recente, neve ou outros agregados. O gelo recente, a neve e os agregados são hidrometeoros de baixa densidade. Considera-se saraiva como um hidrometeoro de forma aproximadamente esférica, de densidade média e formada por intensa adesão e fusão parcial do gelo recente, neve e agregados. É permitida à saraiva apenas uma pequena percentagem de água líquida: caso se torne muito elevada, o hidrometeoro é considerado granizo. O granizo é classificado como hidrometeoro de densidade elevada, esférico e formado pelo congelamento das gotas de chuva ou por adesão ou fusão parcial da saraiva.

O modelo de nuvens determina a evolução dos hidrometeoros em uma grande variedade de condições de modo a representar a micro-estrutura dos sistemas de nuvem. Este esquema representa o tamanho do hidrometeoro para cada classe com uma função de distribuição, exponencial ou do tipo gama, acarretando um número reduzido de variáveis prognósticas. Expressões simplificadas descrevem todas as interações entre cada categoria de hidrometeoro que resulta da integração do espectro.

2.6 Parametrização da vegetação

Para a condição de fronteira inferior, como esquema de interação solo-vegetação-atmosfera, o BRAMS utiliza o LEAF (*Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model*, WALKO et al., 2000). Alguns aspectos sobre o LEAF serão apresentados a seguir. Maiores detalhes podem ser encontrados em Walko et al. (2000) e Freitas (2003).

O LEAF constitui-se da representação dos aspectos da superfície, incluindo vegetação, solo, lagos e oceanos e suas influências uns sobre os outros e sobre a atmosfera. Inclui equações prognósticas para: temperatura do solo e umidade em múltiplas camadas; temperatura da vegetação e água na superfície - incluindo orvalho e precipitação interceptada e energia termal para múltiplas camadas; e temperatura e razão de mistura do vapor d'água do

ar do dossel. Os termos de troca nestas equações prognósticas incluem trocas turbulentas, condução de calor, difusão de água e percolação nas camadas do solo, transferências radiativas de onda curta e onda longa, transpiração e precipitação. Um dos aspectos importantes do LEAF é sua habilidade em representar variações de escala fina nas características da superfície, tais como tipo de vegetação, inclinação do terreno, tipo de solo e umidade e corpos d'água, os quais freqüentemente variam consideravelmente sobre curtas distâncias horizontais. Cada tipo de superfície responde às influências da atmosfera adjacente de uma maneira própria.

O módulo permite a coexistência de múltiplos tipos de superfície dentro de uma única célula de grade, resolvida numa coluna de ar, através da definição de *patches*. Cada tipo de superfície ou *patch* consiste de sua própria vegetação, camadas de solo e ar do dossel (exceto para corpos d'água) sendo as variáveis prognósticas evoluídas para todos estes componentes pelo *patch*. Nessa aproximação, todos os *patches* interagem com a mesma coluna de ar, cada um de acordo com a sua cobertura fracional. Um benefício óbvio desta aproximação é a habilidade em representar vários tipos de superfície (floresta, grama, solo nu) dentro de uma mesma célula de grade. Cada tipo de superfície ocupa uma fração da grade e é tratado separadamente. Esse procedimento leva em conta a contribuição de cada tipo de superfície em vez de considerar um tipo predominante em cada célula de grade. Outro benefício é a habilidade de tratar unicamente para cada *patch* a precipitação simulada atingindo o solo. Por exemplo, chuva ou neve freqüentemente escorrem em áreas inclinadas e se acumulam em vales antes de percolarem dentro do solo. Parte da umidade que percola nas áreas inclinadas, freqüentemente tende a escoar levemente dentro da camada de solo. Isto leva a uma secagem relativa do solo em algumas áreas e umedecimento em outras, sobre escalas de comprimento horizontal que incluem a escala sub-grade. O efeito resultante sobre os fluxos de calor e umidade para a atmosfera pode ser bastante diferente do caso de percolação uniforme. Em

ambos os exemplos, respostas não lineares da vegetação para o *patch* na umidade do solo e nos fluxos radiativos podem complicar ainda mais a interação entre atmosfera, solo e ecossistema.

O solo é subdividido em vários níveis verticais para representar a variabilidade vertical. Cada camada tem normalmente de 4 a 20 cm de espessura, havendo uma representação total de 1 m de espessura ou mais, dependendo do tipo de cobertura vegetal. A energia interna e o conteúdo de umidade são prognosticados em cada camada de solo.

A versão do LEAF atualmente utilizada no BRAMS 3.2 é a 3. A principal diferença entre as versões anteriores do LEAF e a versão atual é a inclusão do índice de vegetação normalizado (NDVI) para a definição dos parâmetros da vegetação. Isto permite uma variação sazonal das propriedades da vegetação, aspecto não considerado anteriormente.

Para a definição dos parâmetros da vegetação, o LEAF-2, por exemplo, utilizava uma associação entre o BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme, DICKINSON et. al., 1986) e os parâmetros fornecidos pelo *NASA/Land Data Assimilation Systems* (NASA/LDAS). Na versão LEAF-3, assim como no modelo SIB2 (SELLERS et al., 1996), o NDVI é utilizado para o cálculo de alguns parâmetros relacionados à vegetação, tais como, fração da radiação fotossinteticamente ativa (FPAR), índice de área de folhas verdes, (GLAI, *green leaf area index*), índice de área total (TAI, *total area index*), comprimento de rugosidade (z_0). Além disso, a dependência do albedo e da transmissividade da vegetação ao GLAI e TAI, como descrito no SIB2, é combinada com a formulação anteriormente utilizada no LEAF-2 para a obtenção de expressões para o albedo e cobertura fracional da vegetação como uma função de GLAI, TAI e as classes do LEAF-3.

O conjunto de classes existentes (BATS, LDAS e SIB2) foi reduzido para formar 21 classes, combinando classes aparentemente repetidas ou similares. Os documentos do GEF (*The Global Ecosystems Framework*, OLSON, 1994), com suas referências cruzadas entre as

tabelas de Olson, BATS e SiB2 foram utilizados com um guia para a combinação das classes de uso do solo entre BATS, LDAS e SiB2. As classes de uso do solo utilizadas no LEAF-3 podem ser vistas em Walko e Tremback (2005) ou no arquivo RAMSIN (*namelist* para execução do BRAMS).

2.7 Modificação dos parâmetros da vegetação e Implantação da soja no sub-modelo LEAF-3

O sub-modelo LEAF-3 é uma representação da camada de superfície fundamentalmente comprometida com uma descrição realista da biosfera sob os aspectos físicos e biológicos. O módulo requer que se prescreva, para cada ponto de grade, os parâmetros biofísicos da superfície, admitidos como uma representação média do tipo de vegetação (bioma) e solo na área associada a grade. Cada conjunto especificado desses parâmetros, para cada tipo de bioma, pode variar em termos sazonais, no mínimo mensalmente.

O ajuste dos parâmetros do tipo de vegetação utilizados no LEAF-3 é importante para a reprodução adequada do ciclo diurno e sazonal da temperatura, umidade e vento em superfície, e dos fluxos de momentum, água e energia. De maneira geral, os trabalhos científicos decorrentes dos projetos internacionais ABRACOS (*Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study*, GASH et al., 1996) e LBA (LBA, 1996) apresentaram contribuições para a determinação destes parâmetros, para a floresta tropical amazônica e para o ecossistema de pastagem. Com base nestas informações, foram prescritos valores médios representativos dos parâmetros dos biomas neste estudo, substituindo os valores prescritos na versão corrente (Tabela 3).

Tabela 3 - Parâmetros biofísicos modificados para Floresta e Pastagem. Fonte: Rosolem*, 2005.

Parâmetro	Floresta*						Pastagem*					
	nov	dez	jan	fev	mar	abr	nov	dez	jan	fev	mar	abr
Albedo	0,135	0,134	0,128	0,122	0,121	0,121	0,177	0,18	0,175	0,171	0,181	0,184
Altura do dossel (m)	32	32	32	32	32	32	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Profundidade de raízes (m)	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1
Índice de Área Foliar da vegetação	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	2,6	2,8	2,8	2,5	2,2	1,9
Cobertura de vegetação (verde)	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,69	0,79	0,98	0,98	0,443	0,98
Comprimento de rugosidade (m)	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

Embora o LEAF-3 possua uma representação da superfície para um determinado tipo de cultura com ciclo de Calvin característico (Tabela 4), além de não possuir parâmetros característicos da soja, esta não expressa a evolução temporal dessa cultura. Dessa forma, o sub-modelo LEAF-3 foi modificado para representar um novo tipo de cobertura vegetal, a soja, desde o plantio até a colheita.

A parametrização foi baseada em dados coletados de uma torre micrometeorológica situada em uma plantação de soja no leste da Amazônia (HEIL et al., 2007), na cidade de Paragominas. Embora a maior parte da expansão da cultura da soja se localize no norte do Mato Grosso e Rondônia, este é o único experimento disponível na Amazônia e, portanto, a melhor referência para a região. A Figura 7 apresenta a evolução dos parâmetros modificados de acordo com ciclo da soja.

Tabela 4 - Parâmetros biofísicos para cultura genérica. (BRAMS)

Parâmetro	Cultura
	Média de novembro a abril
Albedo	0,19
Altura do dossel (m)	1,00
Profundidade de raízes (m)	0,5
Índice de Área Foliar da vegetação	0,90
Cobertura de vegetação (verde)	0,64
Comprimento de rugosidade (m)	0,0095

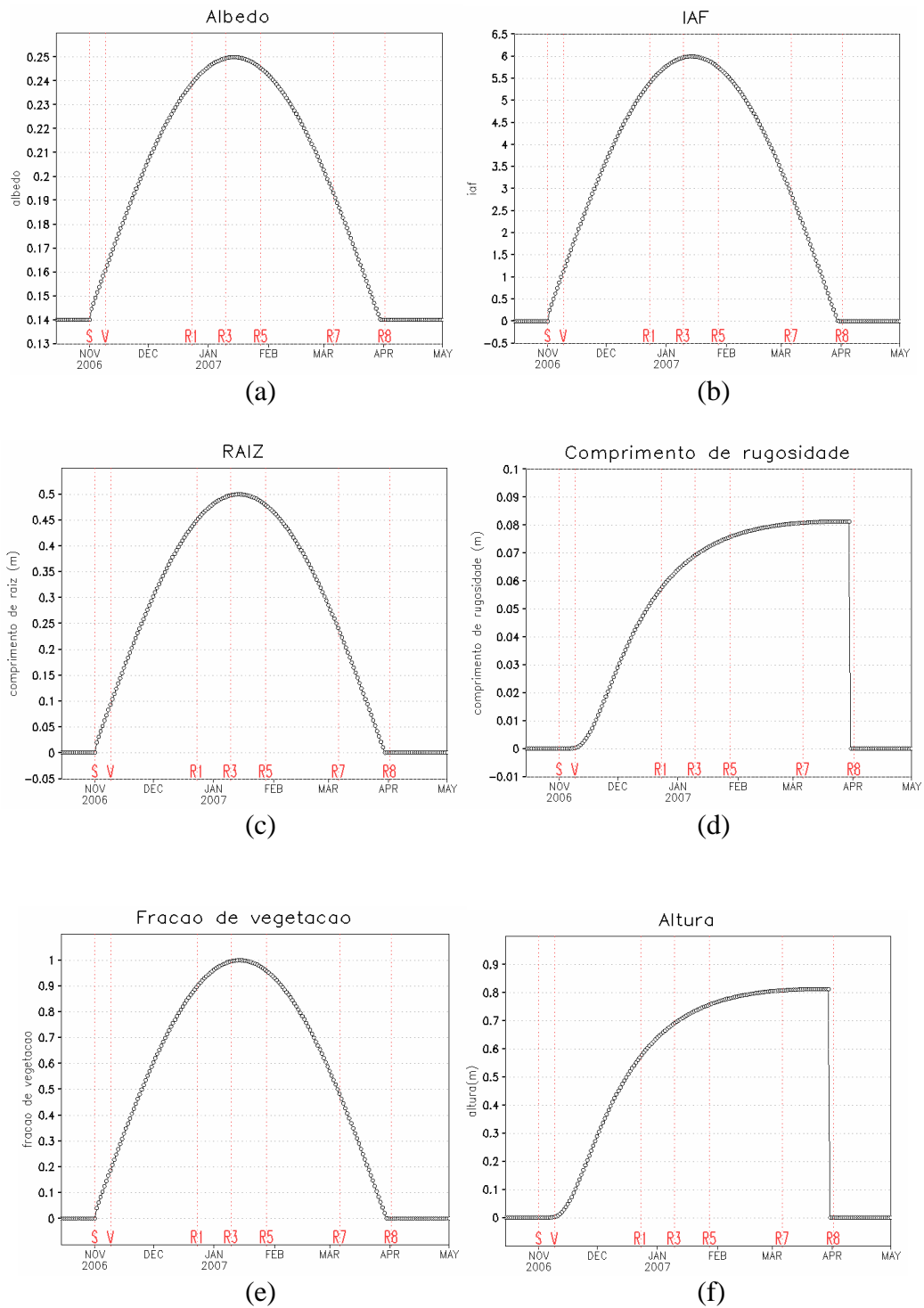


Figura 7 – Evolução dos parâmetros (a)-albedo, (b)-índice de área foliar, (c) comprimento de raiz, (d)-comprimento de rugosidade, (e)-fração de cobertura vegetal e (f)-altura do dossel para a soja.

2.8 Topografia e umidade inicial do solo

O solo foi definido com 10 camadas, estando a mais profunda a 6 m da superfície (Figura 8). Os valores iniciais de umidade do solo foram distribuídos horizontalmente de forma homogênea e forçados sob uma condição de equilíbrio vertical do potencial total de água no solo (H) no instante inicial, ou seja $[(\partial H / \partial z)_{t=0} = 0]$, como descrito em Rocha (1998). Basicamente a idéia é forçar um equilíbrio do potencial total de água no solo no instante inicial, o que poderia em tese anular os gradientes verticais. A prescrição da umidade do solo na camada superficial do modelo foi baseada em valores médios representativos da estação chuvosa, segundo Bruno (2004).

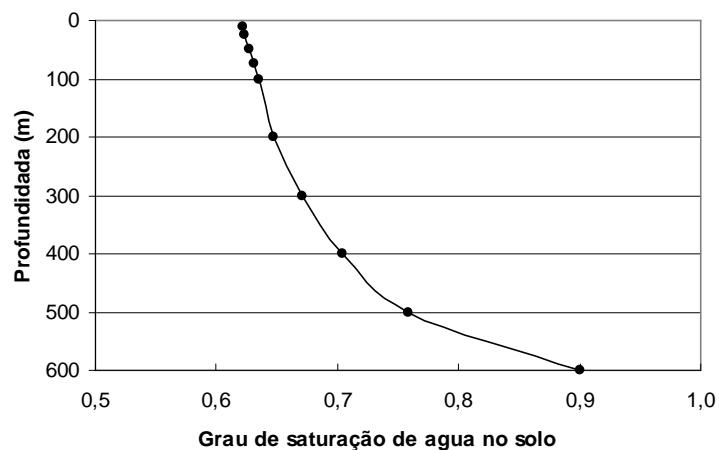


Figura 8 - Perfil inicial do grau de saturação de água no solo.

A topografia do modelo foi definida pelos dados globais disponibilizados pela *United States Geological Survey's (USGS) Earth Resources Observation System (EROS)*. A topografia para região de estudo é mostrada na Figura 9.

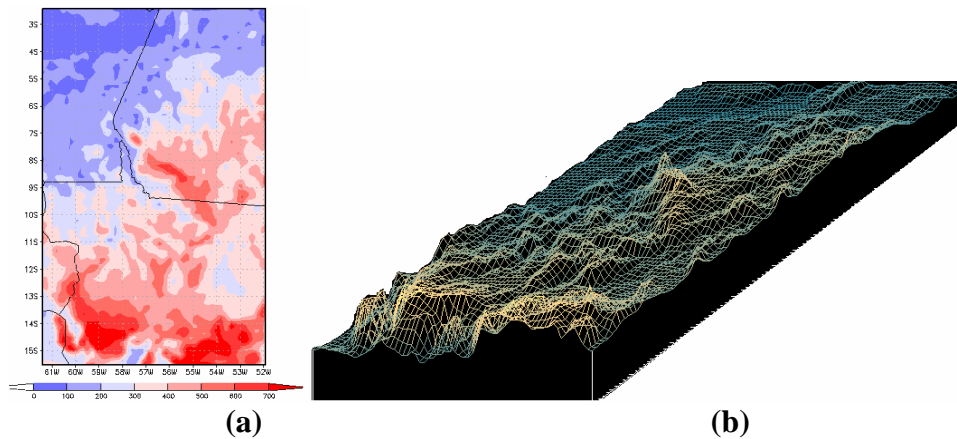


Figura 9 – Topografia da região em 2 dimensões (a) e em 3 dimensões (b).

2.9 Esquema ilustrativo do BRAMS

A Figura 10 apresenta de forma resumida algumas das opções numéricas e físicas do modelo BRAMS descritas anteriormente.

Uma das opções de definição da condição inicial do modelo é através de dados de reanálise, indicado na ilustração por setas apontadas para as grades. As grades sobrepostas indicam o esquema de aninhamento múltiplo de grades, o que permite que as equações sejam resolvidas simultaneamente na interação das grades de diferentes resoluções, e as setas a interação de duplo sentido entre as grades.

Uma das opções físicas é o esquema de transferência radiativa, como por exemplo o de CHEN e COTTON que conta com a solução completa da equação de transferência radiativa para onda curta e ainda leva em conta o efeito das nuvens. Na Figura 10 é mostrada a interação da radiação com as nuvens.

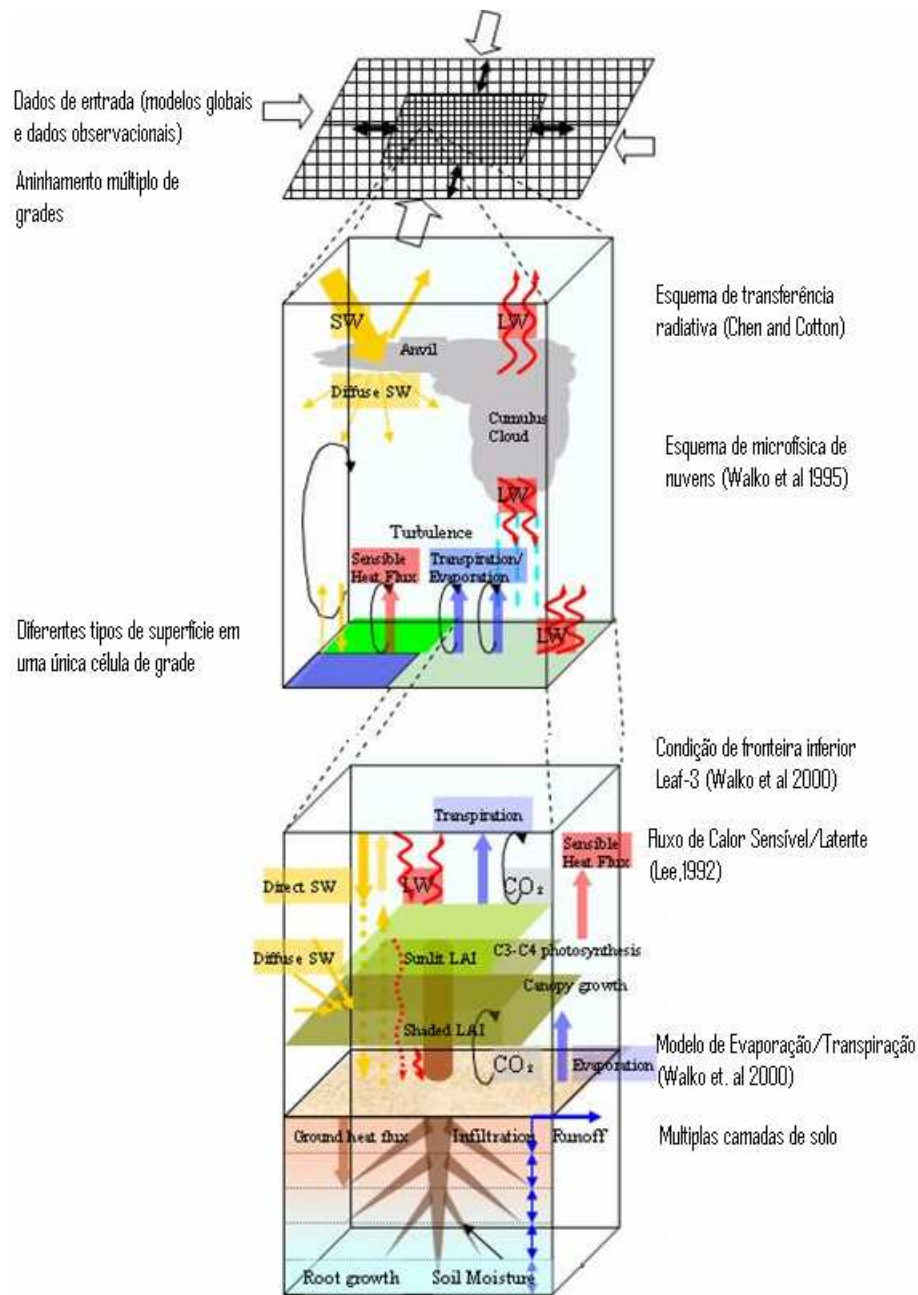


Figura 10 – Ilustração esquemática do funcionamento do modelo BRAMS (Adaptado de: <http://cires.colorado.edu/science/groups/pielke/gallery/rams/gem/gemramimage.pdf>. Acesso em 19/08/2007).

2.10 Descrição dos Cenários Utilizados

Com o objetivo de se representar a ocupação do solo na região de estudo, criou-se arquivos de ocupação do solo com base no trabalho de Soares Filho et al. (2004). Neste trabalho, os autores utilizaram um modelo empírico de dinâmica de desmatamento, tendo em vista mapas do uso do solo da região, para simular os impactos da pavimentação no avanço do desmatamento ao longo da Amazônia. Os mapas de classes de vegetação dos autores foram produzidos para dois casos distintos. No primeiro caso, chamado de convencional (ou “*business as usual*”), as taxas de desmatamento são calculadas segundo os resultados dos esforços do governo no cumprimento de leis ambientais estabelecidas com base nos dados históricos. O segundo caso, chamado de governância (“*governance*”), caracterizou-se pela forte atuação do governo em conter os avanços do desmatamento.

As simulações utilizaram seis cenários, chamados de Pastagem2009 (PAS2009), Pastagem2025 (PAS2025), Soja2009 (SOJA2009), Soja2025 (SOJA2025), Cultura2025 (CULTURA2025) e Controle (CTL). A resolução da informação é de 1 km² e as classes de vegetação discriminadas em corpos d’água, floresta, desmatamento e regeneração. Por simplicidade, a classe de floresta englobou também a classe de regeneração daqueles autores. Com isso, com exceção dos corpos d’água, todo o domínio de estudo foi coberto por floresta tropical no cenário Controle (Figura 11a). No cenário Pastagem, prescreveu-se um cenário baseado nos anos de 2009 e 2025 para o caso convencional, (Figura 11b,c). Tendo em vista o período de cinco anos entre desmatamento e mecanização, prescreveu-se o cenário Soja baseado no ano 2004/2020 com a evolução do desmatamento até o ano de 2009/2025, (Figura 11d,e), também para o caso convencional. O cenário Cultura2025 (Figura 11f) é o mesmo que o cenário Soja2025, a única diferença são os parâmetros biofísicos prescritos.

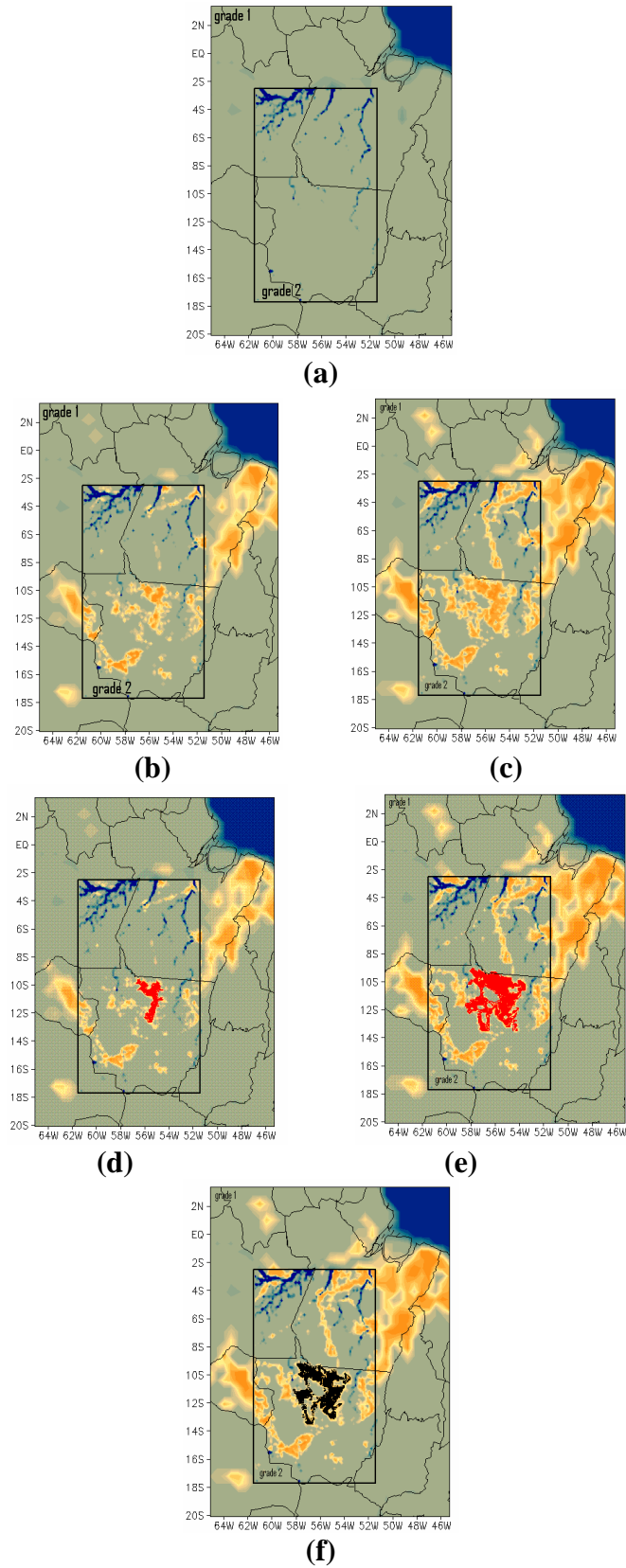


Figura 11 - Cenário Controle (a), Pastagem2009 (b), Pastagem2025 (c), Soja2009 (d), Soja2025 (e) e Cultura2025(f). As coberturas corpos d'água, floresta e pastagem/soja/cultura correspondem respectivamente a azul, verde e laranja/vermelho/preto.

2.11 Parâmetros estatísticos

Para discutir a significância estatística dos impactos do desmatamento foram feitos testes estatísticos do tipo t-Student. O teste t-Student analisa se os valores médios entre dois grupos são estatisticamente diferentes, levando-se também em consideração a variabilidade da distribuição de cada grupo. Neste caso, os grupos foram divididos conforme o cenário de cobertura do solo, ou seja, Controle, Pastagem 2009, Soja 2009, Pastagem 2025, Soja 2025 e Cultura 2025. A fórmula utilizada é:

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (1)$$

Em que,

\bar{X} é o valor médio do grupo X;

\bar{Y} é o valor médio do grupo Y;

n_i é o número de amostras de cada grupo, respectivamente para X (n_1) e Y (n_2); e

S_i^2 é a variância de cada grupo, respectivamente para X (S_1) e Y (S_2)

Adicionalmente, o intervalo de confiança e o número de graus de liberdade são necessários para a análise do resultado do teste. Os intervalos de confiança entre 70 e 75%, 80 e 85%, e acima de 90%, são aqui referenciados, por conveniência, aos impactos de ordem moderada, elevada e muito elevada, respectivamente.

Os campos médios de cada variável apresentam uma variação espacial de acordo com os pontos de grade no domínio de estudo. A aplicação do teste, portanto, analisa as diferenças entre os grupos, porém restritos à mesma posição na grade de cada cenário. O teste torna-se confiável para grupos com distribuições Normais. Para grupos com número alto de amostras e, principalmente, quando o número de graus de liberdade é superior a 30, a distribuição é aproximadamente Normal.

2.12 Validação do Modelo

Nesta seção serão apresentados os resultados de duas simulações feitas para a validação do modelo numérico. Todas foram feitas para o período de 15 de Outubro de 2006 a 15 de abril de 2007 tendo como tipo de vegetação o cenário Controle, ou seja, floresta tropical em todo o domínio de estudo.

Comparou-se as simulações Controle 1 e 2 através da fração evaporativa (LE/R_n), da razão de Bowen (H/LE) e da razão entre saldo de radiação e a irradiância solar incidente (RN/K_i). As simulações foram configuradas com duas grades aninhadas, sendo a grade 1 com resolução de 64 km e a grade 2 com resolução de 16 km. É importante lembrar que uma das grades tem resolução horizontal menor ou no limiar que a recomendada para se ativar a parametrização convectiva. Por esse motivo, na simulação Controle 1 a parametrização convectiva foi ativada somente na grade 1, e na simulação Controle 2 foi ativada nas duas grades. Esse conjunto de simulações tem o objetivo de verificar qual configuração melhor representa a região de estudo, para ser utilizada nas simulações com os cenários de desmatamento citados na seção 2.10.

2.13 Configuração das Simulações Controle 1 e 2

As simulações foram configuradas com duas grades aninhadas centradas em $9^\circ S - 56,65^\circ W$. A grade 1 com 40 pontos (E-W) e 50 pontos (N – S), com resolução de 64 km, e a grade 2 com 70 pontos (E-W) e 106 (N-S), com resolução de 16 km.

Para se obter qual configuração do modelo representa da melhor forma a região de estudo foram feitas duas simulações, ambas com o cenário Controle. A diferença entre a simulação Controle 1 e Controle 2 é a ativação da parametrização convectiva. Na simulação Controle 1 a parametrização convectiva de Grell foi ativada apenas na grade 1 e na Controle 2 foi ativada nas duas grades.

Para as condições iniciais e de fronteira foram utilizados campos meteorológicos obtidos das análises do AVN, com 1° de resolução espacial e 6 h de resolução temporal. O passo de tempo do forçamento correspondeu aos horários sinóticos (00, 06, 12 e 18 UTC), enquanto que a frequência de saída de resultados da simulação foi de uma a cada três horas, a partir das 00 UTC. O período simulado foi de 15 de Outubro de 2006 a 15 de abril de 2007, sendo que os primeiros quinze dias foram descartados para prover um período de equilíbrio para a umidade do solo. Informações específicas das rodadas estão resumidas na Tabela 5.

Tabela 5 – Principais configurações utilizadas nas simulações de validação.

Simulações	Controle 1	Controle 2
<i>Início da Integração</i>	15/10/2006	
<i>Duração da Integração</i>	183 dias	
<i>Cenário</i>	CTL	
<i>nº de grades</i>	2	
<i>ptos de grade em x</i>	40(70)	
<i>ptos de grade em y</i>	50(106)	
<i>resolução(km)</i>	64(16)	
<i>Inic. do solo</i>	homogênea	
<i>Param. Radiação</i>	Chen e Cotton	
<i>Param. Convectiva</i>	Grell (off)	Grell (Grell)
<i>Nível de microfísica</i>	3	
<i>Condição Inicial</i>	AVN	

2.14 Comparação entre as Simulações Controle 1 e 2

A fração evaporativa $\left(\frac{LE}{R_n}\right)$ mede a fração da energia disponível para os processos de evaporação. A fração evaporativa média na estação úmida encontrada na simulação Controle 1 foi de 0,94 (Figura 12a), apenas 10% superior ao resultado observacional de campo, reportado por Rocha et al. (2004) na Floresta Nacional do Tapajós, próxima ao município de Santarém, no Pará. Na simulação Controle 2 (Figura 13a) a fração evaporativa média na estação úmida foi 0,91, sendo 7% superior que o resultado de Rocha et al. (2004).

A razão entre os fluxos de calor sensível e calor latente, conhecida como razão de Bowen (β) (Figura 12c), sugere uma partição maior da energia disponível aos processos de

evaporação. A média na estação úmida para a simulação Controle 1 foi de 0,32, sendo 18% superior ao encontrado por Pinto (2003). Para a simulação Controle 2 (Figura 13c) a razão de Bowen na estação úmida foi de 0,23, sendo 11% inferior ao encontrado por Pinto (2003).

A razão entre o saldo de radiação e a irradiância solar incidente (Rn/Ki) mostrou pouca sazonalidade ao longo do período estudado (Figura 12b). A média na estação úmida na simulação Controle 1 foi de 0,78, sendo 7% superior ao encontrado por Pinto (2003). Para a simulação Controle 2 (Figura 13b) a razão Rn/Ki na estação úmida foi de 0,77, sendo 6% superior ao encontrado por Pinto (2003).

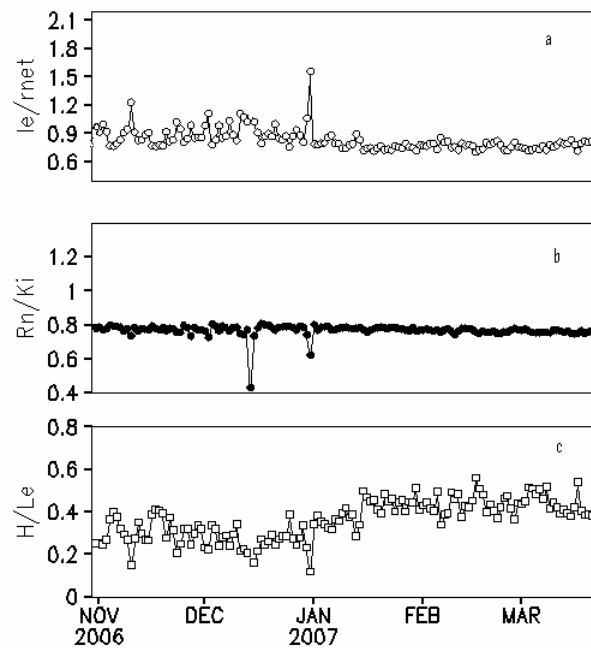


Figura 12 - Variação diária de: (a) fração evaporativa (LE/RN), razão (Rn/Ki) e (c) razão de Bowen (H/LE) para o experimento Controle 1.

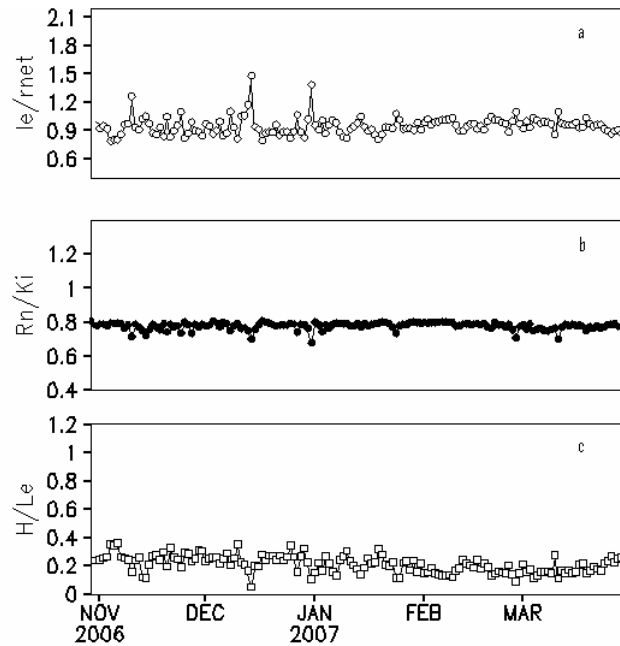


Figura 13 - Variação diária de: (a) fração evaporativa (LE/RN), razão (Rn/Ki) e (c) razão de Bowen (H/LE) para o experimento Controle 2.

Como pode ser observado, as simulações Controle 1 e Controle 2 apresentaram resultados semelhantes e próximos aos dados observados. Enquanto na simulação Controle 1 a fração evaporativa ficou 10% superior à observada, na simulação Controle 2 esta ficou 7% acima. Para a fração (Rn/Ki), as simulações Controle 1 e 2 também apresentaram resultados próximos ao observado, sendo apenas 7% e 6% superiores às encontradas por Pinto (2003), respectivamente. A razão de Bowen foi o resultado que mais se distanciou dos dados observados, sendo 18% superior e 11% inferior nas simulações Controle 1 e Controle 2, respectivamente. Apesar da simulação Controle 2 ter apresentado Razão de Bowen relativamente mais próxima àquela observada por Pinto (2003), optou-se por utilizar a configuração da simulação Controle 1, pelo fato desta estar com a parametrização convectiva desativada na grade 2, que é uma configuração indicada para resoluções horizontais próximas a prescrita para essa grade.

3 SIMULAÇÕES DE CENÁRIOS DE DESMATAMENTO

A questão fundamental deste trabalho é identificar se ocorrem mudanças significativas nas circulações locais da região amazônica causadas pelas mudanças no uso do solo, especificamente, a expansão das áreas de pastagem e cultivo de soja. Para tentar responder essa questão, além do cenário de controle (CTL), foram utilizados cinco diferentes cenários de desflorestamento: PAS2009, PAS2025, SOJA2009, SOJA2025 e CULTURA2025. Para verificar os impactos que esses cenários podem causar, foram avaliados em escala regional os balanços de radiação, energia e água, a divergência de massa, dentre outras variáveis na Bacia Amazônica.

3.1 Configuração das simulações de cenários de desmatamento

Para verificar o impacto causado pela alteração do uso do solo foram realizadas cinco simulações, as quais foram denominadas de Pastagem 2009, Pastagem 2025, Soja 2009, Soja 2025 e Cultura 2025, cujos cenários são PAS2009, PAS2025, SOJA2009, SOJA2025 e CULTURA2025, respectivamente, todos descritos na seção 2.10. Todas as simulações foram iniciadas da mesma forma que a simulação Controle 1, com exceção da cobertura vegetal, a fim de evitar que os impactos pudessem ser atribuídos às diferentes condições iniciais de água no solo ou a outros fatores (Tabela 6).

Tabela 6 – Principais configurações utilizadas nas simulações de cenários.

Simulações	Pastagem 2009	Pastagem 2025	Soja 2009	Soja 2025	Cultura 2025
<i>Inicialização</i>	15/10/2006				
<i>Integração</i>	183 dias				
<i>Cenário</i>	PAS2009	PAS2025	SOJA2009	SOJA2025	CULTURA2025
<i>nº de grades</i>	2				
<i>ptos de grade em x</i>	40(70)				
<i>ptos de grade em y</i>	50(106)				
<i>resolução(km)</i>	64(16)				
<i>Inic. do solo</i>	homogênea				
<i>Param. Radiação</i>	Chen e Cotton				
<i>Nível de microfísica</i>	3				
<i>Param. Convectiva</i>	Grell(off)				

3.2 Análise da variabilidade espacial

Nesta seção, avaliou-se o impacto que os cenários de desflorestamento (Pastagem e Soja) podem causar, em escala regional, nos balanços de radiação, energia e água. Apresentam-se os resultados das simulações utilizando os cenários de desflorestamento Pastagem e Soja, tendo sido avaliado através da diferença entre as simulações Controle 1 – Pastagem 2009, Controle 1 – Soja 2009, Controle 1 – Pastagem 2025 e Controle 1 – Soja 2025. Calculou-se também a porcentagem de aumento/redução dos fluxos de superfície no interior da região perturbada, tendo como área interna os limites prescritos nos cenários SOJA2009 e SOJA2025.

3.2.1 Mudanças regionais: PAS2009 - CTL e SOJA2009 – CTL

Durante o período estudado, 01 de novembro de 2006 a 01 de abril de 2007, houve uma mudança significativa na distribuição horizontal da precipitação acumulada. No cenário PAS2009 (Figura 14a), houve aumento da precipitação no interior da região perturbada próximo à latitude/longitude 10°S/56°W. Da mesma forma que na simulação Pastagem 2009, na simulação Soja 2009 (Figura 14b) também houve aumento na precipitação, principalmente na região próxima a latitudes 10°S e longitudes 56°W. É interessante notar que o aumento foi maior para a simulação Soja 2009.

O alto albedo da pastagem e da soja (comparada à floresta, Tabela 2) tende a absorver uma menor quantidade de energia na superfície, fazendo com que o saldo de radiação apresente um decréscimo nas áreas perturbadas (Figura 15). Como o albedo prescrito para a soja é maior que o da pastagem, o decréscimo na simulação Soja 2009 foi maior (-16%) que o da simulação Pastagem 2009 (-7%), conforme apresentado na Tabela 7. O padrão da diferença do saldo de radiação apresenta-se mais controlado pelos parâmetros biofísicos da vegetação do que pela energia solar, onde houve um aumento da irradiância solar na área perturbada

(Figura 16). Na simulação Pastagem 2009 o aumento foi de 5% e na simulação Soja 2009 de 9%.

O aquecimento sobre a região desflorestada é resultado da redução na evapotranspiração e na redução do comprimento de rugosidade, uma vez que a rugosidade da superfície tem papel fundamental na modulação dos fluxos turbulentos de calor e umidade entre o solo e a atmosfera. A redução do comprimento de rugosidade (variando de 2,3 a 0,04 na pastagem) reduziu a eficiência da transferência turbulenta de energia na superfície; desse modo, um valor mais alto de temperatura é necessário para remover o excesso de energia da superfície. Além disso, o menor índice de área foliar e a reduzida capacidade de armazenar umidade do solo na pastagem em relação à floresta têm o efeito de reduzir a taxa de transpiração.

No interior da região perturbada, entre as latitudes 9° e 13°S e longitudes 57° e 55° W, houve aumento no fluxo de calor sensível (Figura 17a) na simulação Pastagem 2009 (24%). O fluxo de calor latente (Figura 18a) também mostrou variação (-17%), tendo redução no interior dessa área. Porém, na simulação Soja 2009 houve redução do fluxo de calor sensível (-2%) e no fluxo de calor latente (-9%) (Figuras 17b e 18b) a diferença foi bem pequena, indicando que a energia disponível foi mais utilizada nos processos de transpiração e evaporação do que para aquecer a superfície.

O padrão da temperatura média (50 m) apresenta aumentos localizados em grande parte no interior da área perturbada (Figura 19), sendo que sobre a pastagem o aumento foi maior (Figura 19a).

Na Figura 20, observa-se no interior da região perturbada valores negativos de razão de mistura. Entre as latitudes 13° e 9° S e longitudes 56° e 54° W essa diferença na razão de mistura é maior entre PAS2009 – CTL (Figura 20a), indicando que na simulação Pastagem 2009 o ambiente é mais seco.

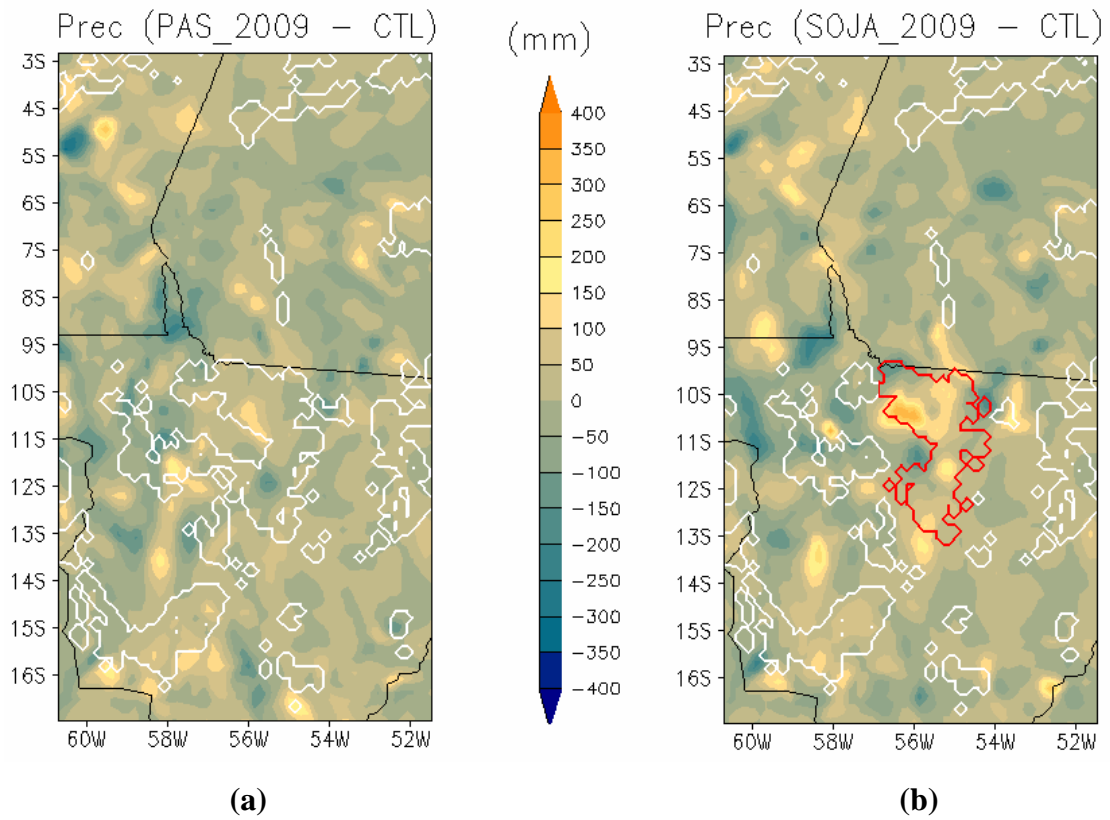


Figura 14 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] para a Precipitação acumulada no período.

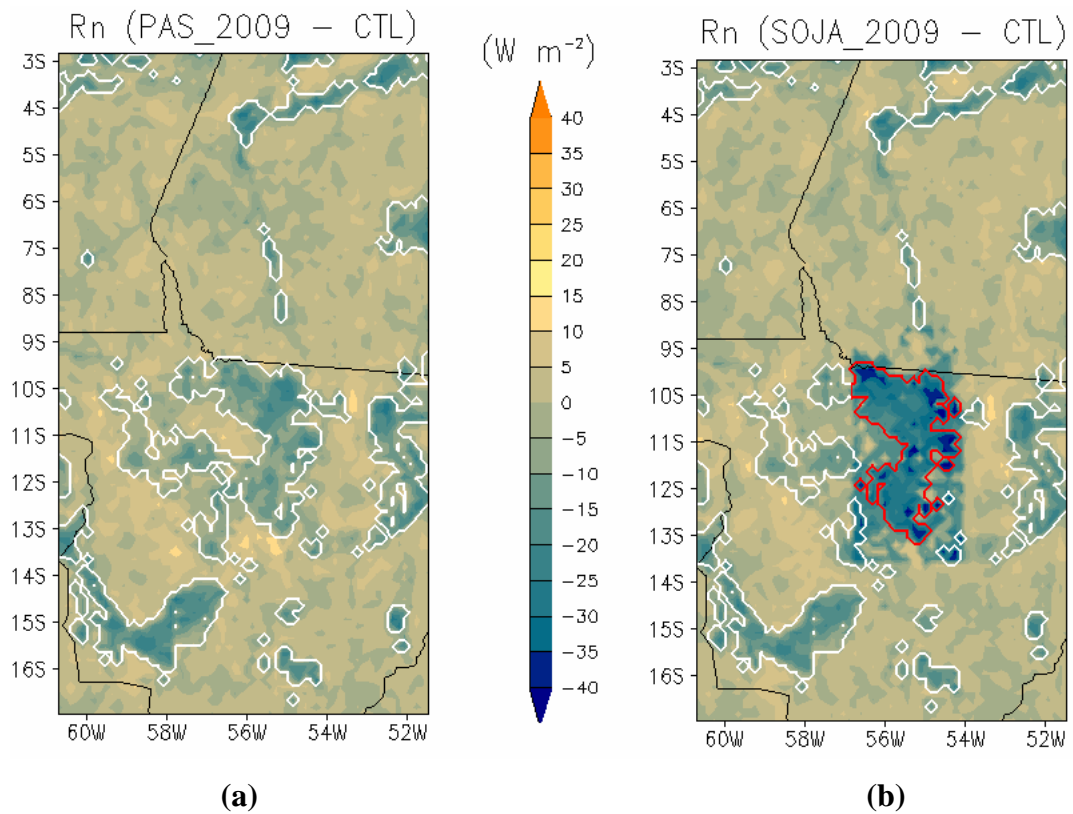


Figura 15 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] do Saldo de Radiação(Rn) para o período.

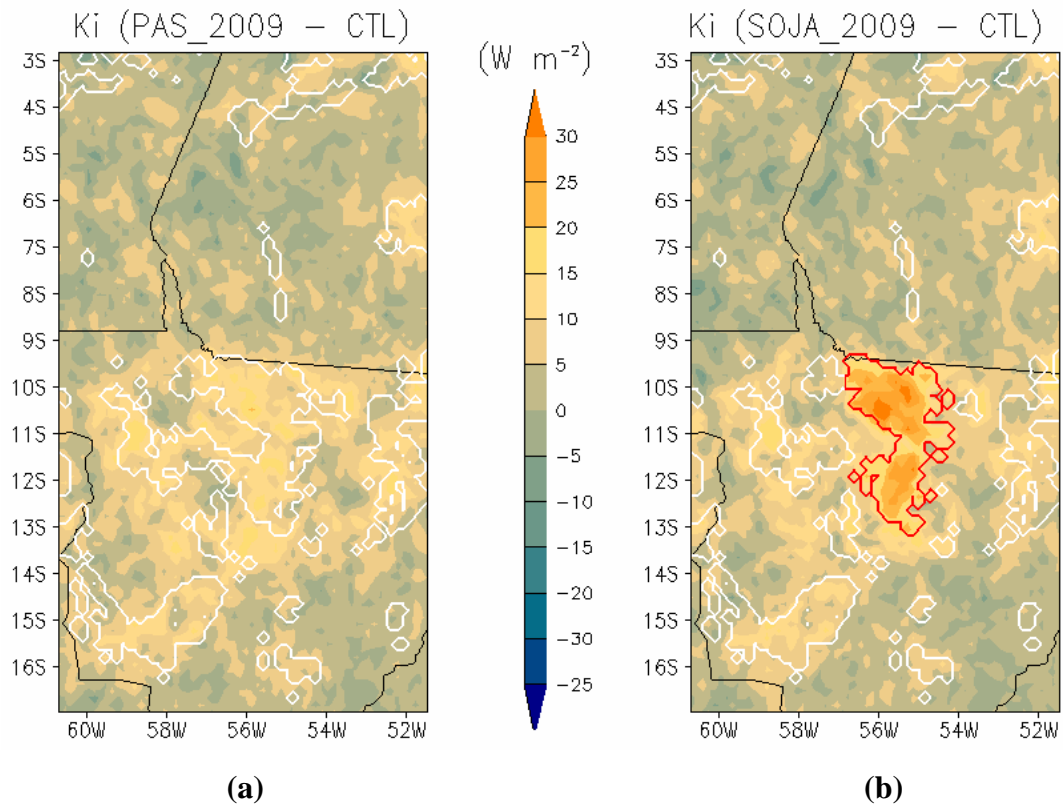


Figura 16 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da Irradiância Solar (K_i) para o período.

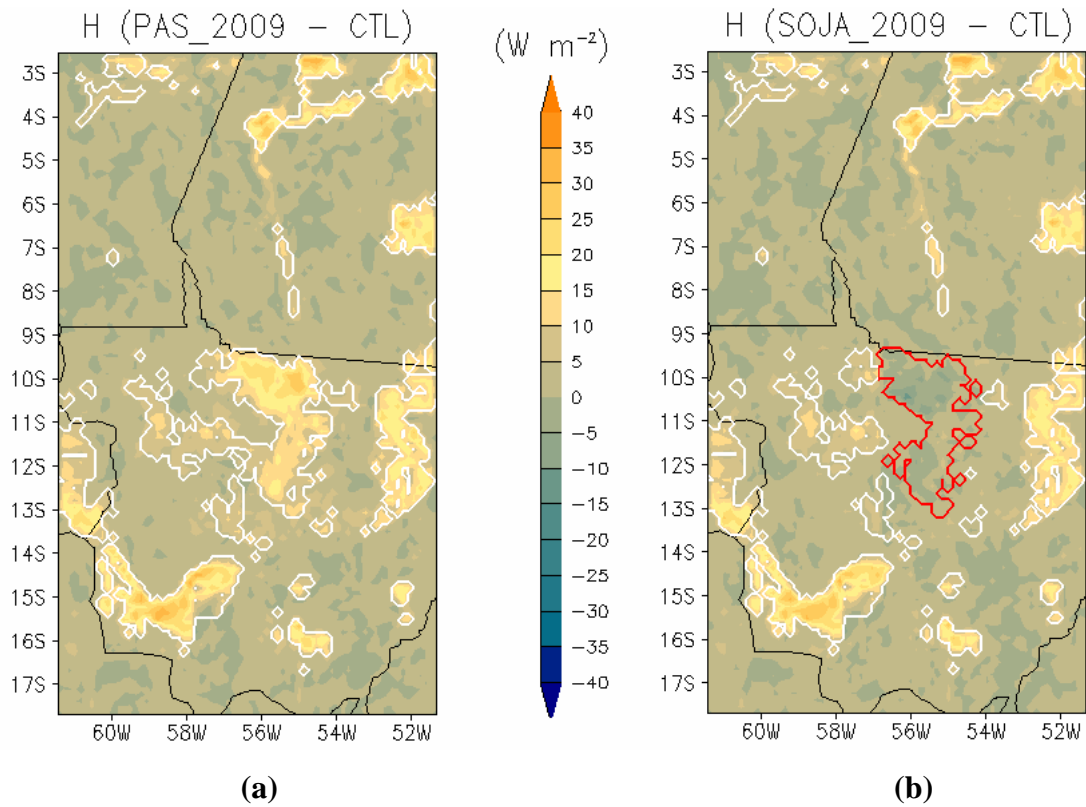


Figura 17 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor sensível para o período.

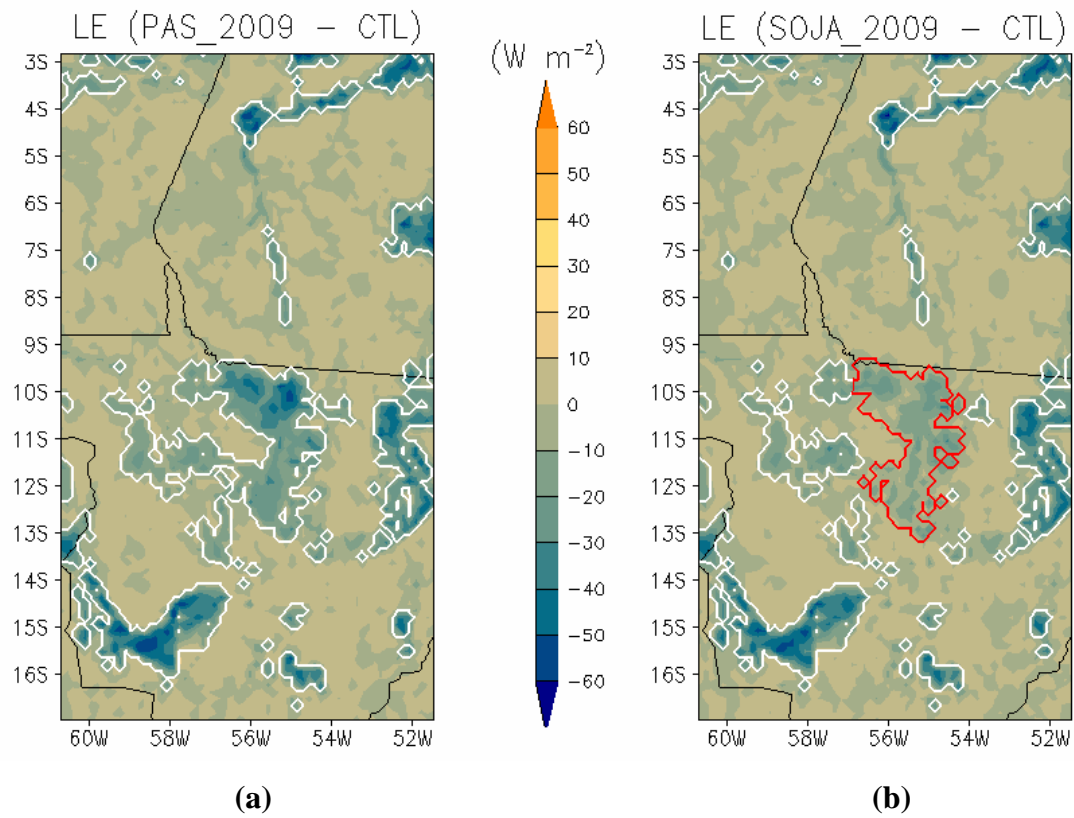


Figura 18 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor latente para o período.

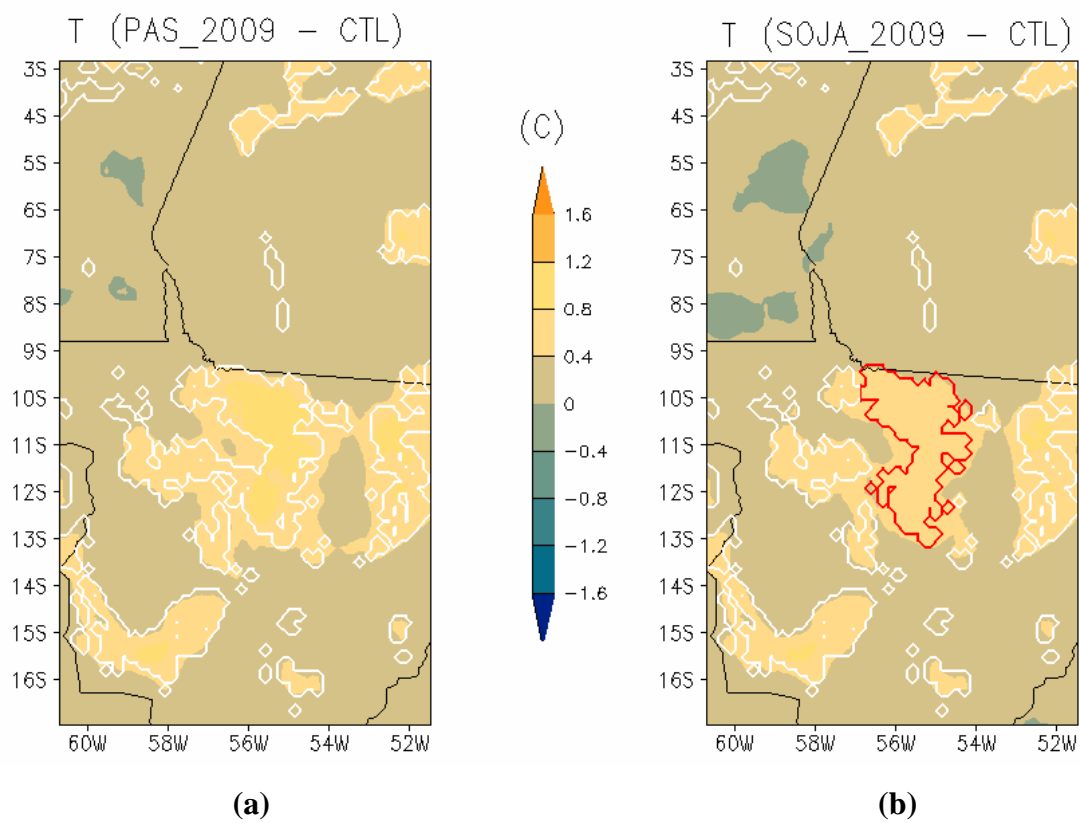


Figura 19 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de temperatura média para o período.

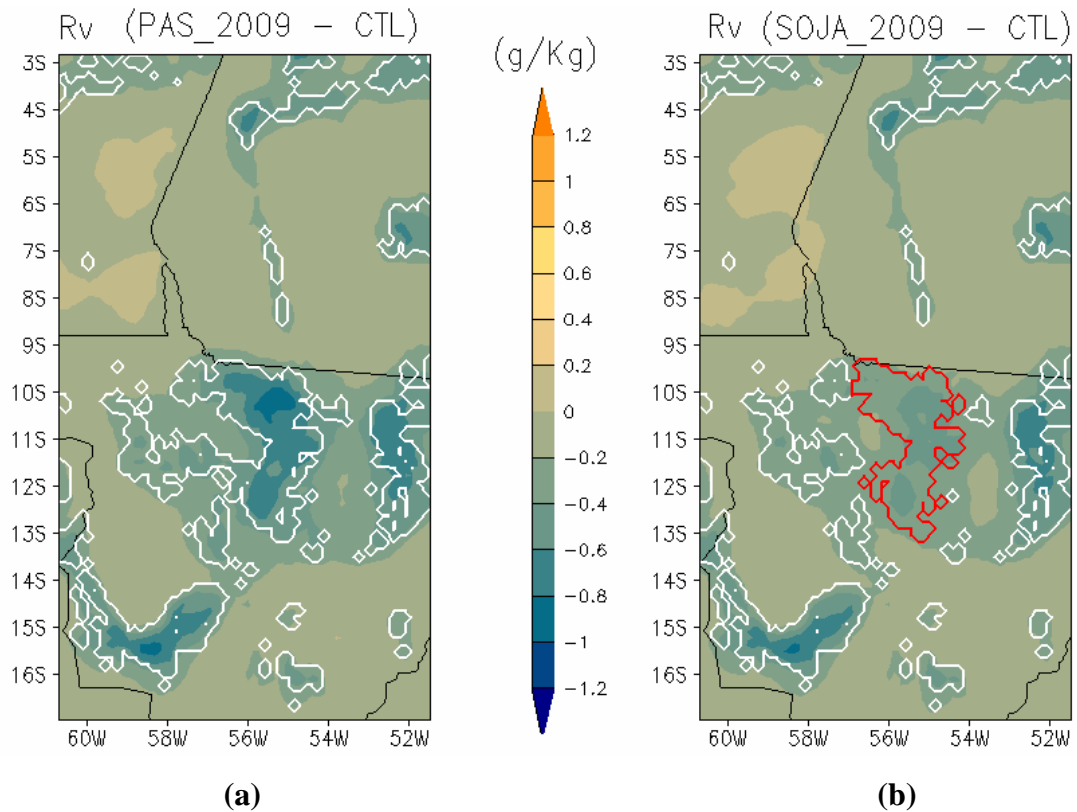


Figura 20 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da razão de mistura do vapor d'água para o período.

3.2.2 Mudanças regionais: PAS2025 - CTL e SOJA2025 – CTL

No cenário PAS2025 (Figura 21a), houve aumento da precipitação no interior da região perturbada próximo à latitude/longitude 11°S/56°W, e esse aumento foi mais significativo, em espaço e intensidade, que o do cenário PAS2009. Da mesma forma que na simulação Pastagem 2025, na simulação Soja 2025 (Figura 21b) também houve aumento na precipitação, principalmente na região próxima a latitude 11°S e longitude 55°W, abrangendo uma área maior que a do cenário SOJA2009.

Assim como nos cenários PAS2009 e SOJA2009, o saldo de radiação também apresentou um decréscimo nas áreas perturbadas (Figura 22). Como o albedo prescrito para a soja é maior que o da pastagem, o decréscimo na simulação SOJA2025 (-17%) foi maior que o da simulação PAS2025 (-9%). A irradiância solar na área perturbada também aumentou nos

cenários PAS2025(5%) e SOJA2025 (9%) na mesma porcentagem que os cenários PAS2009 e SOJA2009 (Figura 23).

O padrão dos fluxos de calor sensível e latente foi bastante parecido com o dos cenários PAS2009 e SOJA2009. Na simulação Pastagem 2025 e Soja 2025 houve aumento/redução de 28% e -4%, respectivamente (Figura 24). O fluxo de calor latente (Figura 25) também mostrou variação semelhante, tendo redução -19% / -9% nas simulações Pastagem 2025 e Soja 2025, respectivamente.

O padrão da temperatura média e da razão de mistura também foi semelhante aos cenários PAS2009 e SOJA2009. Houve aumento da temperatura e redução da razão de mistura no interior da região perturbada. O aumento/redução da temperatura/razão de mistura foi maior na simulação Pastagem 2025, assim como havia ocorrido nas simulações Pastagem 2009 e Soja 2009, ou seja, o ambiente ficou mais quente e seco.

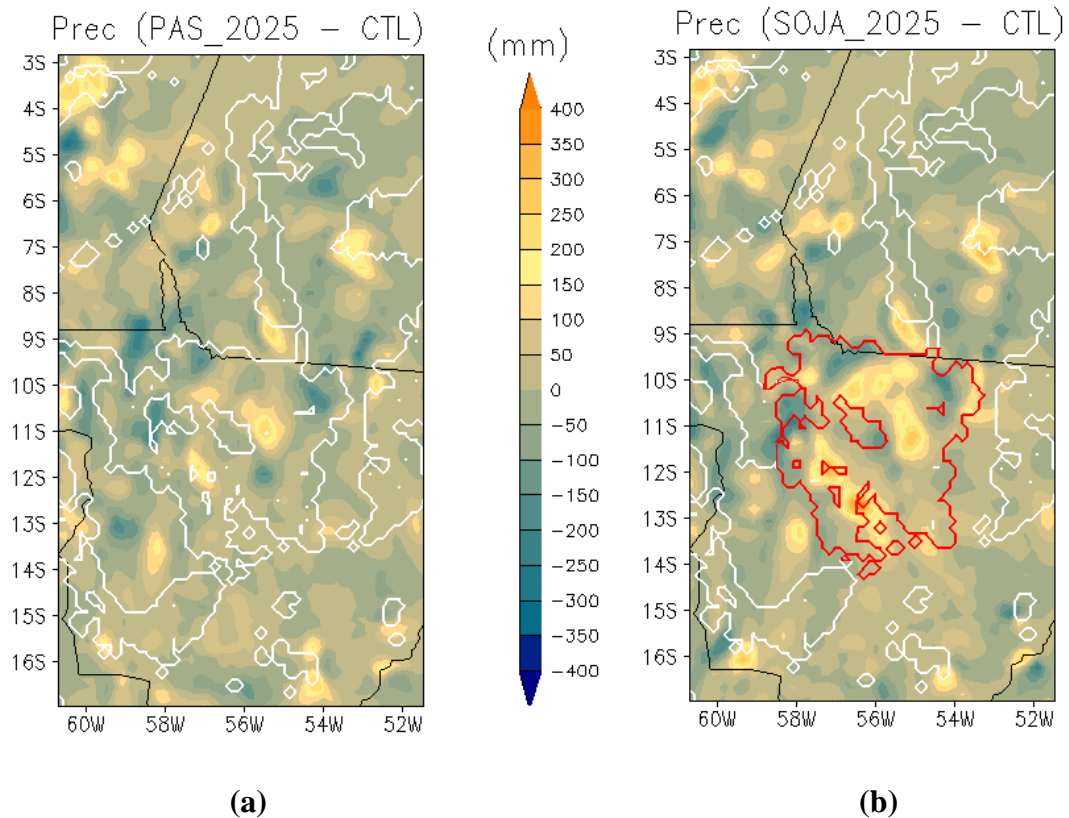


Figura 21 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] para a Precipitação acumulada no período.

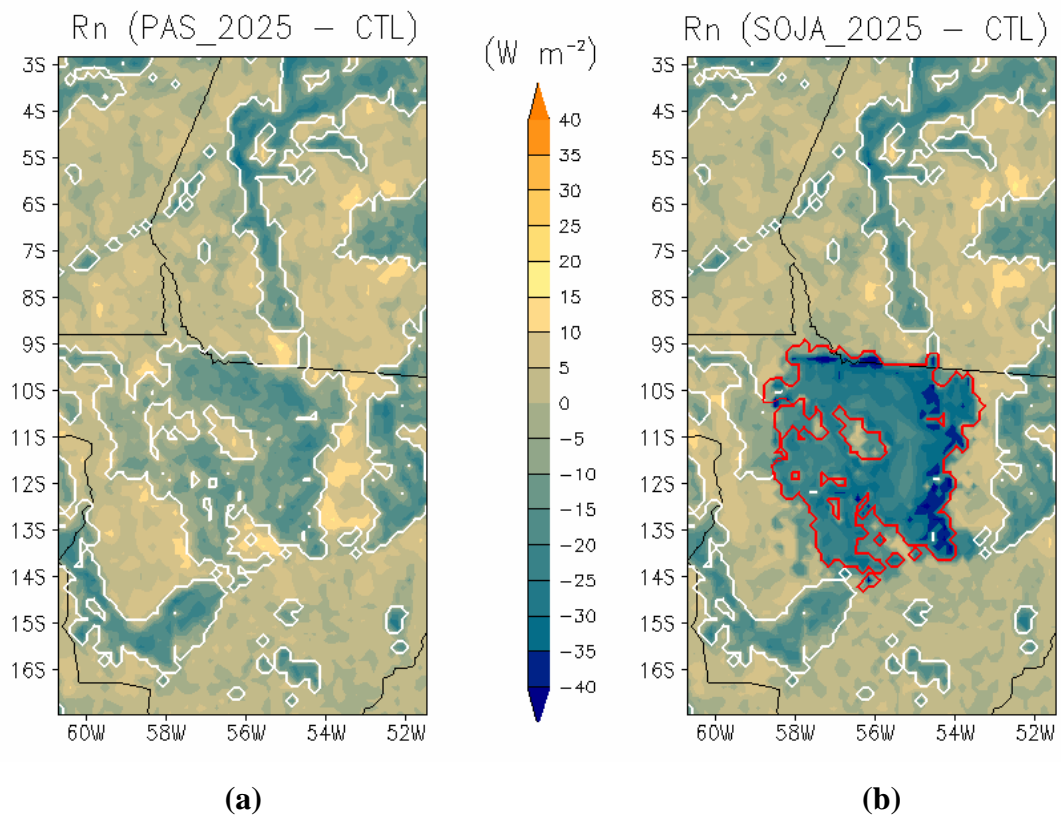


Figura 22 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] do Saldo de Radiação (Rn) para o período.

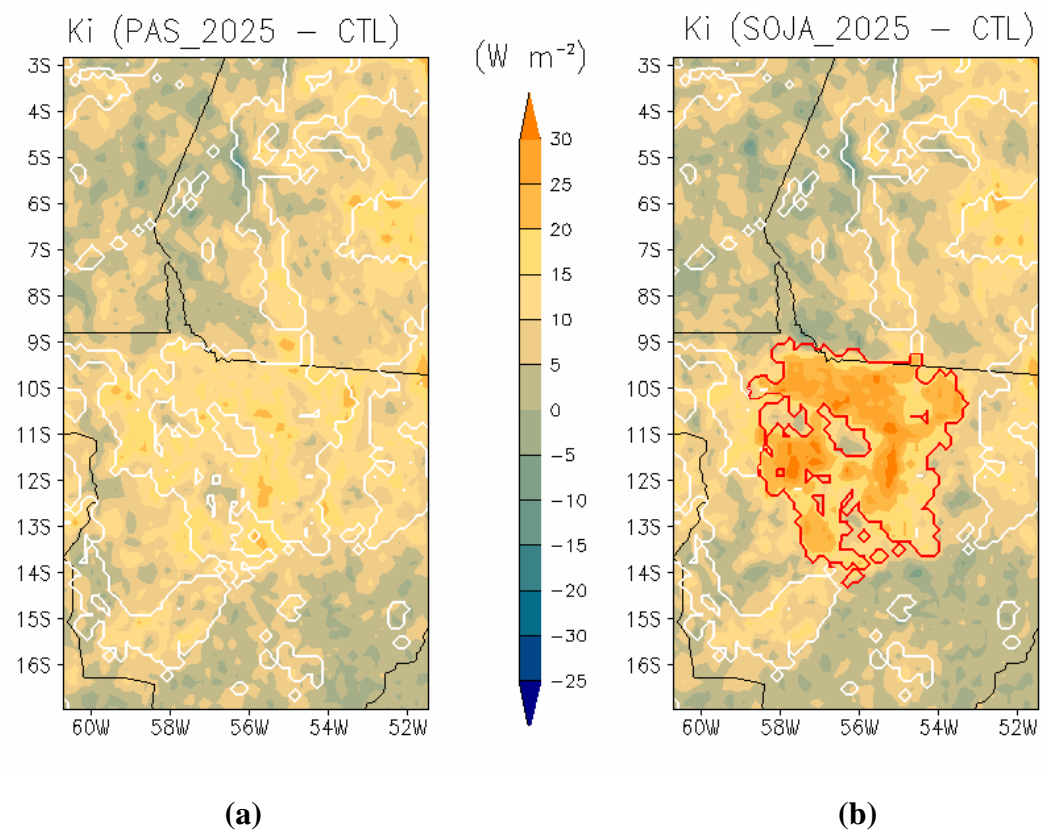


Figura 23 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da Irradiância Solar (Ki) para o período.

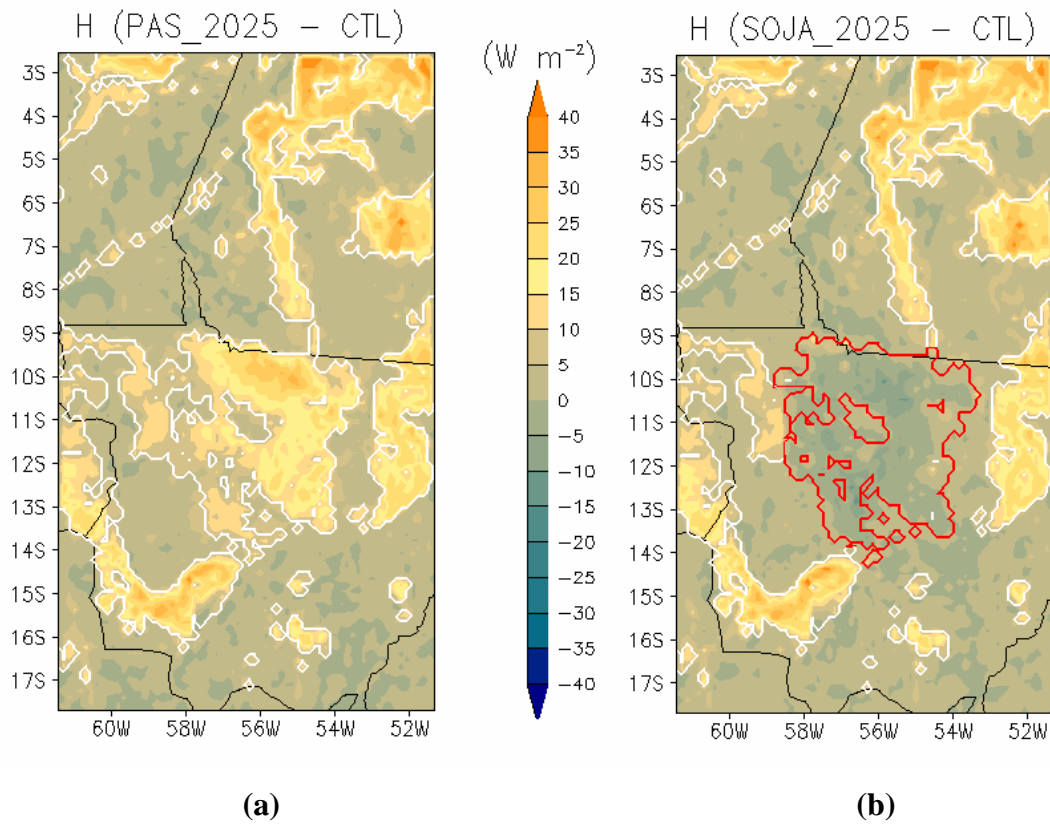


Figura 24 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor sensível para o período.

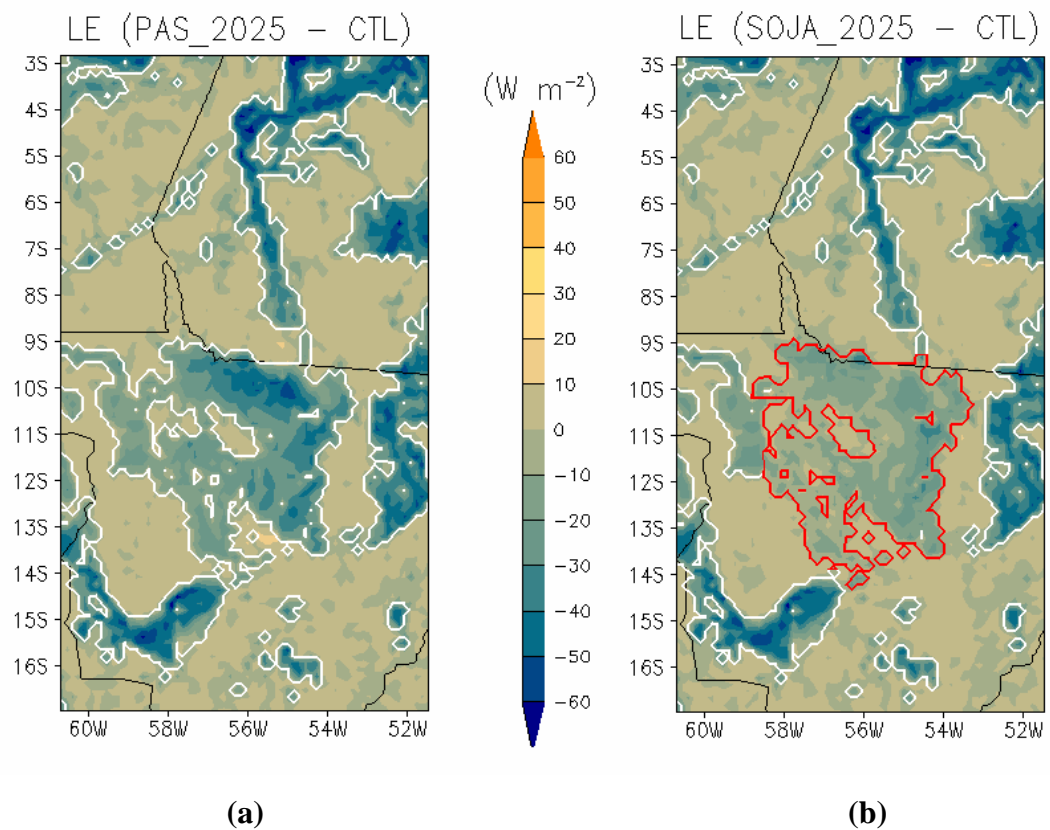


Figura 25 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor latente para o período.

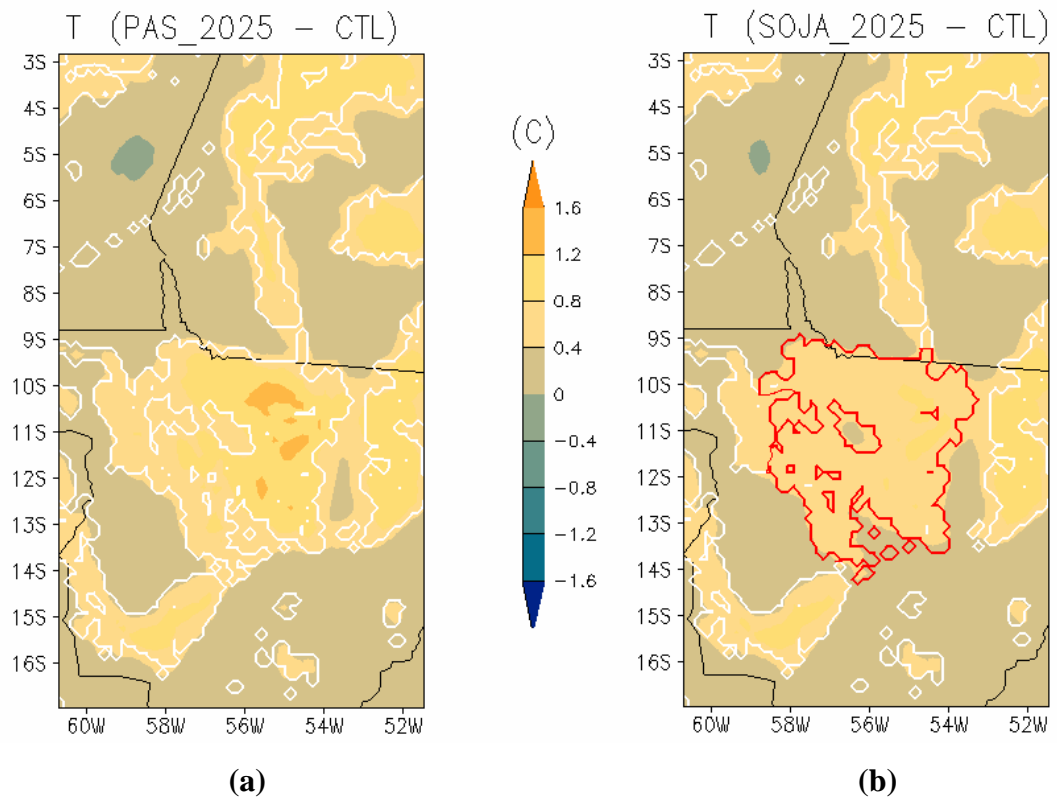


Figura 26 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de temperatura média para o período.

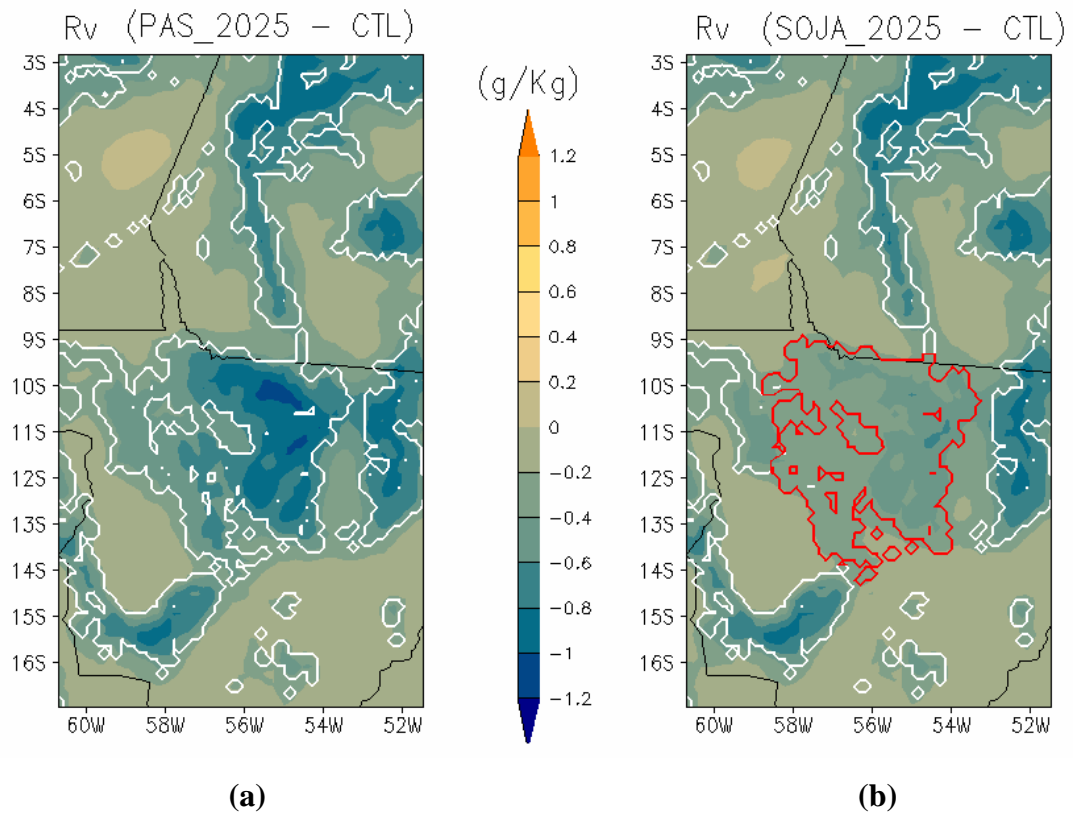


Figura 27 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da razão de mistura do vapor d'água para o período.

Tabela 7 – Valores médios para o interior da área perturbada e percentual de aumento ou diminuição. (Valores obtidos para área definida nos cenários SOJA2009 e SOJA2025, no interior da região coberta por soja).

Variáveis	Descrição	Área Desmatada							
		2009				2025			
		PAS2009-CTL		SOJA2009-CTL		PAS2025-CTL		SOJA2025-CTL	
(%)	valor	(%)	valor	(%)	valor	(%)	valor		
Rn (W m ⁻²)	Saldo de Rad.	-7	175(273)	-16	158(252)	-7	205(293)	-16	192(286)
Ki (W m ⁻²)	Irrad. Solar Incid.	5	253(345)	9	263(356)	5	291(370)	9	295(374)
H (W m ⁻²)	Fluxo de Calor Sem.	24	72(110)	-2	57(86)	28	101(138)	-4	89(109)
LE (W m ⁻²)	Fluxo de Calor Lat.	-17	124(153)	-9	137(166)	-19	130(150)	-9	124(136)

3.2.3 Análise estatística

Foram feitos testes estatísticos do tipo t-Student (seção 2.11) para discutir a significância estatística dos impactos do desmatamento. A precipitação apresentou significância de moderada a elevada no interior da região perturbada, principalmente na região próxima a latitude 10°S e longitude 56°W, em todos os cenários (Figura 28).

As variáveis de irradiância solar incidente e do saldo de radiação apresentaram significância estatística de elevada a muito elevada para os cenários Soja 2009 e Soja 2025 (Figuras 29b, 29d, 30b e 30d), e moderada a elevada para os cenários Pastagem 2009 e pastagem 2025 (Figuras 29a, 29c, 30a e 30c). Os fluxos de calor sensível (Figura 31) e latente (Figura 32) apresentaram significância estatística muito elevada, predominantemente no interior da área perturbada, nos cenários Pastagem 2009 e Pastagem 2025. Porém, para os cenários Soja 2009 e Soja 2025, enquanto o fluxo de calor latente apresentou níveis de significância estatística de elevada a muito elevada, o fluxo de calor sensível apresentou nível moderado. A temperatura (Figura 33) e razão de mistura (Figura 34) apresentaram significância estatística muito elevada localizadas predominantemente no interior da área perturbada.

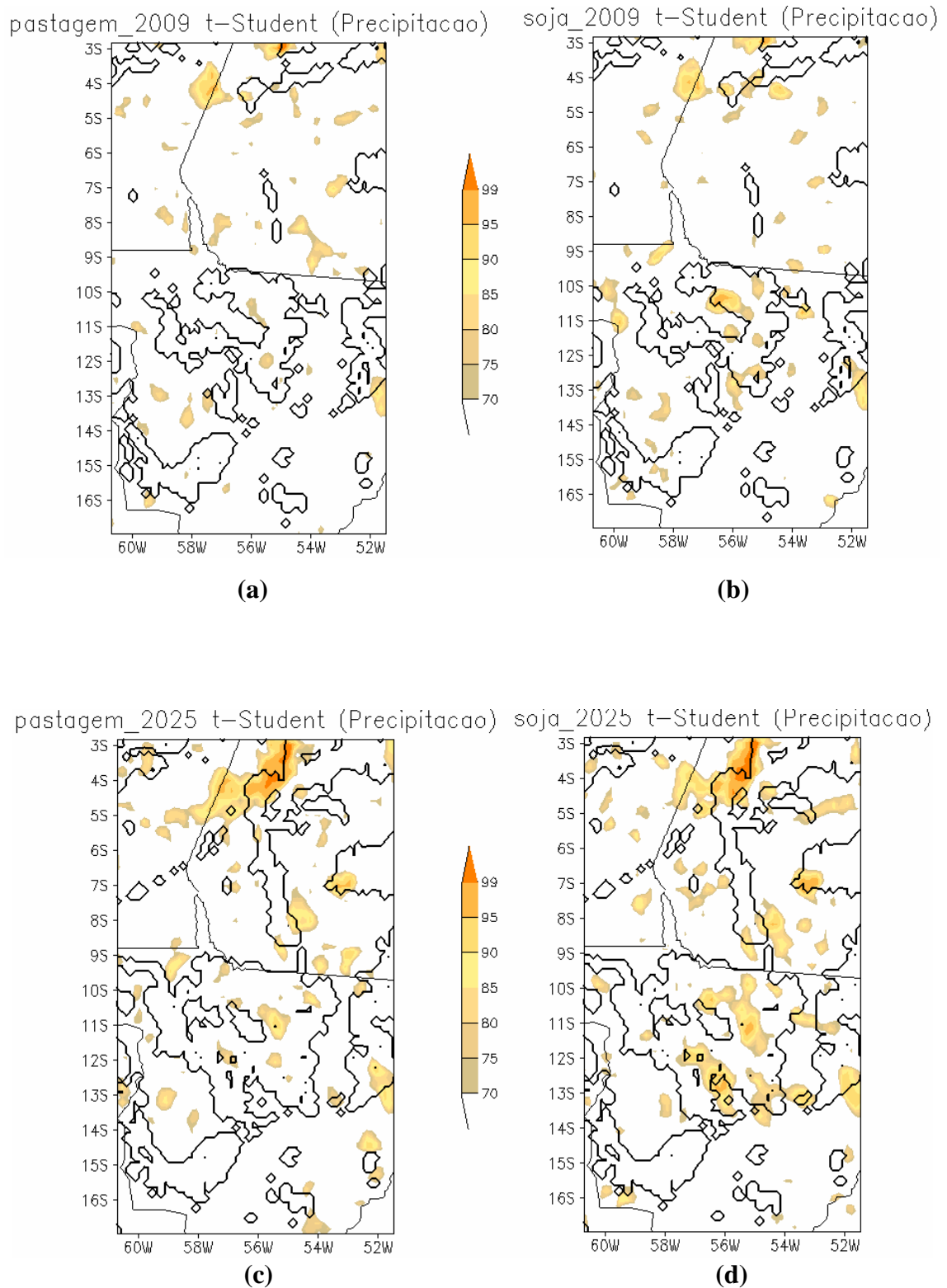


Figura 28 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] para a Precipitação acumulada no período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).

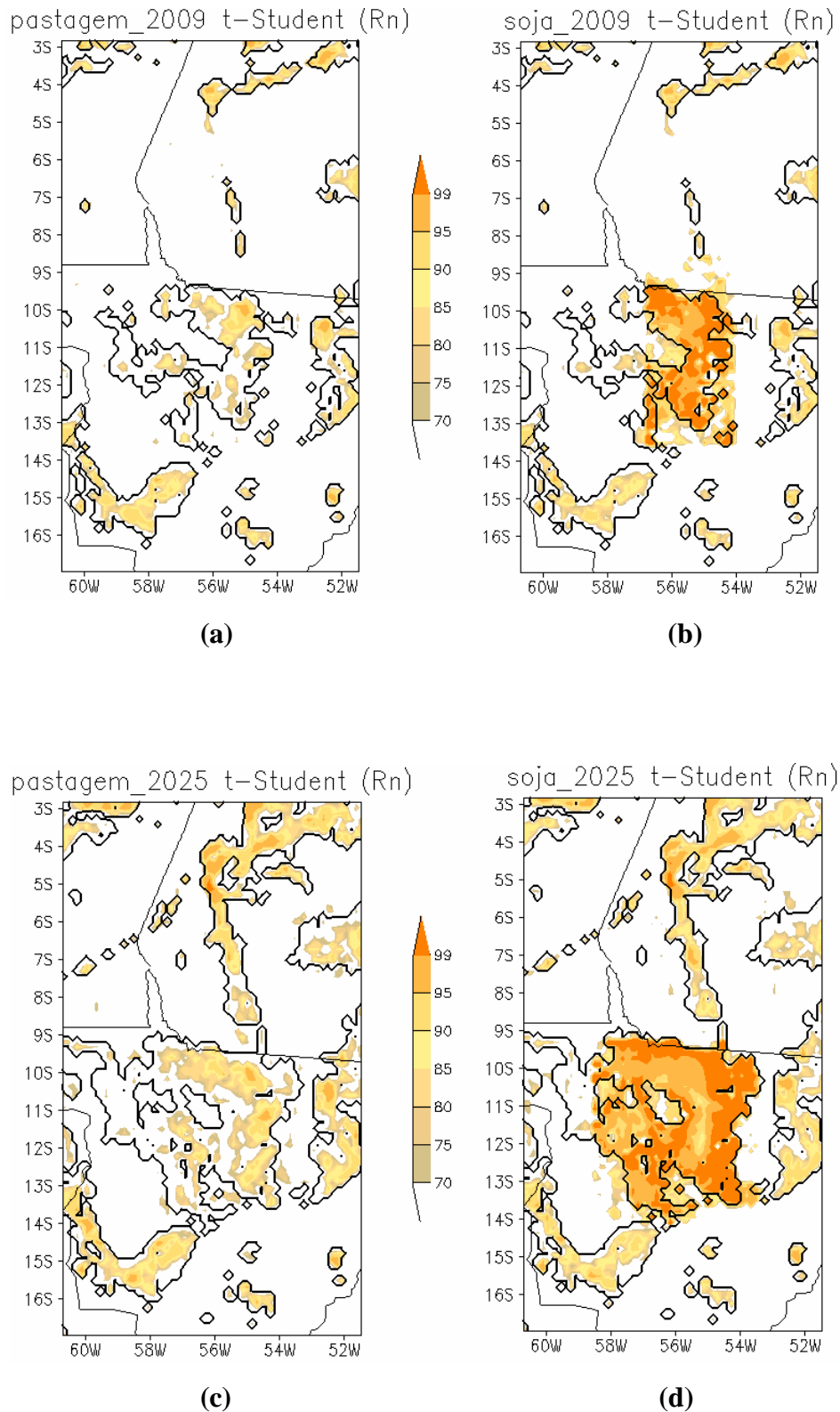


Figura 29 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] do Saldo de Radiação (Rn) para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).

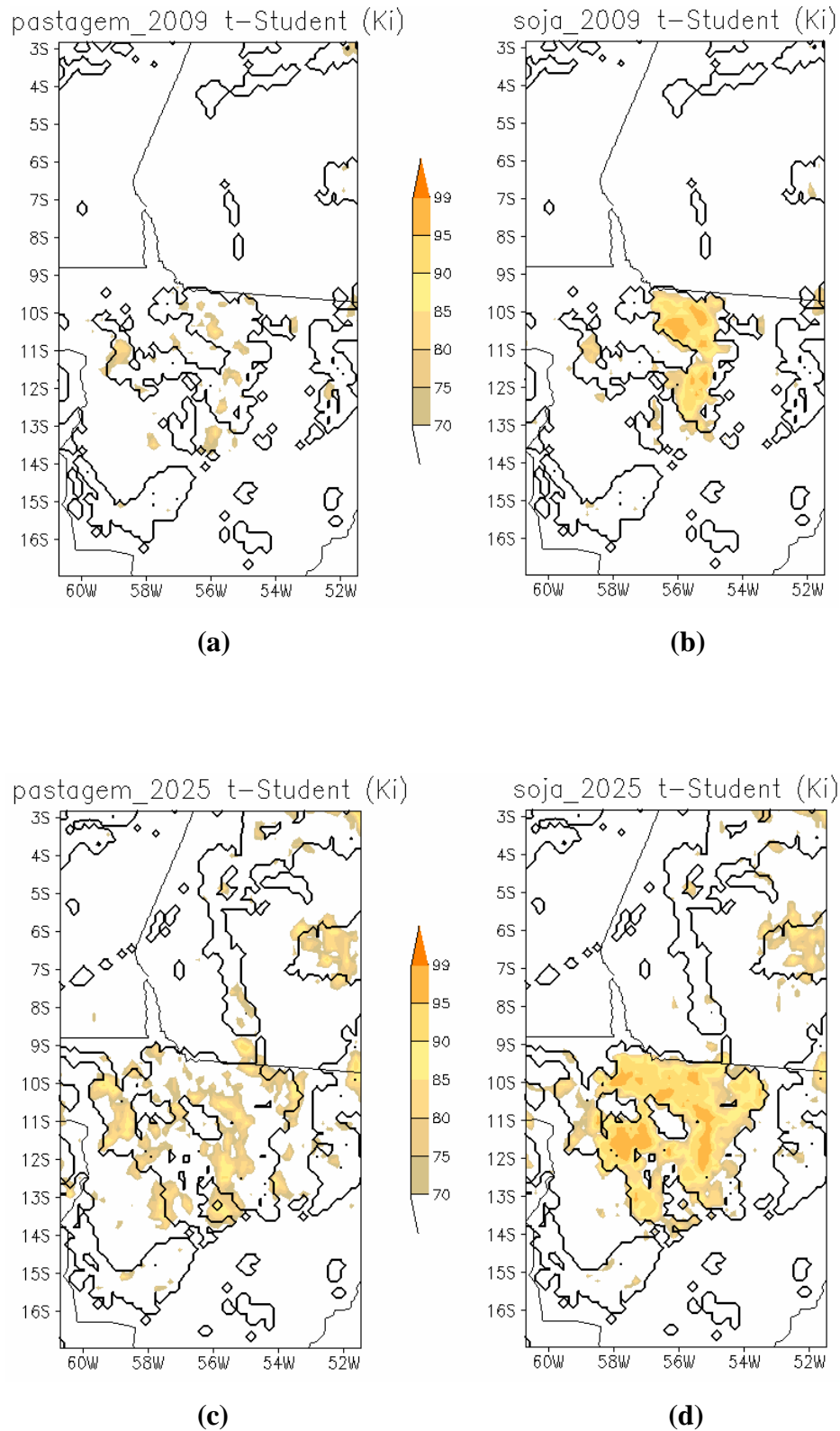


Figura 30 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da Irradiância Solar (Ki) para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).

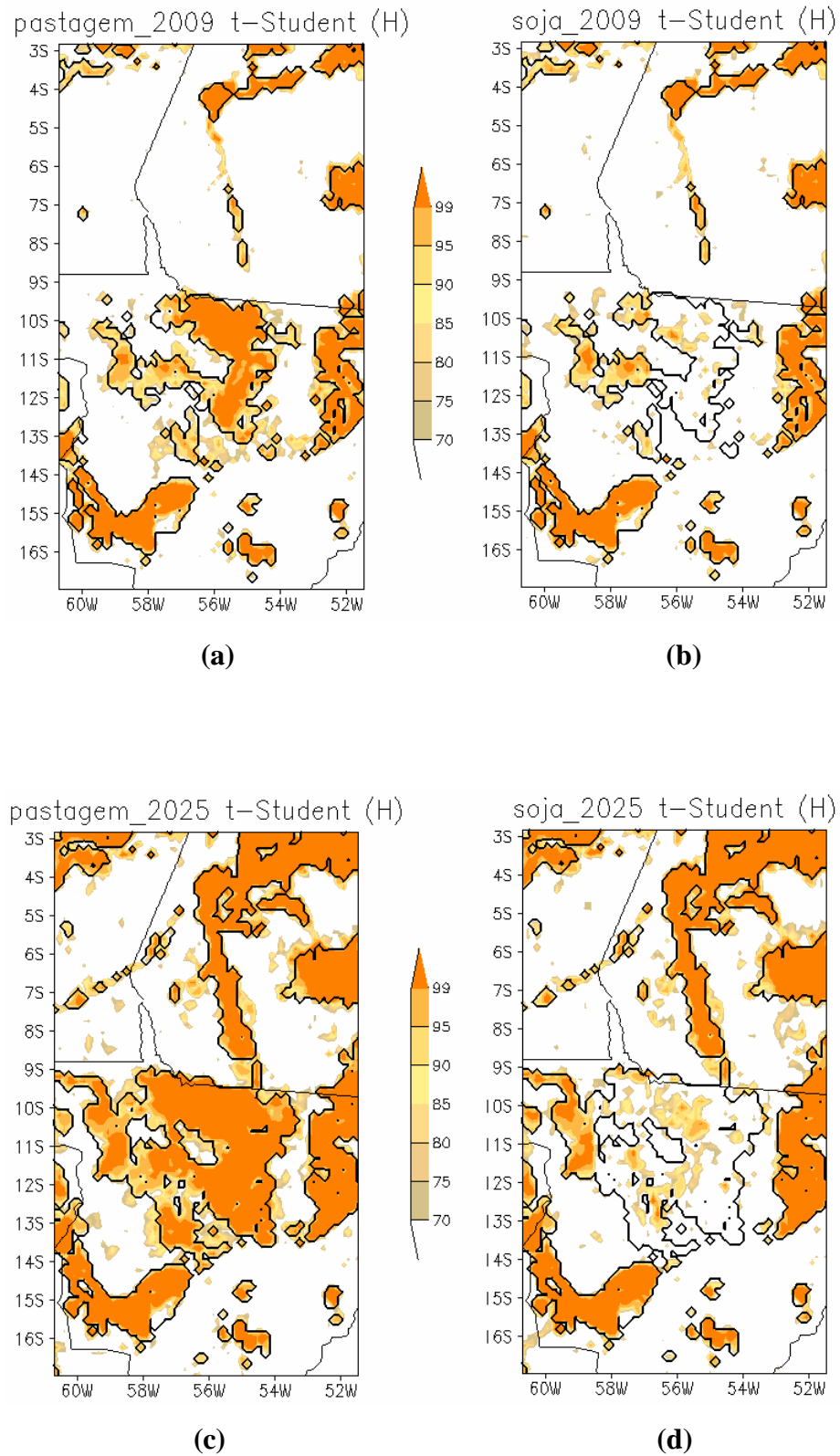


Figura 31 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor sensível para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).

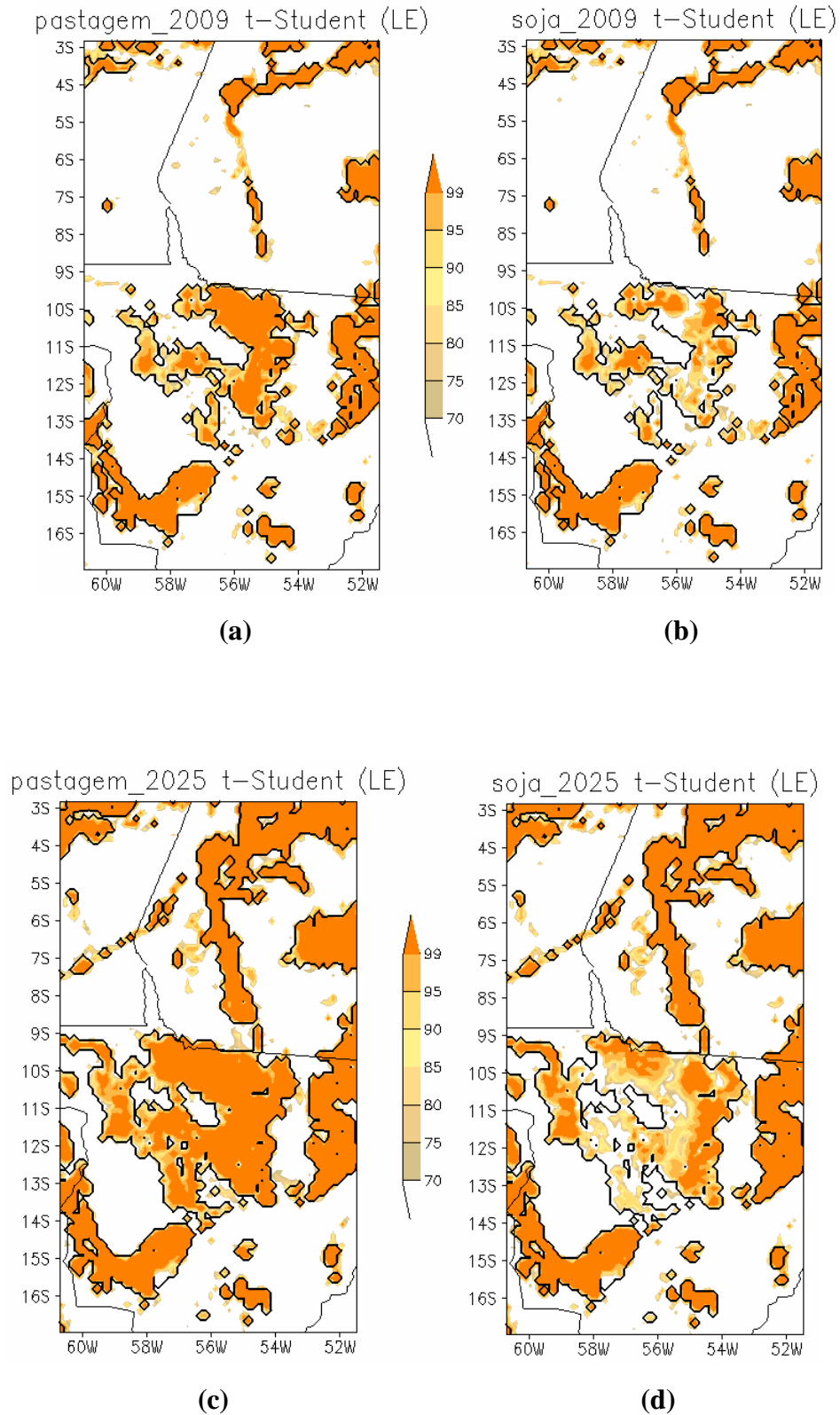


Figura 32 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor latente para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).

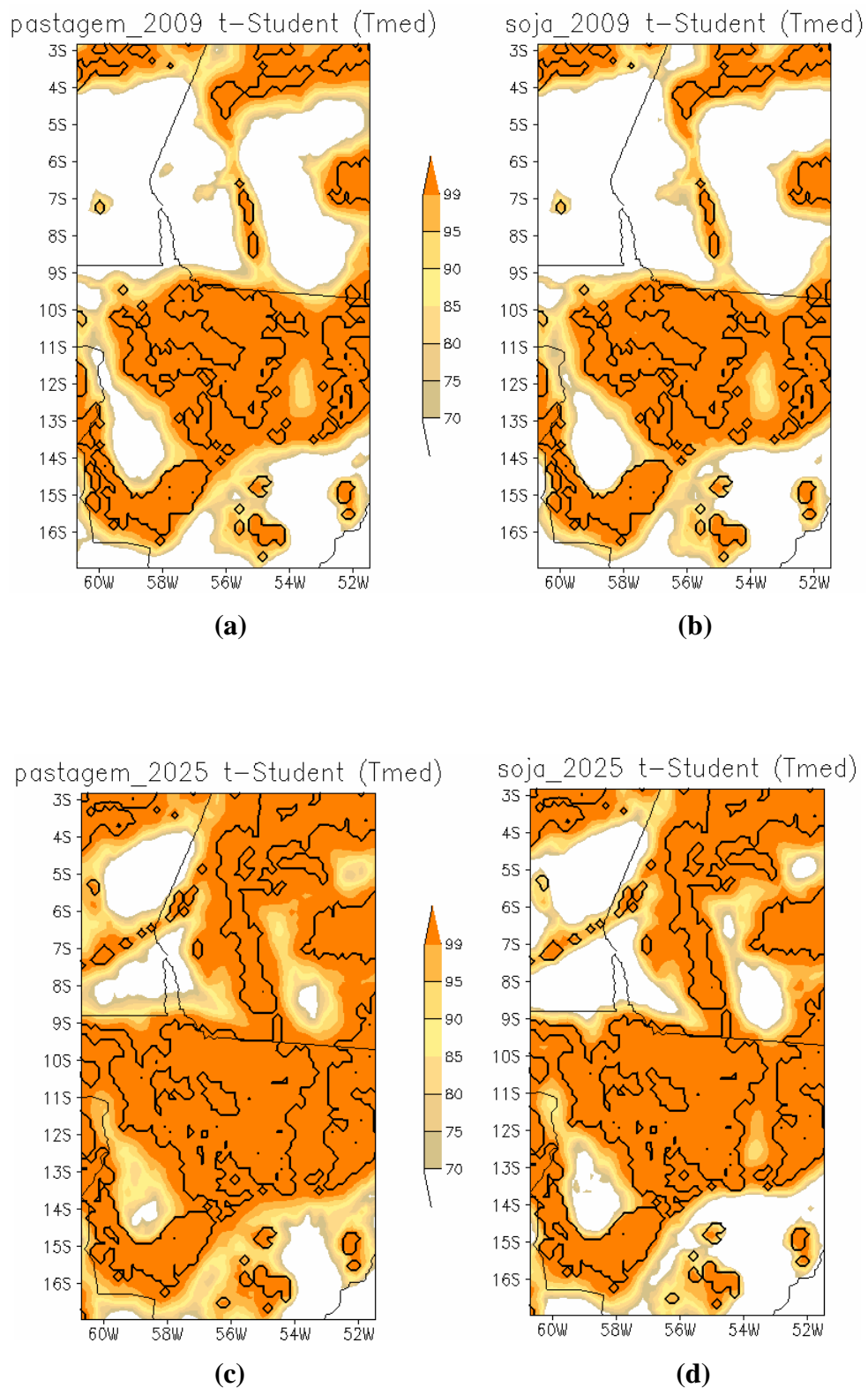


Figura 33 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de temperatura média para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).

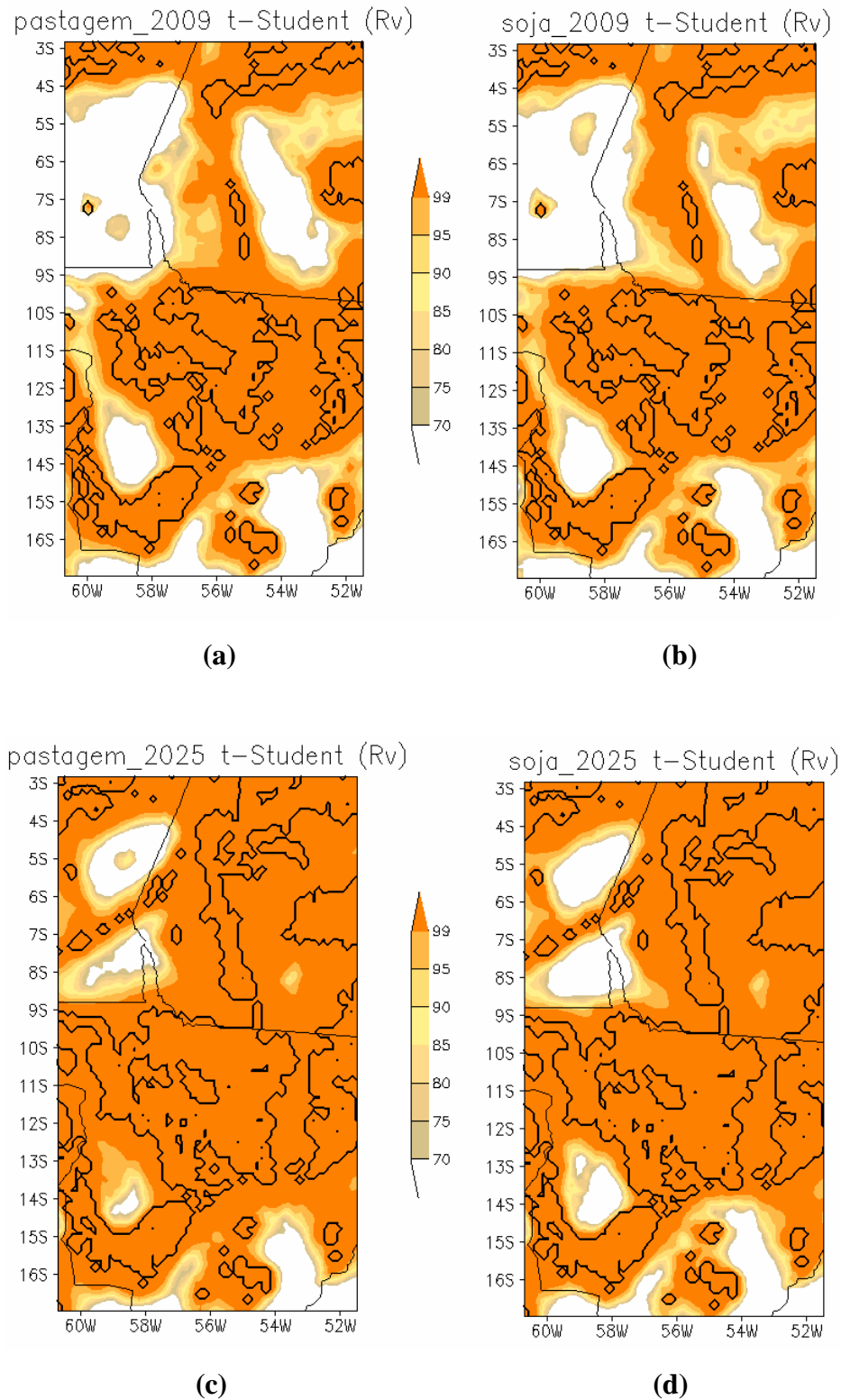


Figura 34 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da razão de mistura do vapor d'água para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).

3.3 Análise das circulações locais

As circulações locais são circulações de ar induzidas termicamente pelos processos de superfície em regiões heterogêneas. Essas circulações podem ser as convencionais, como a circulação de brisa marítima/terrestre, vale montanha, lacustre, ou não convencionais, como as induzidas por diferenças em umidade de solo ou vegetação.

Nesta seção, avaliou-se o impacto que os cenários de desflorestamento (Pastagem e Soja) podem causar, nas circulações locais. Para uma análise mais detalhada da formação de circulações locais, foi feito um corte vertical na latitude 10,476° S para os cenários PAS2009 e SOJA2009 e na latitude 11,052° S para os cenários PAS2025 e SOJA2025, faixas que apresentaram um sinal mais pronunciado de impacto na chuva nos respectivos cenários. Apresentam-se os resultados das simulações através da diferença entre as simulações Controle 1 – Pastagem 2009, Controle 1 – Soja 2009, Controle 1 – Pastagem 2025 e Controle 1 – Soja 2025.

3.3.1 Circulações locais: PAS2009 - CTL e SOJA2009 – CTL

A Figura 35 mostra um corte vertical na latitude de 10,476°S da diferença PAS2009 - CTL e SOJA2009 – CTL para a temperatura potencial (K) e componente vertical do vento (cm s^{-1}). A Figura 35a apresenta o perfil vertical médio para o horário das 21 UTC para a diferença Pastagem 2009 - Controle, onde é possível observar o aquecimento sobre as regiões perturbadas, com a formação de uma “bolha de calor”, que vai até aproximadamente 1500 m de altura. O perfil vertical de vento também foi modificado, é possível notar movimento ascendente sobre a região perturbada. Conforme as horas passam, o aquecimento sobre as regiões com pastagem diminui, mas ainda existe movimento ascendente no horário das 00 UTC e 03 UTC (Figuras 35b e 35c).

O aquecimento e o movimento ascendente é menos intenso para a região coberta por soja. A Figura 35e apresenta o perfil vertical médio para o horário das 00 UTC para a diferença Soja 2009 - Controle, sendo que neste horário o aquecimento até 500 m é maior que nos horários das 21 UTC e 03 UTC (Figuras 35d e 35f). Apesar do movimento ascendente ser menos intenso sobre a soja, ele se estende acima dos 4000 m (Figuras 35e e 35f) enquanto que sobre a pastagem o movimento ascendente só ultrapassa os 3000 m as 03 UTC (Figura 35c).

A advecção de ar mais úmido, proveniente das regiões de floresta, ao sofrer movimento ascendente devido ao aquecimento da superfície, promove o deslocamento dessa parcela úmida para níveis mais altos.

A Figura 36 mostra um corte vertical na latitude de 10,476° S onde é possível ver as diferenças na razão de mistura do vapor d'água. Na pastagem, o ar mais quente é também mais seco, ou seja, tem menor razão de mistura do vapor d'água (Figura 36a), até aproximadamente 1500m. Entretanto, esse padrão da umidade inverte-se acima do nível de 1500m: o ar torna-se mais frio e úmido no ramo ascendente sobre o desmatamento. Como o movimento ascendente sobre a soja teve início por volta das 00 UTC, é possível observar esse mesmo padrão a partir desse horário (Figura 36e), entretanto, a diferença da razão de mistura entre a floresta e soja é menor.

A Figura 37 mostra um corte na latitude de 10,476° S da diferença PAS2009 - CTL e SOJA2009 - CTL para a precipitação (mm h^{-1}) média das 21 UTC, 00 UTC e 03 UTC. Próximo à longitude 56° W, a diferença fica positiva a partir das 00 UTC em ambos os cenários (Figuras 37b e 37e). A maior variação, aumento de precipitação, ocorre por volta das 03 UTC tanto para a soja (Figura 37f) quanto para a pastagem (Figura 37c).

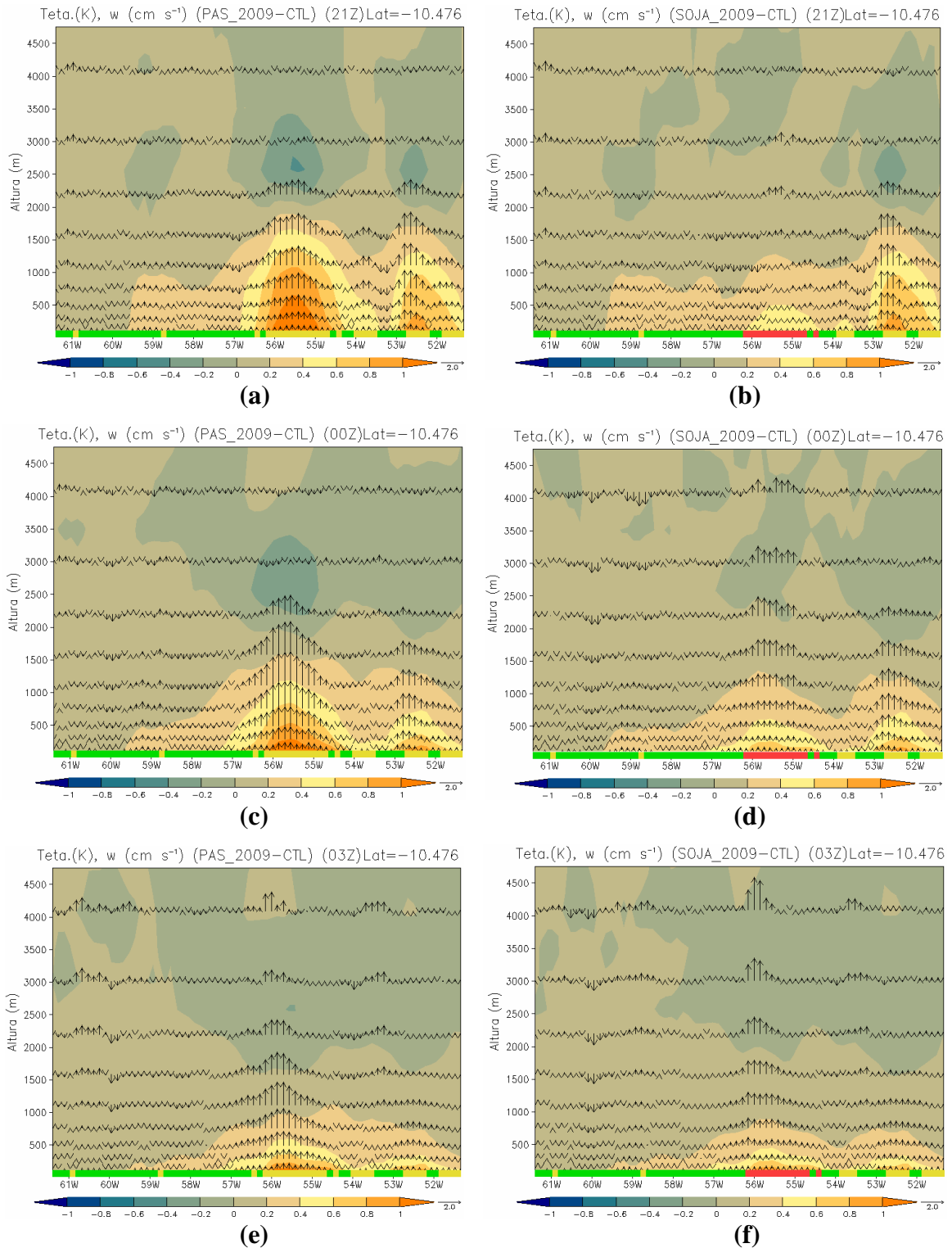


Figura 35 - Corte vertical na latitude $10,476^\circ$ S: Campo médio para o horário de 21 UTC (a,b), 00 UTC (c,d) e 03 UTC (e,f) da temperatura potencial (sombreado) (K) da diferença (PAS2009-CTL) (a,c,e) e (SOJA2009-CTL) (b,d,f). As setas indicam a velocidade vertical e zonal do vento (w e u) em cm s^{-1} . A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com soja (vermelho).

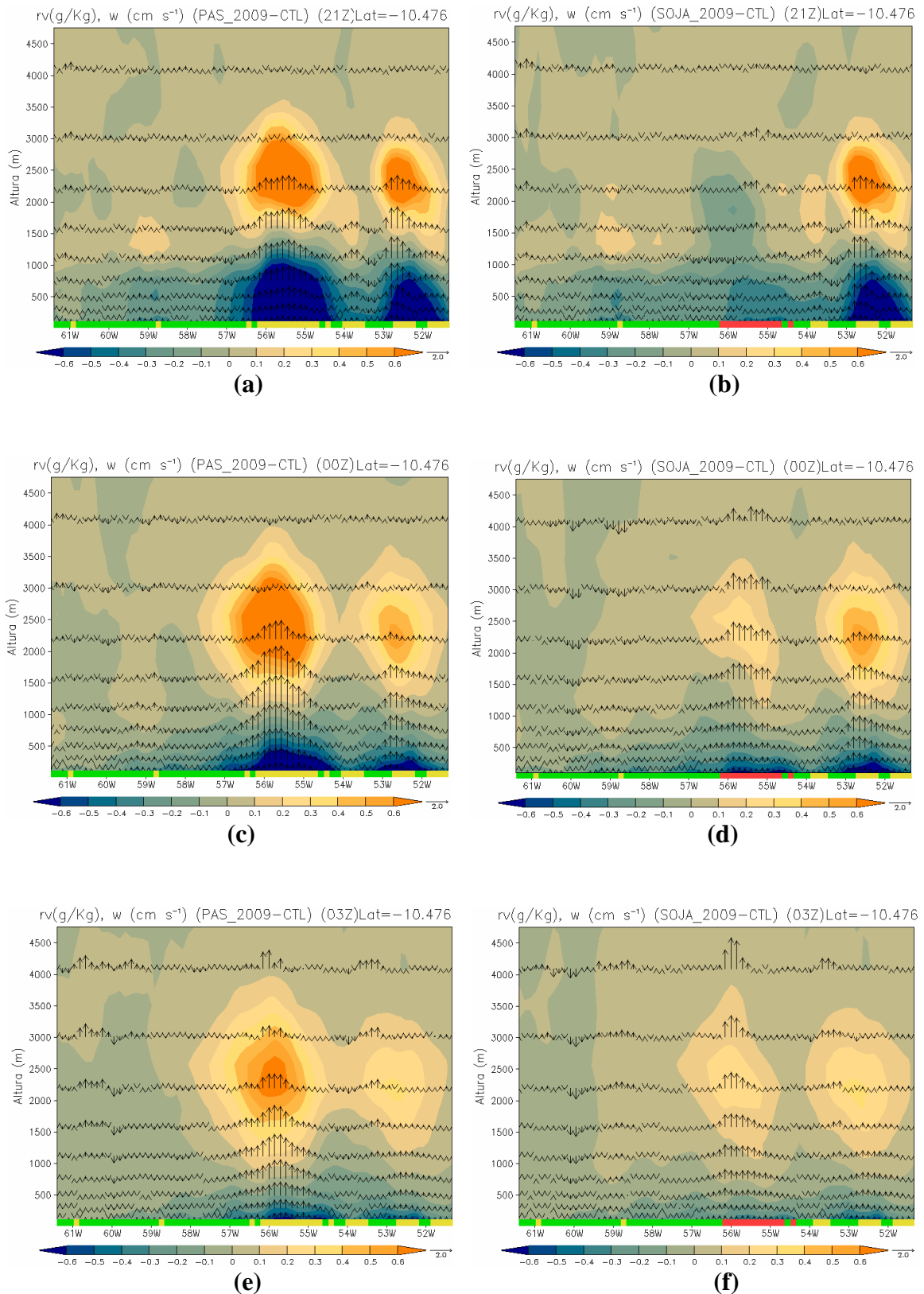


Figura 36 - Corte vertical na latitude $10,476^{\circ}$ S: Campo médio para o horário de 21 UTC (a,b), 00 UTC (c,d) e 03 UTC (e,f) da razão de mistura (sombreado) (g/kg) da diferença (PAS2009-CTL) (a,c,e) e (SOJA2009-CTL) (b,d,f). As setas indicam a velocidade vertical zonal do vento (w e u) em $cm s^{-1}$. A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com soja (vermelho).

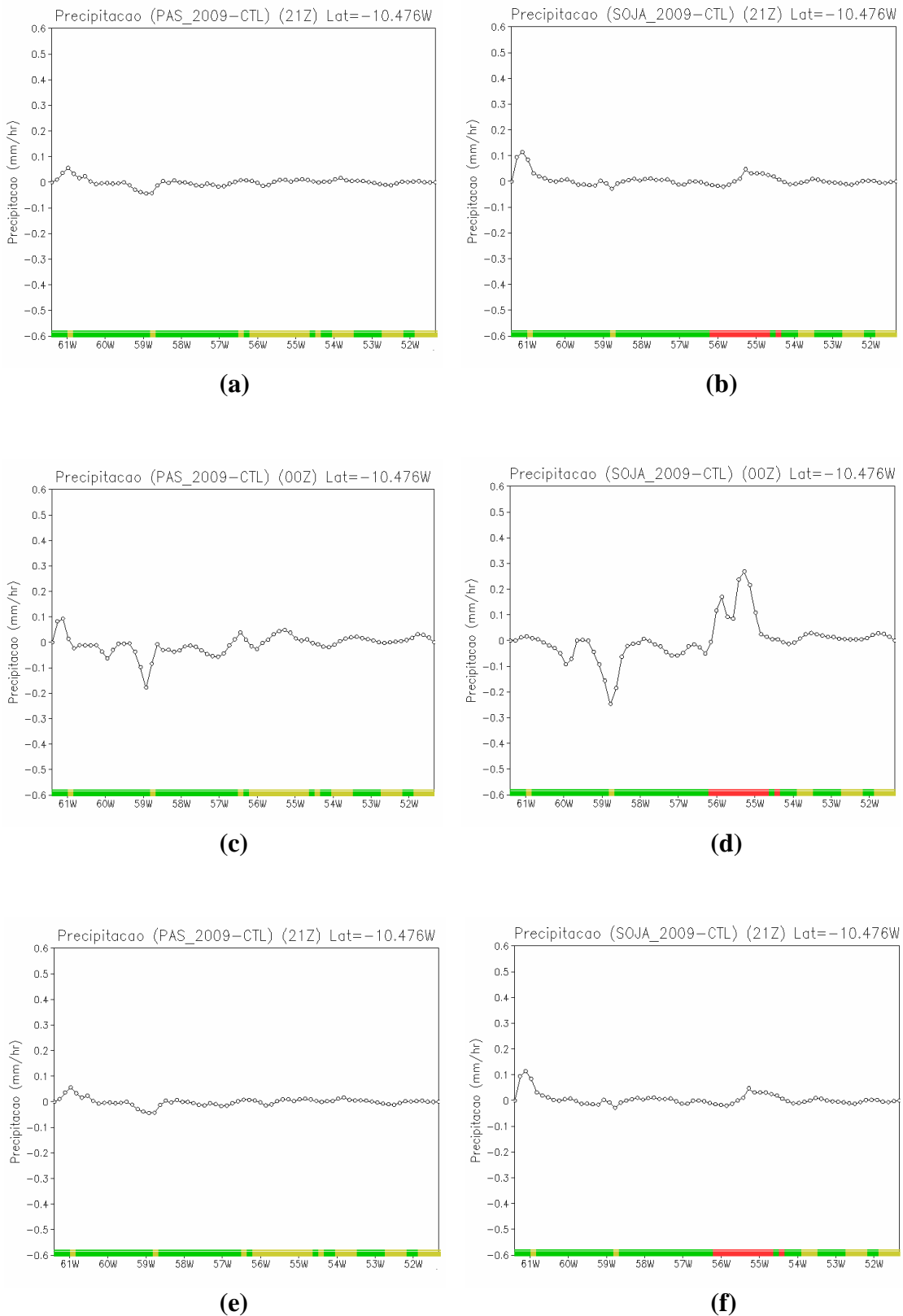


Figura 37 - Corte vertical na latitude $10,476^{\circ}$ S: Campo médio para o horário de 21 UTC (a,b), 00 UTC (c,d) e 03 UTC (e,f) da precipitação (mm h^{-1}) da diferença (PAS2009-CTL) (a,c,e) e (SOJA2009-CTL) (b,d,f). A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com soja (vermelho).

3.3.2 Circulações locais: PAS2025 - CTL e SOJA2025 – CTL

A Figura 38 mostra um corte vertical na latitude de 11,196° S da diferença PAS2025 - CTL e SOJA2025 – CTL para a temperatura potencial (K) e componente vertical do vento (cm s^{-1}). Na pastagem o horário das 21 UTC (Figura 38a) também apresentou maior aquecimento assim como na simulação Pastagem 2009, com a formação de uma “bolha de calor”, que vai até aproximadamente 1500 m de altura. Conforme as horas passam, o aquecimento sobre as regiões com pastagem diminui, mas por estas abrangerem uma maior área o aquecimento persiste (Figuras 38b e 38c) e é maior que na diferença Pastagem 2009 – CTL (Figuras 35b e 35c).

Assim como na seção anterior foi observado que o aquecimento sobre regiões com soja é maior às 00 UTC (Figura 35e), acontecendo o mesmo na diferença SOJA2025 – CTL (Figura 38e). O aquecimento sobre a soja também persiste por mais tempo nesse cenário, sendo possível notar a “bolha de calor” acima dos 500 m às 03 UTC (Figura 38f).

A Figura 39 mostra um corte vertical na latitude de 11,196° S para a diferença na razão de mistura do vapor d’água nos casos PAS2025 – CTL e SOJA2025 - CTL. Na pastagem, o ar é mais seco, ou seja, tem menor razão de mistura do vapor d’água (Figura 39a), até aproximadamente 1500 m. Esse padrão da umidade inverte-se acima do nível de 1500 m (Figuras 39a, 39b e 39c), e permanece intenso por mais tempo que no caso PAS2009 – CTL (Figuras 36a, 36b e 36c). Sobre a soja só é possível observar esse mesmo padrão a partir das 03 UTC (Figura 39e).

A Figura 40 mostra um corte na latitude de 10,196° S da diferença PAS2025 - CTL e SOJA2025 – CTL para a precipitação (mm h^{-1}) média das 21, 00 e 03 UTC. Próximo à longitude 56° W, a diferença fica positiva a partir das 00 UTC em ambos os cenários (Figuras 40b e 40e). A maior variação (aumento de precipitação) ocorre por volta das 03 UTC tanto para a soja (Figura 40f) quanto para a pastagem (Figura 40c).

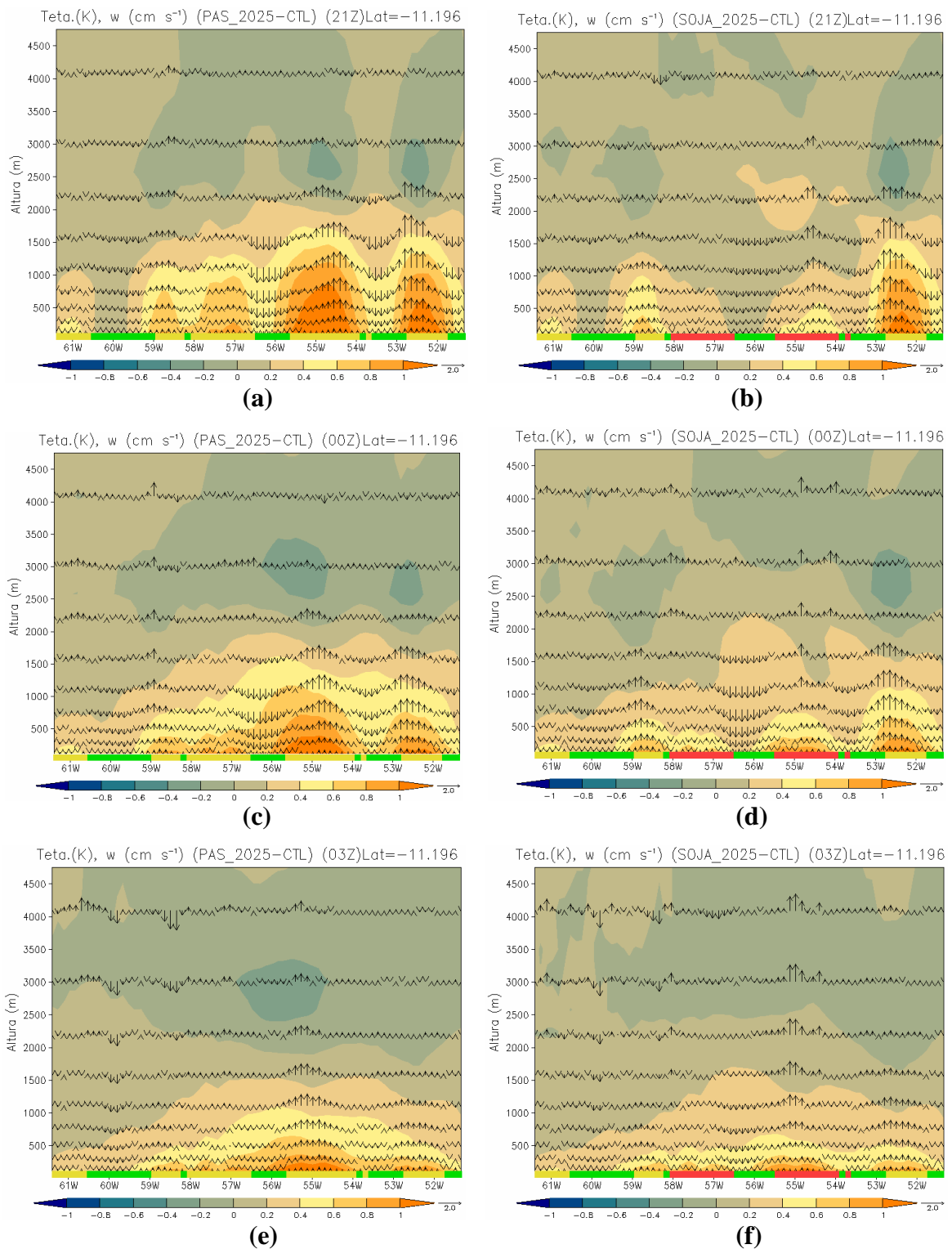


Figura 38 - Corte vertical na latitude 11,96° S: Campo médio para o horário de 21 UTC (a,d), 00 UTC (b,e) e 03 UTC (c,f) da temperatura potencial (sombreado) (K) da diferença (PAS2009-CTL) (a,b,c) e (SOJA2009-CTL) (d,e,f). As setas indicam a velocidade vertical e zonal do vento (w e u) em cm s⁻¹. A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com soja (vermelho).

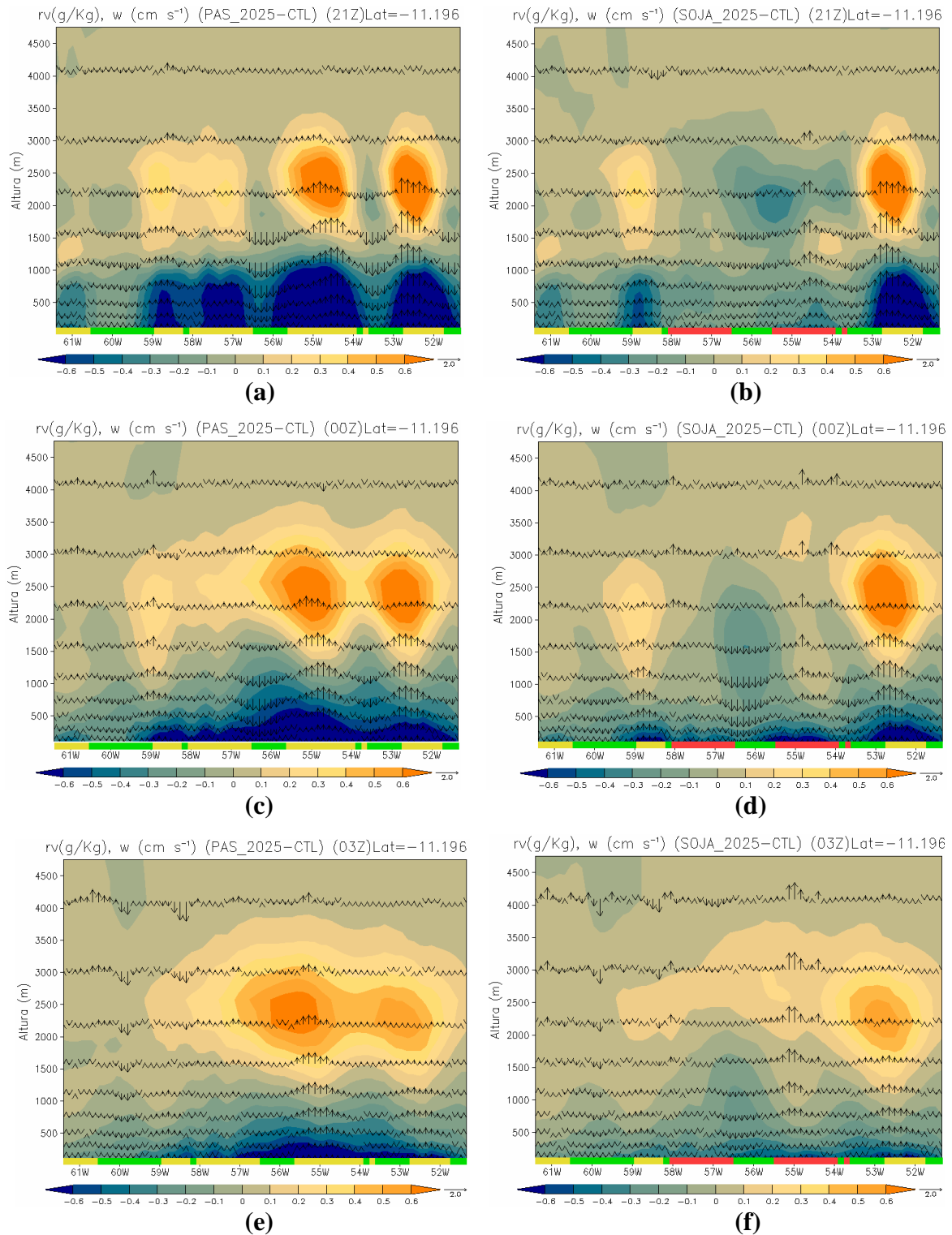


Figura 39 - Corte vertical na latitude $11,196^\circ$ S: Campo médio para o horário de 21 UTC (a,b), 00 UTC (c,d) e 03 UTC (e,f) da razão de mistura (sombreado) (g/kg) da diferença (PAS2009-CTL) (a,c,e) e (SOJA2009-CTL) (b,d,f). As setas indicam a velocidade vertical e zonal do vento (w e u) em cm s^{-1} . A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com soja (vermelho).

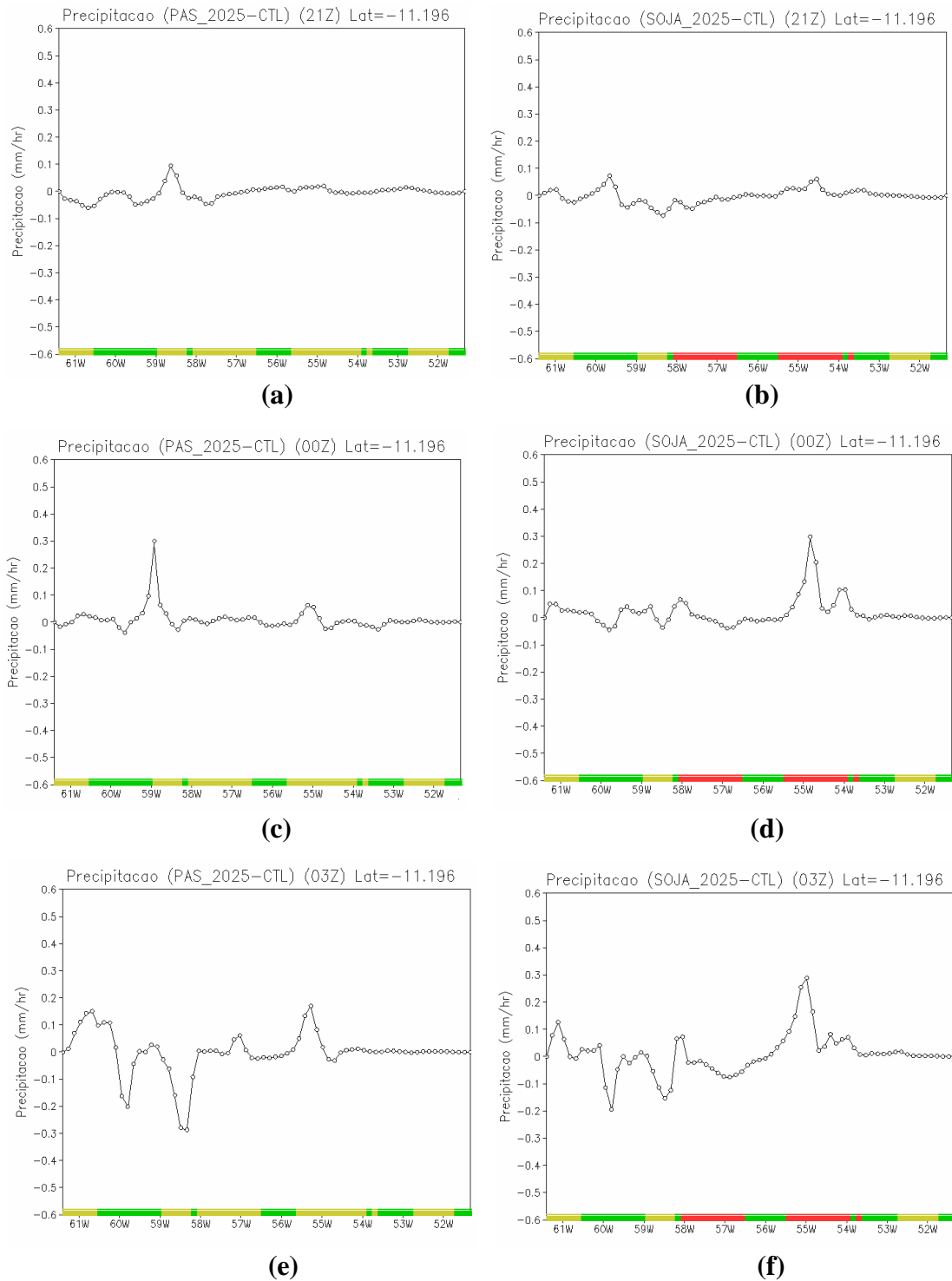


Figura 40 - Corte vertical na latitude 11,196° S: Campo médio para o horário de 21 UTC (a,b), 00 UTC (c,d) e 03 UTC (e,f) da taxa de precipitação (mm h^{-1}) da diferença (PAS2009-CTL) (a,c,e) e (SOJA2009-CTL) (b,d,f). A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com soja (vermelho).

3.3.3 Perfil Vertical

Zhang e Henderson-Sellers (1996) avaliaram as mudanças decorrentes do desflorestamento usando um conjunto de medidas estatísticas e, também, analisaram as mudanças dos fluxos radiativos e turbulentos na camada atmosférica logo acima da área desflorestada. Segundo estes autores, as mudanças nos fluxos dentro da coluna atmosférica podem influenciar a circulação regional e, potencialmente, a circulação atmosférica de grande escala. A evapotranspiração e o fluxo de calor sensível estão relacionados à estrutura dinâmica nos baixos níveis da atmosfera, incluindo: a velocidade horizontal do vento, a estabilidade atmosférica e a eficiência da transferência aerodinâmica entre a superfície e a atmosfera logo acima.

O perfil vertical do vento, da temperatura e da umidade na troposfera sobre a região perturbada (média no período de 01/11/2006 à 01/04/2007) é apresentado na Figura 41. A região perturbada analisada nos cenários PAS2009 e SOJA2009 é compreendida entre 13° e 9° S e 54° e 57° W, e nos cenários PAS2025 e SOJA2025 entre 14° e 9° S e 53° e 58° W. O escoamento do ar meridional (de sul) em baixos níveis foi mais intenso que o zonal (de leste). Após o desflorestamento (cenários PAS2009, SOJA2009, PAS2025 e SOJA2025), o vento de sul nos baixos níveis da atmosfera (Figuras 41d e 41i) foi aumentado significativamente (aproximadamente de 40% em todos os cenários). As mudanças no perfil do vento meridional não se tornaram mais significativas à medida que a área perturbada aumentou. Com relação ao vento zonal, ocorreram pequenos aumentos após o desflorestamento nos primeiros metros. O perfil vertical apresentou um máximo secundário próximo à 400 m e um mínimo em torno dos 900 m (Figuras 41c e 41h).

O vento horizontal apresentou aumento de aproximadamente 25% nos primeiros metros em todos os cenários de desflorestamento (Figuras 41e e 41j). Após o desflorestamento, a troposfera nos baixos níveis tornou-se mais seca como resultado da redução da

evapotranspiração. A redução na razão de mistura ficou em torno de 3% nos cenários PAS2009 e PAS2025 e 1,5% nos cenários SOJA2009 e SOJA2025 (Figuras 41b e 41g). Houve um aumento da temperatura nos baixos níveis da atmosfera. Esse aumento em baixos níveis está relacionado à redução na evapotranspiração e conseqüentemente no fluxo de calor latente a superfície.

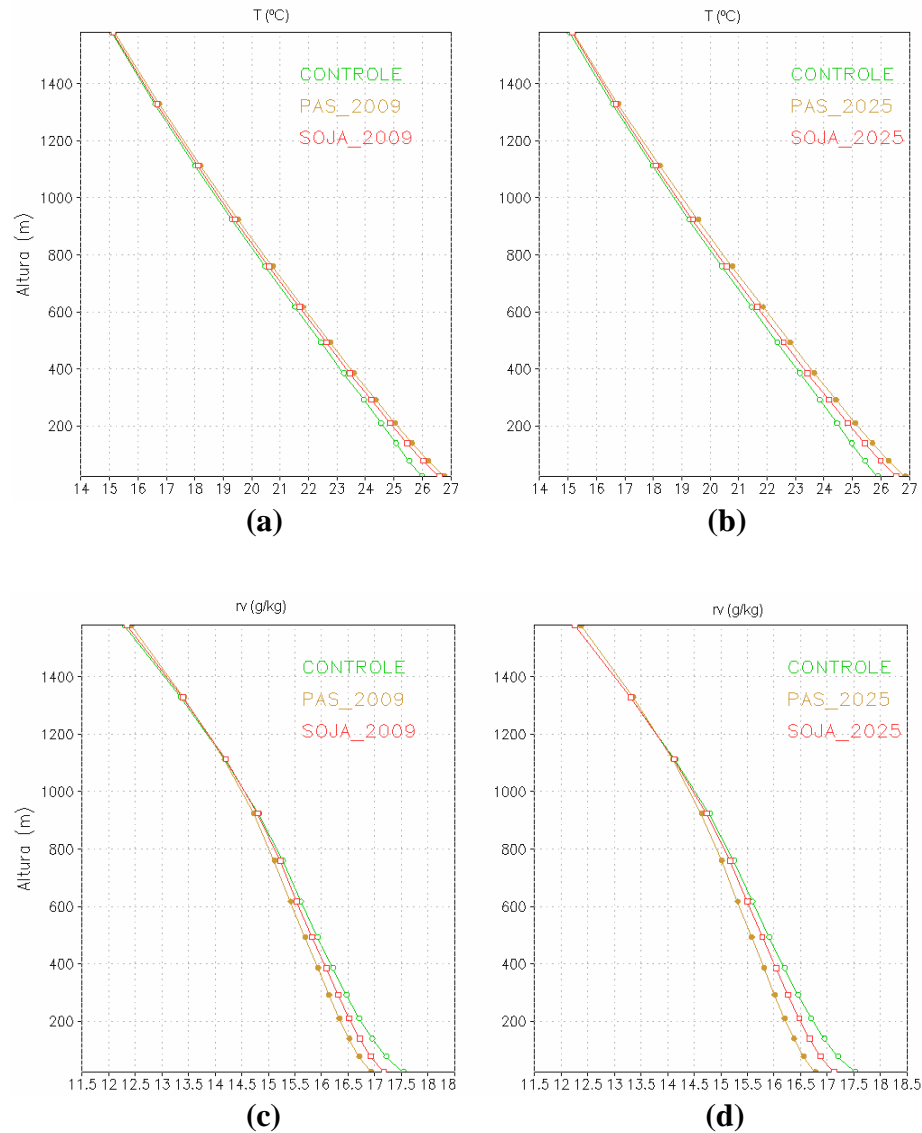


Figura 41 – Perfil vertical médio do período da (a,b) temperatura (C°), (c,d) razão de mistura (g/kg), (e,f) velocidade zonal ($m s^{-1}$), (g,h) velocidade meridional ($m s^{-1}$) e (i,j) vento horizontal ($m s^{-1}$) para os cenários CTL, PAS2009, SOJA2009, PAS2025 e SOJA2025.

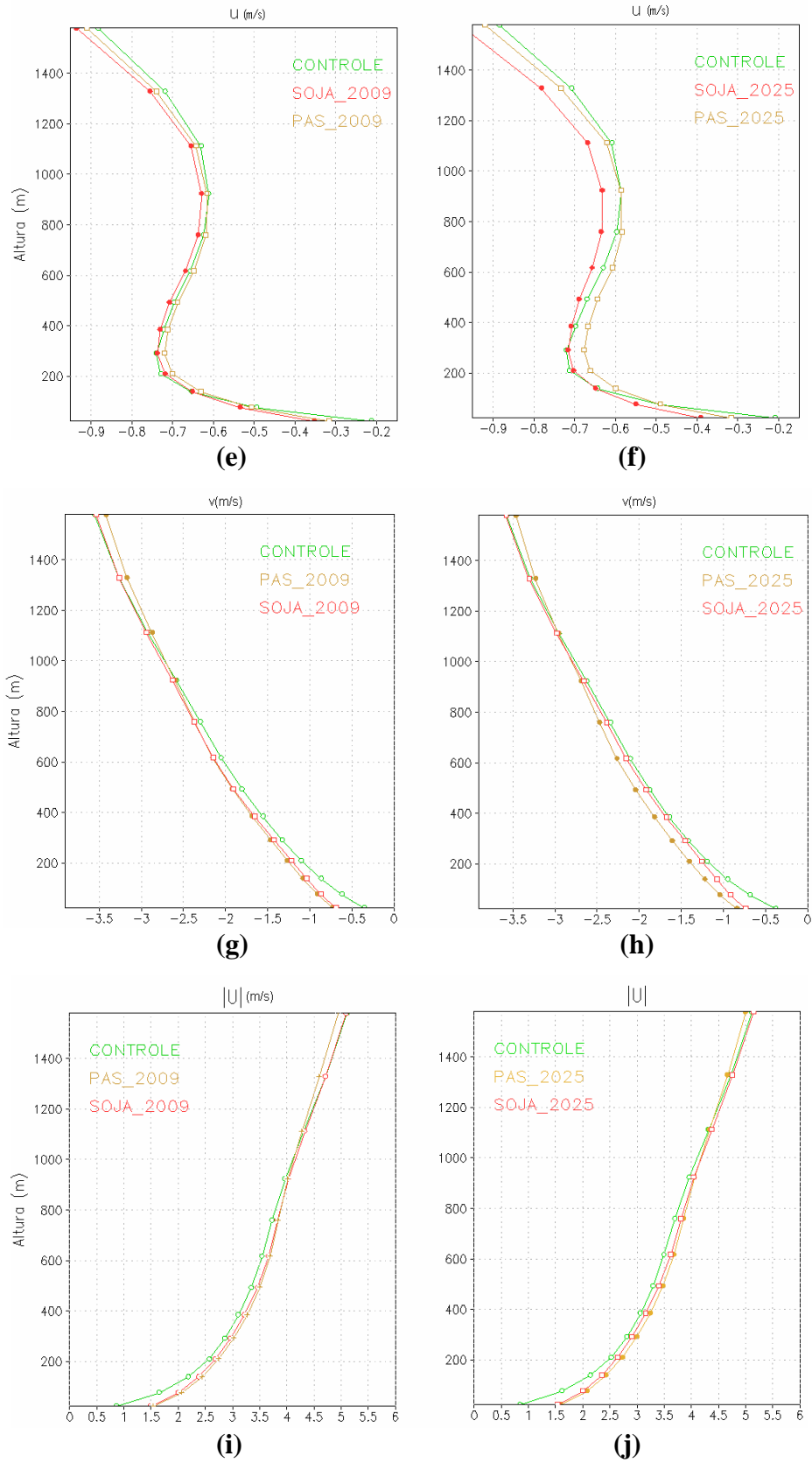


Figura 41 – Continuação.

3.4 O cenário Cultura

O principal objetivo dessa seção foi avaliar as diferenças entre a cultura genérica originalmente prescrita pelo modelo numérico e a soja (cultura implementada no modelo e discutida na seção 2.7). Avaliou-se também o impacto que o cenário de desflorestamento CULTURA2025 pode causar, em escala regional, nos balanços de radiação, energia e água. Apresentam-se os resultados das simulações utilizando o cenário de desflorestamento Cultura e Soja, tendo sido avaliado através da diferença entre as simulações Controle 1 – Cultura 2025, Cultura 2025 – Soja 2025. Além disso, também foi calculada a porcentagem de aumento/redução dos fluxos de superfície no interior da região substituída por soja, tendo como área interna os limites prescritos no cenário SOJA2025.

3.4.1 Mudanças regionais: CULTURA2025 – CTL

No cenário CULTURA2025 (Figura 42), houve aumento da precipitação no interior da região perturbada próximo à latitude/longitude 11°S/56°W, e tanto a intensidade quanto a distribuição espacial foram bastante semelhantes à do cenário SOJA2025 (Figura 21b).

Assim como nos cenários SOJA2009 e SOJA2025, o saldo de radiação também apresentou um decréscimo, aproximadamente 13% (Tabela 8) nas áreas perturbadas (Figura 43). Como na média o albedo prescrito para a soja é maior que o da cultura, o decréscimo na simulação SOJA2025 (-16%) foi maior que o da simulação CULTURA2025 (-13%). A irradiância solar na área perturbada (Figura 44) também aumentou no cenário CULTURA2025 (9%) na mesma porcentagem que o cenário SOJA2025.

O padrão do fluxo de calor sensível foi bem diferente do cenário SOJA2025. Na simulação Cultura 2025 (Figura 45) e Soja 2025 houve aumento/redução de 24%/-4%, respectivamente. O fluxo de calor latente (Figura 46) também mostrou variação, tendo redução -28% / -9% nas simulações Cultura 2025 e Soja 2025, respectivamente.

Houve aumento da temperatura (Figura 47) e redução da razão de mistura (Figura 48) no interior da região perturbada. O aumento/redução da temperatura/razão de mistura foi maior na simulação Cultura 2025 quando comparada à simulação Soja 2025.

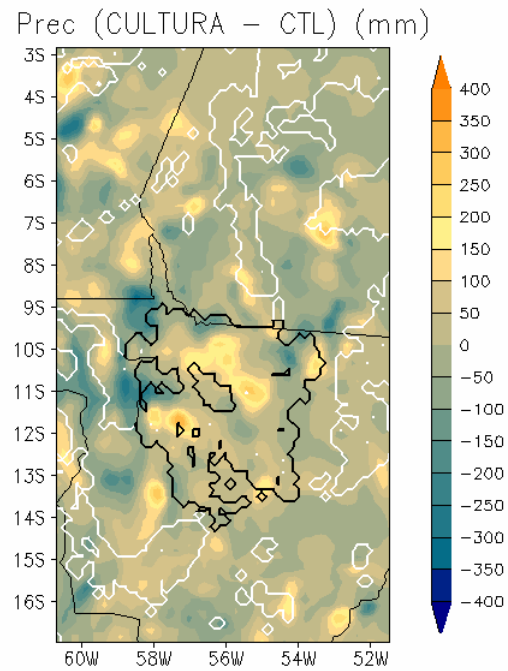


Figura 42 – Diferença [Cultura – Controle] para a Precipitação acumulada no período.

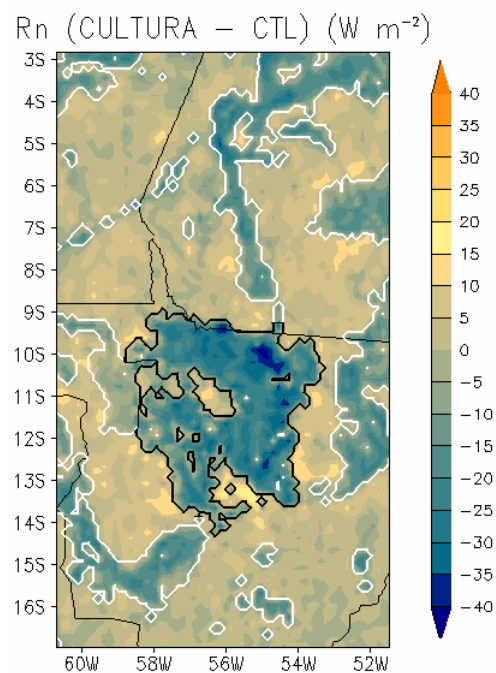


Figura 43 – Diferença [Cultura – Controle] do Saldo de Radiação(Rn) para o período.

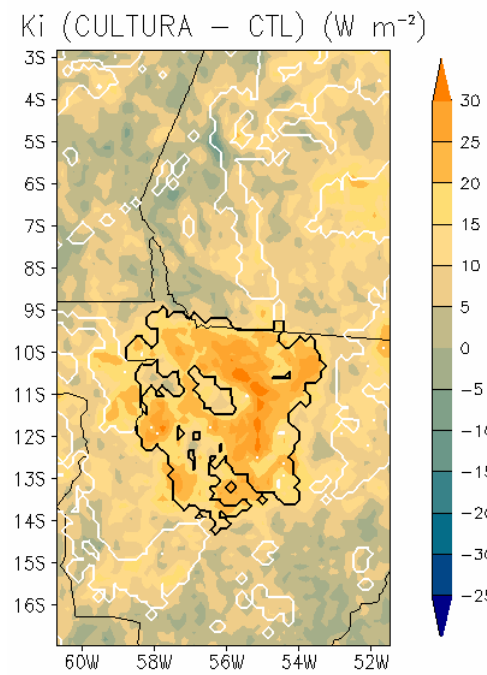


Figura 44 – Diferença [Cultura – Controle] da Irradiância Solar (K_i) para o período.

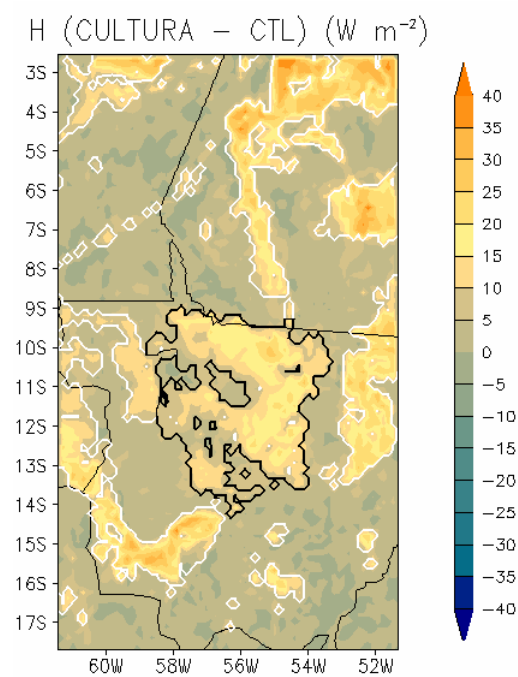


Figura 45 – Diferença [Cultura – Controle] de fluxo de calor sensível para o período.

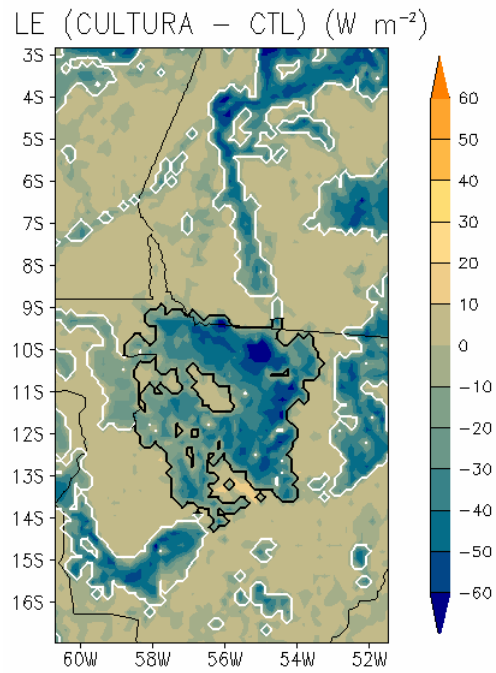


Figura 46 – Diferença [Cultura – Controle] de fluxo de calor latente para o período.

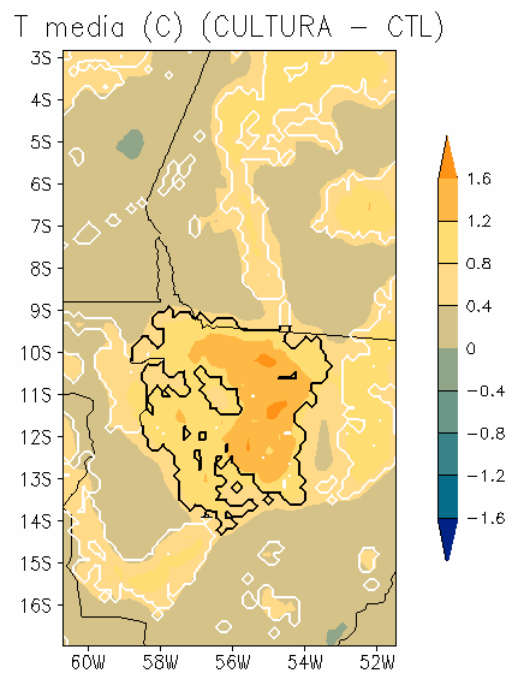


Figura 47 – Diferença [Cultura – Controle] de temperatura média para o período.

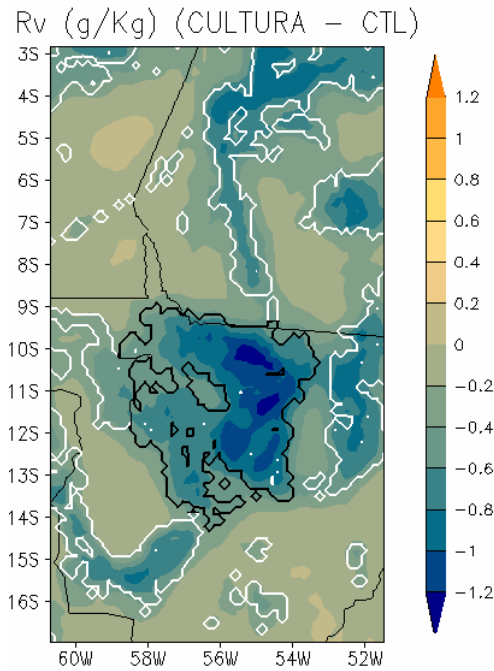


Figura 48 – Diferença [Cultura – Controle] da razão de mistura do vapor d'água para o período.

Tabela 8 – Valores médios para o interior da área perturbada e percentual de aumento ou diminuição. Valores obtidos para área definida nos cenários CULTURA2025, no interior da região coberta por soja.

Variáveis	Descrição	Área Desmatada	
		CULTURA2025-CTL	
		(%)	valor
Rn ($W m^{-2}$)	Saldo de Rad.	-13	163(269)
Ki ($W m^{-2}$)	Irrad. Solar Incid.	9	265(359)
H ($W m^{-2}$)	Fluxo de Calor Sem.	24	73(95)
LE ($W m^{-2}$)	Fluxo de Calor Lat.	-28	109(133)

3.4.2 Análise estatística

O teste t-Student (seção 2.11) também foi aplicado para o cenário Cultura 2025 para discutir a significância estatística dos impactos do desmatamento. A precipitação (Figura 49) apresentou significância de moderada a elevada no interior da região perturbada, assim como ocorreu no cenário Soja 2025 (Figura 28d).

As variáveis saldo de radiação, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente apresentaram significância estatística de elevada a muito elevada, predominantemente no interior da região perturbada (Figuras 50, 52 e 53). A irradiância solar incidente teve nível moderado de significância estatística (Figura 51).

A temperatura (Figura 54) e razão de mistura (Figura 55) apresentaram significância estatística muito elevada localizadas predominantemente no interior da área perturbada. De maneira geral, com exceção dos fluxos de calor latente e sensível, os níveis de significância estatística encontrados para o cenário Cultura 2025 foram semelhantes aos do cenário Soja 2025.

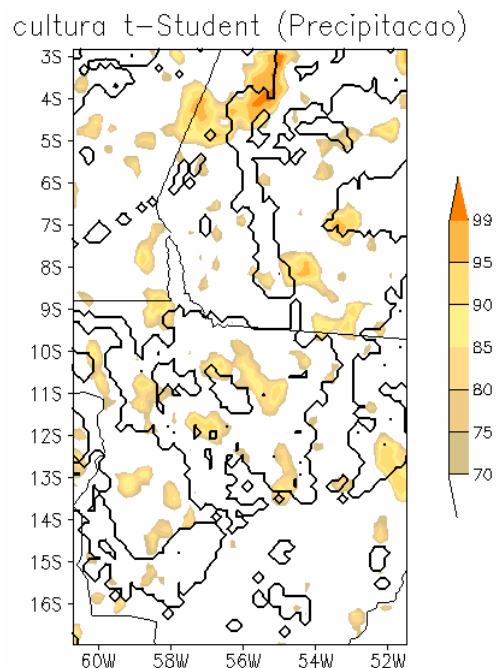


Figura 49 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] para a Precipitação acumulada no período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).

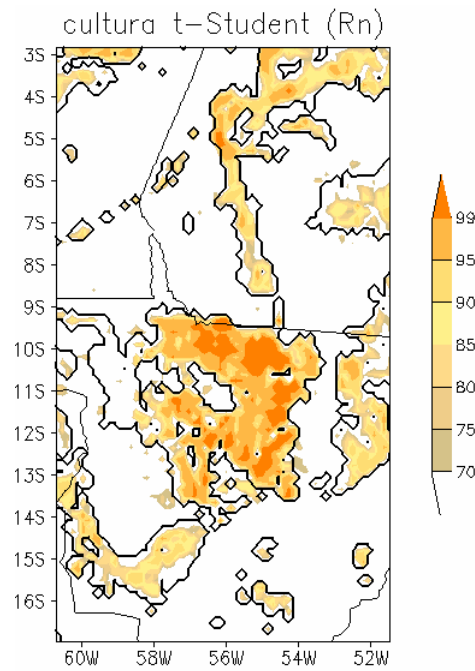


Figura 50 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] do Saldo de Radiação(Rn) para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).

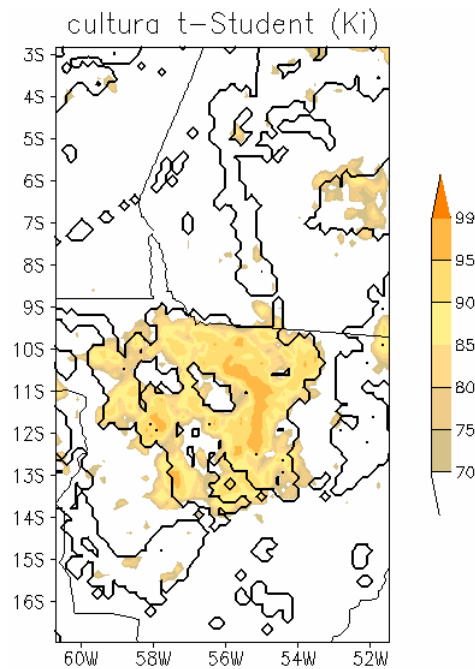


Figura 51 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da Irradiância Solar (Ki) para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).

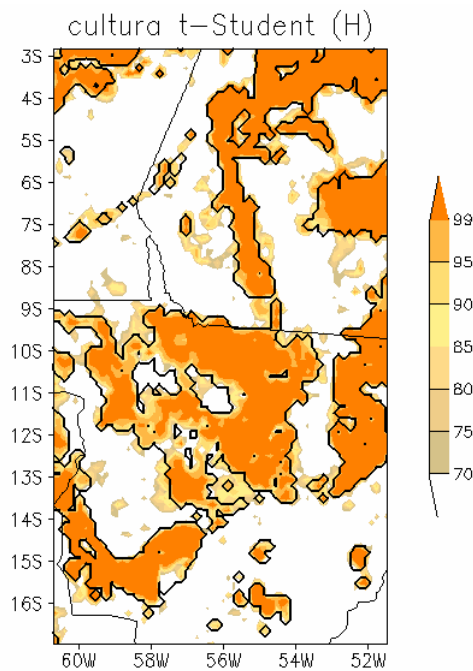


Figura 52 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor sensível para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).

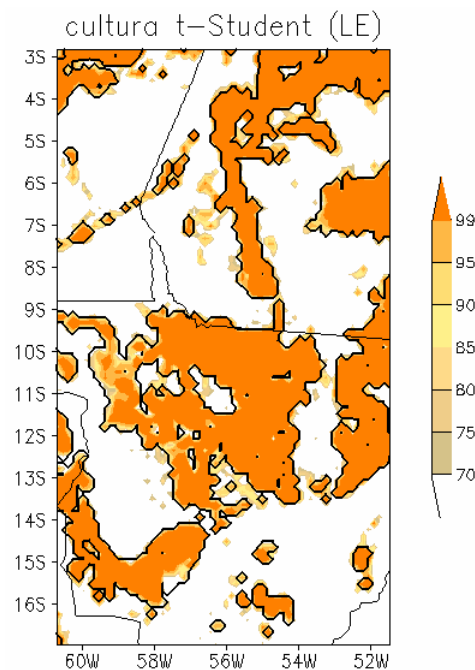


Figura 53 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de fluxo de calor latente para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).

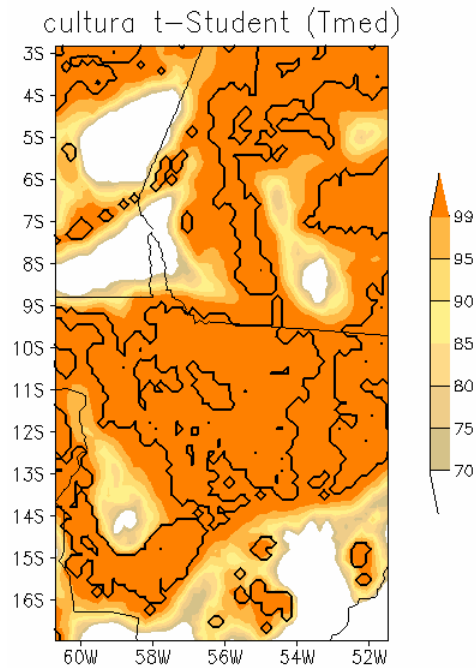


Figura 54 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] de temperatura média para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).

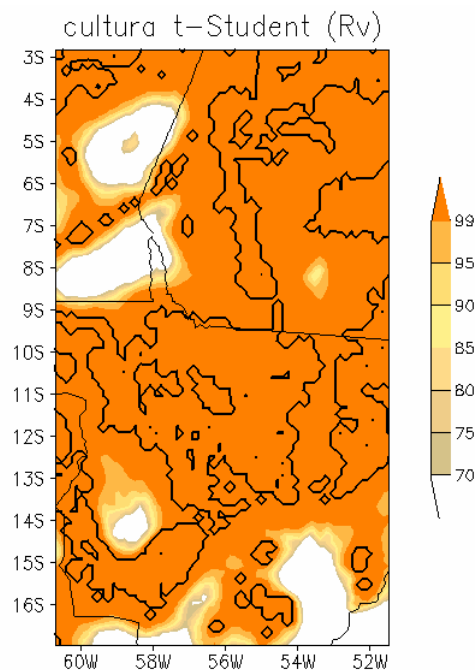


Figura 55 – Diferença [Pastagem (Soja)–Controle] da razão de mistura do vapor d'água para o período. As escalas apresentam valores relativos à significância moderada, elevada e muito elevada do teste t-Student. O perímetro de desmatamento (linha cheia) é indicado para os cenários Pastagem 2009 (a), Soja 2009 (b), Pastagem 2025 (c) e Soja 2025 (d).

3.4.3 Circulações locais: CULTURA2025 – CTL

A Figura 56 mostra um corte vertical na latitude de 11,196° S da diferença CULTURA2025 - CTL para a temperatura potencial (K), razão de mistura (g/kg) e componente vertical do vento (cm s^{-1}). Na cultura (Figura 56a) o horário das 21 UTC também apresentou maior aquecimento assim como na simulação Pastagem 2025. Na seção 4.3.2 foi observado que o aquecimento sobre regiões com soja é maior as 00 UTC (Figura 39e).

Sobre a cultura o padrão da razão de mistura é semelhante ao da pastagem. O ar é mais seco, ou seja, tem menor razão de mistura do vapor d'água (Figura 56c), até aproximadamente 1500 m. Esse padrão da umidade inverte-se acima do nível de 1500 m (Figuras 56c, 56d e 56e).

A Figura 57 mostra um corte na latitude de 10,196° S da diferença CULTURA2025 - CTL para a taxa de precipitação (mm h^{-1}) média das 21, 00 e 03 UTC. Próximo à longitude 56° W, a diferença fica positiva a partir das 00 UTC (Figura 57b). A maior variação, com aumento de precipitação, ocorre por volta das 03 UTC (Figura 57c), padrão também encontrado sobre a pastagem e a soja.

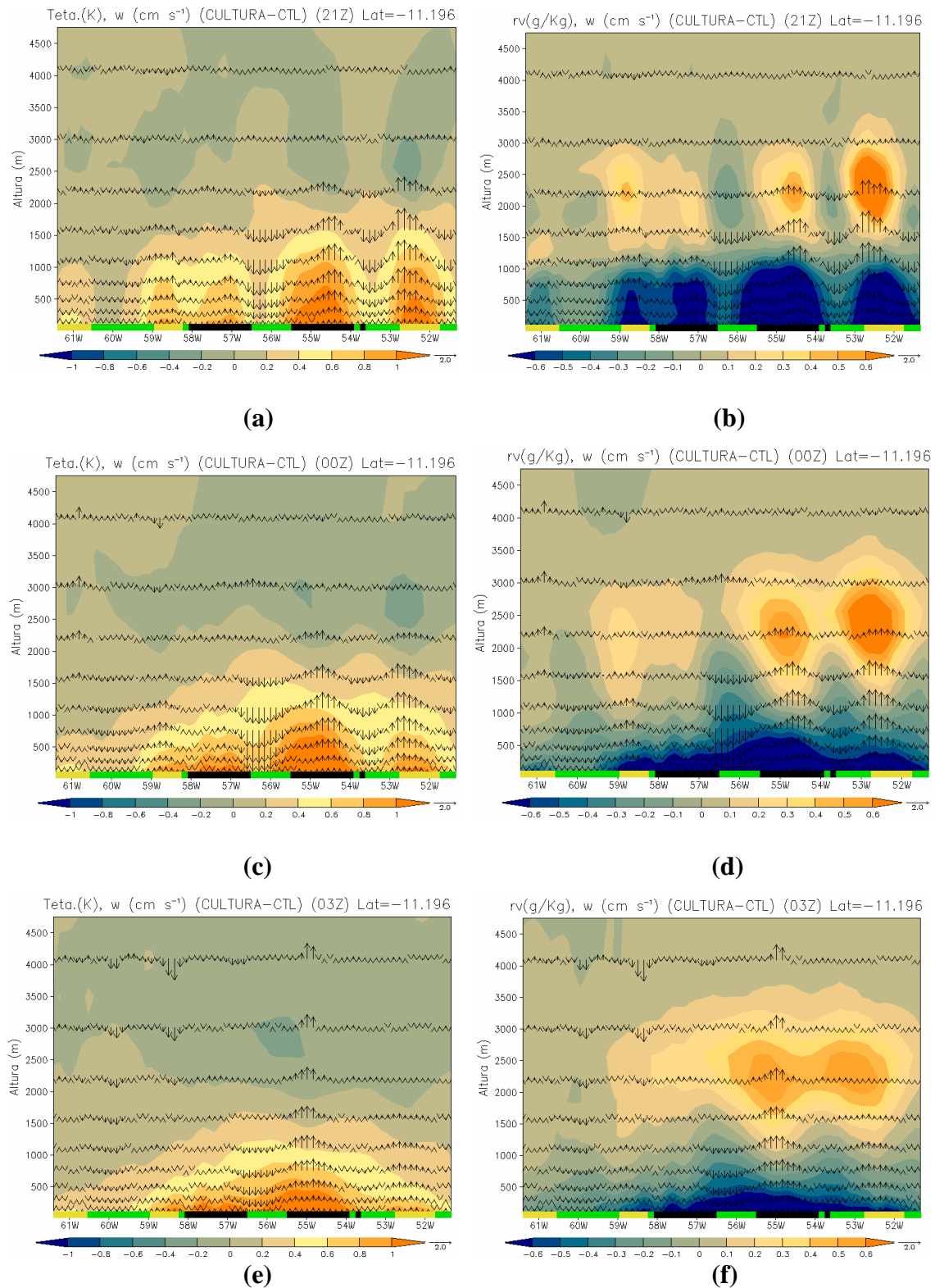


Figura 56 - Corte vertical na latitude 11,196° S: Campo médio para o horário de 21 UTC, 00 UTC e 03 UTC da temperatura potencial (K) (a, c, e) e razão de mistura (g/kg) (b, d, f) (sombreado) da diferença CULTURA2025-CTL. As setas indicam a velocidade vertical e zonal do vento (w e u) em cm s^{-1} . A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com cultura (preto).

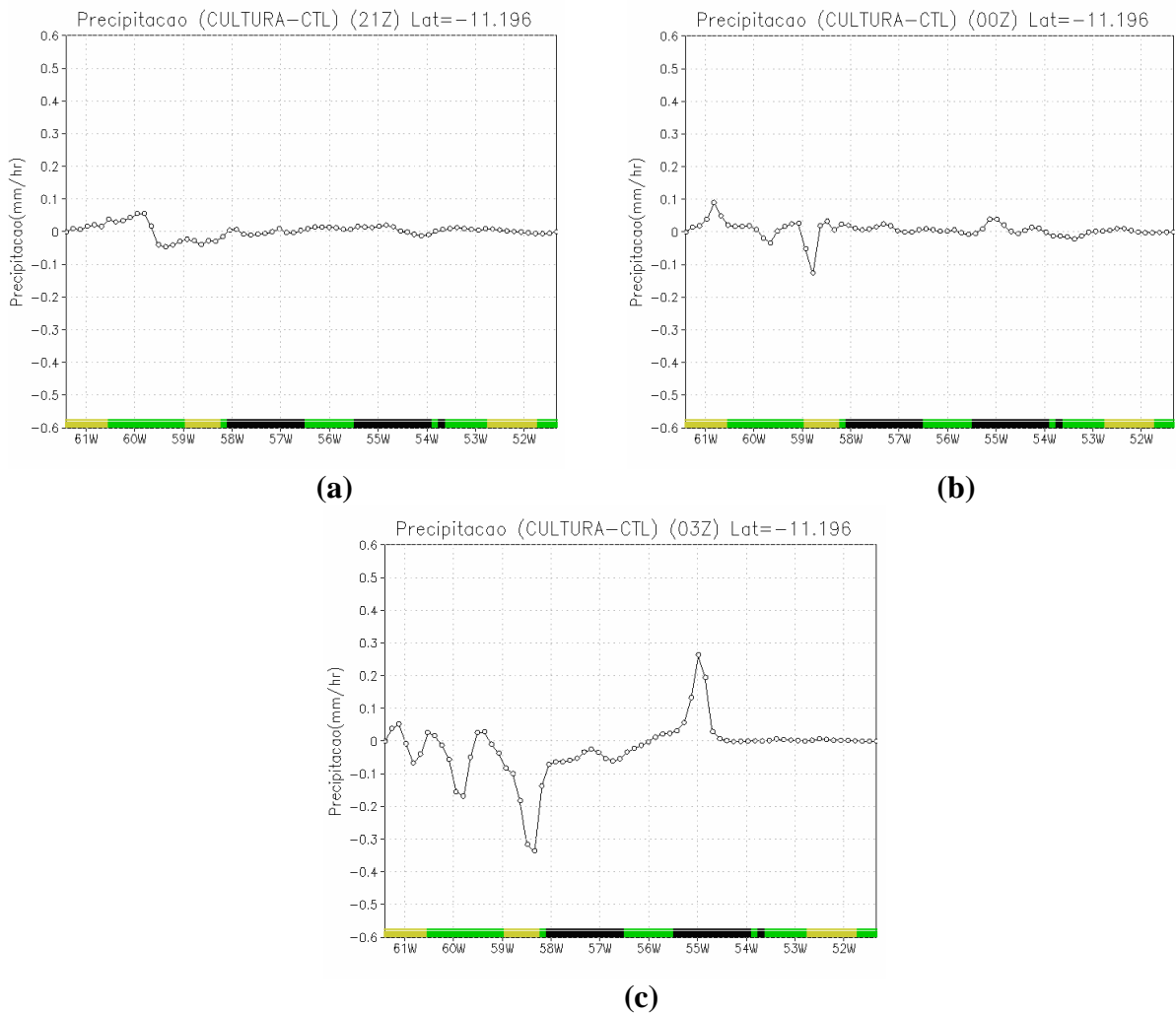


Figura 57 - Corte vertical na latitude $11,196^{\circ}$ S: Campo médio para o horário de 21 UTC(a), 00 UTC (b) e 03 UTC (c) da precipitação (mm h^{-1}) da diferença (CULTURA2025-CTL). A barra de cores superior indica as regiões da pastagem (amarelo claro), floresta (verde escuro) e região com cultura (preto).

3.4.4 Perfil vertical

O perfil vertical do vento, da temperatura e da umidade na troposfera sobre a região perturbada (média no período de 01/11/2006 à 01/04/2007) para comparação entre os cenários SOJA2025, CULTURA2025 e CONTROLE é apresentado na Figura 58. A região perturbada é analisada a partir de valores médios calculados entre 14° S e 9° S e 53° W e 58° W. Após o desflorestamento o vento de sul nos baixos níveis da atmosfera (Figuras 58d) foi aumentado significativamente nos dois cenários, sendo que no cenário CULTURA2025 esse aumento foi ligeiramente maior.

O vento horizontal apresentou aumento nos cenários de desflorestamento (Figura 58e), sendo um pouco maior no cenário CULTURA2025. Após o desflorestamento, a troposfera nos baixos níveis tornou-se mais seca como resultado da redução da evapotranspiração. A redução na razão de mistura no cenário CULTURA2025 foi maior que no cenário SOJA2025 (Figuras 58b). Assim como havia ocorrido com o cenário PAS2025, o aumento na temperatura nos baixos níveis também foi maior para o cenário CULTURA2025 quando comparado ao cenário SOJA2025.

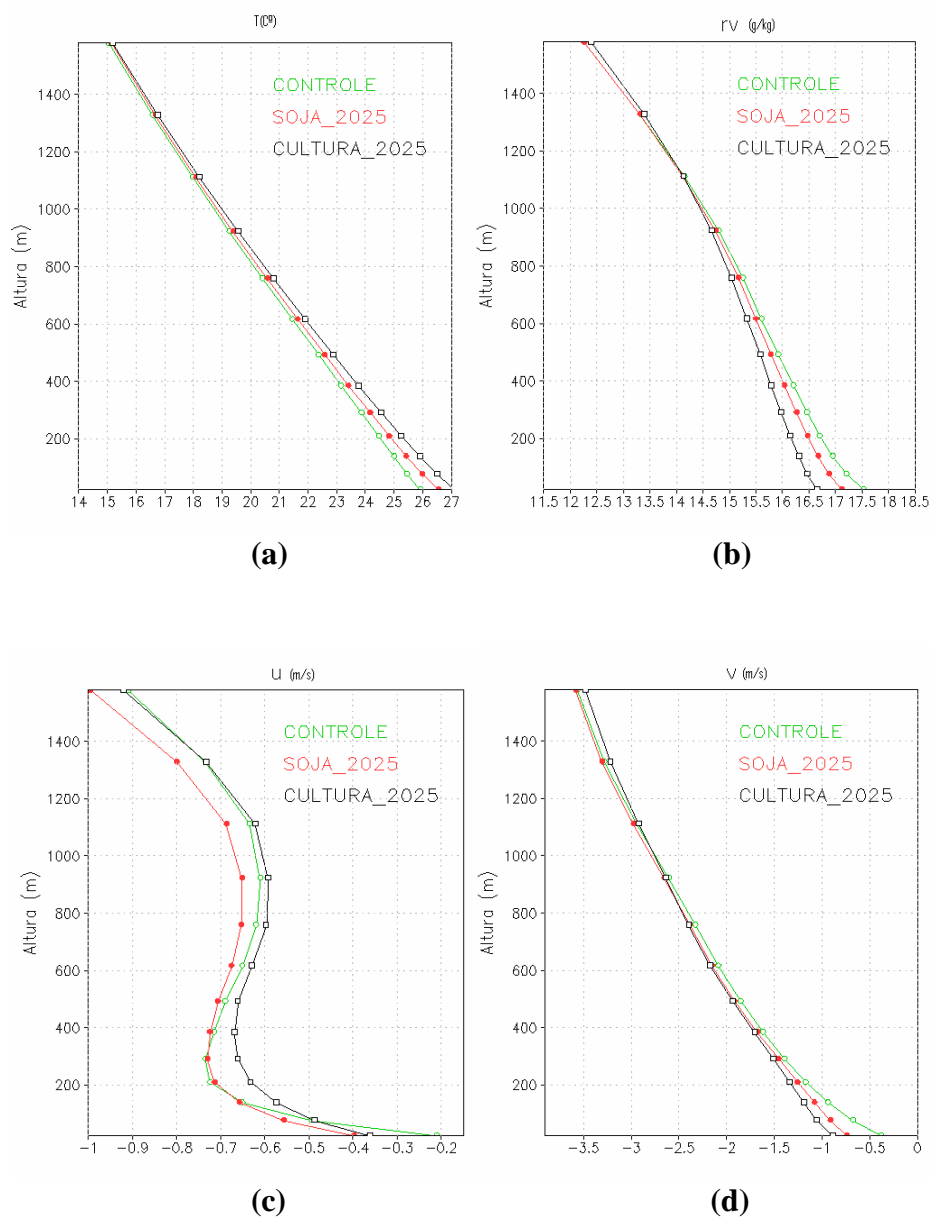
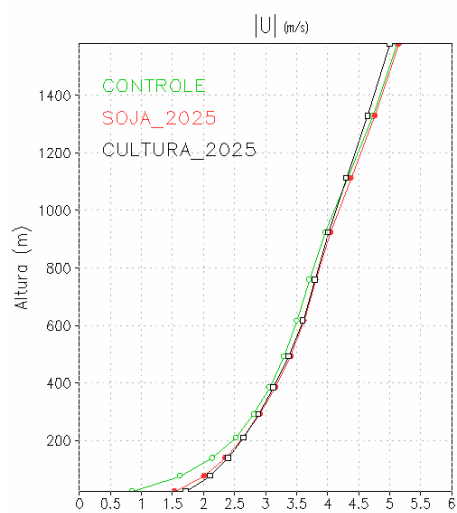


Figura 58 – Perfil vertical médio do período da (a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), (b) razão de mistura (g/kg), (c) velocidade zonal (m s^{-1}), (d) velocidade meridional (m s^{-1}) e (e) vento horizontal (m s^{-1}) para os cenários CTL, SOJA2025 e CULTURA2025.



(e)

Figura 58 – Continuação.

4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo de modelagem numérica regional apresentado, com o objetivo de avaliar as conseqüências nos balanços de energia e água decorrentes de alterações da vegetação na Amazônia Legal, considerou seis diferentes cenários de desflorestamento, isto é, desflorestamento atual (CONTROLE), cenário para 2009 com substituição de floresta por pastagem e soja (PAS2009 e SOJA2009) e para 2025 com substituição de floresta por pastagem, soja e cultura (PAS2025, SOJA2025 e CULTURA2025). Neste estudo, os parâmetros biofísicos da floresta e pastagem foram adaptados de forma a representar de maneira mais realista a superfície da região de estudo. O sub-modelo LEAF-3 também foi modificado para representar um novo tipo de cobertura vegetal, a soja, desde o plantio até a colheita. Com o modelo de área limitada (BRAMS) foram efetuadas simulações de seis meses permitindo que todo o ciclo da cultura da soja fosse simulado.

Para a validação do modelo numérico e configuração foram feitas duas simulações tendo como tipo de vegetação o cenário Controle, ou seja, floresta tropical em todo o domínio de estudo. As duas simulações de validação apresentaram resultados semelhantes e próximos aos dados observados. A fração evaporativa foi superestimada nas duas simulações, 10% na Controle 1 e 7% na Controle 2. Para a fração (RN/K_i), as simulações Controle 1 e 2 também apresentaram resultados próximos ao observado, apenas 7% e 6% superior ao encontrado por Pinto(2003), respectivamente. A razão de bowen foi o resultado que mais se distanciou dos dados observados, 18% superior e 11% inferior nas simulações Controle 1 e Controle 2, respectivamente. Apesar da simulação Controle 2 ter apresentado razão de Bowen relativamente mais próxima ao observado por Pinto (2003), optou-se por utilizar a configuração da simulação Controle 1, pelo fato desta estar com a parametrização convectiva desativada na grade 2, que é a configuração indicada para resoluções horizontais próximas a prescrita para essa grade.

O aumento do albedo foi o principal responsável pela redução no saldo de radiação em todos os cenários de desflorestamento, uma vez que o alto albedo da pastagem e da soja/cultura (comparada à floresta) tende a absorver uma menor quantidade de energia na superfície, fazendo com que o saldo de radiação apresente um decréscimo nas áreas perturbadas. Como o albedo prescrito para a soja é maior que o da pastagem, o decréscimo na simulação Soja 2009 foi maior (-16%) que o da simulação Pastagem 2009 (-7%). Para os cenários do ano de 2025 a variação foi bastante semelhante, -16% no cenário SOJA2025 e -9% PAS2025. O cenário CULTURA2025 também apresentou decréscimo (-13%) na áreas perturbadas, porém, o decréscimo foi menor que no cenário SOJA2025, estando mais próximo ao cenário PAS2025.

Nos cenários de desflorestamento PAS2009 e PAS2025, grande parte da energia disponível foi direcionada para aquecer a atmosfera (calor sensível). O aumento da área perturbada de 2009 para 2025 apresentou um leve acréscimo de 24% a 28% no fluxo de calor sensível. A diminuição da área vegetada pela substituição de floresta por pastagem conduziu a uma redução no fluxo de calor latente, -17%/-19% no cenário PAS2009/PAS2025.

Para os cenários onde houve substituição de floresta por soja (SOJA2009 e SOJA2025), a energia disponível foi mais utilizada nos processos de transpiração e evaporação do que para aquecer a superfície. Nos cenário SOJA2009/SOJA2025 houve uma diminuição no fluxo de calor sensível de -2%/-4%, e uma diminuição de -9% no fluxo de calor latente nos dois cenários onde a soja substituiu a floresta.

O cenário CULTURA2025 novamente apresentou comportamento semelhante ao cenário PAS2025, com um aumento de 24% no fluxo de calor sensível e redução de -28% no fluxo de calor latente. Assim como no cenário PAS2025, nesse cenário o saldo de radiação disponível foi mais utilizado para aquecer a superfície do que nos processos de transpiração e evaporação.

De maneira geral, houve uma modificação substancial do padrão de chuva na região, após o desmatamento, com um aumento da precipitação média na área que foi desmatada. Além disso, as mudanças se tornaram mais significativas à medida que aumentou a extensão do desflorestamento. A distribuição heterogênea do uso da terra induziu à formação de uma célula térmica sobre a região desmatada, o que resultou em certa variabilidade espacial da chuva. Apesar do aquecimento ter sido menor sobre a soja, também houve a formação de uma célula térmica. A célula térmica gerada provocou o levantamento de massa (por convergência) até aproximadamente 3000 m acima da região perturbada, carregando vapor d'água proveniente das regiões de floresta nas adjacências, com maior intensidade entre as 21 UTC e 00 UTC. Porém, na região onde ocorreu maior variação positiva de precipitação, a maior taxa de precipitação média ocorreu as 03 UTC em todos os cenários.

4.1 Sugestões para trabalhos Futuros

Neste trabalho a especificação da cultura de soja foi feita através da modificação dos parâmetros da vegetação disponíveis em tabelas que devem ser substituídas para cada mês, ou seja, o desenvolvimento da cultura não é continuamente representado no modelo e não há interação entre a cultura e a atmosfera. Sendo assim, uma das principais necessidades para trabalhos futuros é a modificação do módulo de interação solo-vegetação-atmosfera para que processos físico-químicos, tais como a fotossíntese e a respiração, entre outros, sejam representado pelo modelo. Exemplos de modelos desse tipo são os modelos GEMTM e IBIS.

As análises realizadas nesse trabalho foram feitas para um período de seis meses do ano de 2006. Sendo assim, a realização de um maior número de simulações para diferentes anos é recomendada. Dessa forma, a utilização da umidade do solo adequada para cada região também é fundamental, uma vez que a umidade do solo exerce importante papel sobre o balanço local de umidade e de calor através de sua influência sobre a taxa de evaporação na superfície.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- André, R.G.B.; Viswanadham, Y. Radiation balance of soybeans grown in Brazil Agricultural Meteorology, Amsterdam, v. 30, p.157-173, 1983.
- Avissar, R.; Liu, Y. Three-dimensional numerical study of shallow convective clouds and precipitation induced by land-surface forcing. Journal of Geophysical Research, v.101, p.7499-7518, 1996.
- Avissar, R.; Schmidt, T. An evaluation of the scale at which ground-surface heat flux patchiness affects the convective boundary layer using large-eddy simulations. Journal of the Atmospheric Sciences, v.55, p.2666-2689, 1998.
- Barnes, S. L. A Technique for maximizing details in numerical weather map analysis. Journal of Applied Meteorology, v.3, p.396-409, 1964.
- Bruno, R. D. Variabilidade da umidade do solo sobre floresta tropical e Cerrado. 2004. 189 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004.
- Castro, P. R. C.; Kluge, R. A. Ecofisiologia de cultivos anuais: trigo, milho, soja, arroz e mandioca. São Paulo. Nobel, 126 p, 1999.
- Castro, R. E.; Monteiro, R.; Castro, C. P. Estudo sobre dinâmicas sociais na fronteira, desmatamento e expansão da pecuária na Amazônia. Atores e relações sociais em novas fronteiras na Amazônia. Banco Mundial, 2002.
- Chen, F.; Avissar, R. The impact of land-surface wetness heterogeneity on mesoscale heat fluxes. Journal of Applied Meteorology, v.33, p.1323-1340, 1994a.
- Chen, F.; Avissar, R. Impact of land-surface moisture variability on local shallow convective cumulus and precipitation in large-scale models. Journal of Applied Meteorology, v.33, p.1382-1401, 1994b.
- Chen, C.; Cotton, W. R. A one dimensional simulation of the stratocumulus capped mixed layer. Bound- Layer Meteorology., v.25, p.289-3321, 1983.

- Correia, F. W. S. Modelagem do Impacto de Modificações da Cobertura Vegetal Amazônica no Clima Regional, 371 p. Tese de Doutorado do Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.
- Cotton, W. R.; Pielke Sr. R. A.; Walko, R. L.; Liston, G. E.; Tremback, C. J.; Jiang, H.; Mcanelly, R. L.; Harrington, J. Y.; Nicholls, M. E.; Carrio, G. G.; Mcfadden, J. P. RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteorology Atmospheric Physics*, v.82, p.5-29. 2003.
- Dalu, G.; Pielke, A.; Baldi, M.; Zheng, X. Heat and momentum fluxes induced by thermal inhomogeneities. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.53, p.3286-3320, 1996.
- Deardorff, J. W. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. *Boundary-Layer Meteorology*, v.18, p.495 – 527, 1980.
- Delire, C.; Foley, J. A.; Thompson, S. Evaluating the carbon cycle of a coupled atmosphere-biosphere model, *Global Biogeochemical Cycles*, 17(1), 1012, doi:10.1029/2002GB001870, 2002.
- Dickinson, R. E.; Henderson-Sellers, A.; Kennedy, P. J.; Wilson, M. F. Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme for the NCAR Community Climate Model. NCAR Tech. Rep. NCAR/TN 2751STR, 69pp., 1986. [Available from NCAR, P.O. Box 3000, Boulder, CO 80307-3000.]
- Ferreira, L. V; Venticinque, E.; Almeida, S. O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. *Estudos avançados*, v.19, p.157-166, 2005.
- Ferreira, L. V. “Identificação de áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade por meio da representatividade das unidades de conservação e tipos de vegetação nas ecorregiões da Amazônia brasileira”, em CAPOBIANCO, J. P. R. (ed.). *Biodiversidade na Amazônia brasileira: avaliação e ações prioritárias para a conservação, uso sustentável e repartição de benefícios*. São Paulo, Instituto Socioambiental, p.268-286, 2001.
- Fontana, D.C.; Berlato, M.A.; Bergamaschi, H. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.26, n.3, p.411-418, 1991.

- Freitas, E. D. Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes, 156 pp. Tese de Doutorado do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- Gandu, A. W. ; Cohen, J. C. P. ; Souza, J. R. S., Simulation of deforestation in eastern Amazonia using a high-resolution model. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78(1-3), p.123-135, 2004.
- Gash, J. H. C.; Nobre, C. A.; Roberts, J. M.; Victoria, R. L. *Amazonian deforestation and climate*. Chichester: John Wiley, 611 p, 1996.
- Grell, G. A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review.*, v.121, p.764–787, 1993.
- Grupo de Trabalho de Florestas. Fórum Brasileiro de Organizações Não Governamentais e Movimentos Sociais para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, 79 pp, 2004.
- Harrington, J. Y. The effects of radiative and microphysical processes on simulated warm and transition season arctic stratus, 239pp. Tese de doutorado, Colorado State University, Fort Collins, 1997.
- Heiffig, L. S. Plasticidade da cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) em diferentes arranjos espaciais, 85pp. Dissertação de Mestrado da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- Heil, M. C.; Yanagi, N. M.; Souza, P. J. O. P.; 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*, v. 34, 2007.
- Hill, G. E. Factor controlling the size and spacing of cumulus clouds as revealed by numerical experiments. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.31, p.646 – 673, 1974.
- Inpe (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). *Monitoring the Brazilian Amazon forest by satellite: 2002-2003*. São José dos Campos, Brasil, 2004.
- Kuo, H. L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large scale flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.31, p.1232-1240, 1974.

- LARGE-SCALE BIOSPHERE ATMOSPHERE EXPERIMENT IN AMAZONIA (LBA). O experimento de grande escala da biosfera-atmosfera na Amazônia (LBA). Cachoeira Paulista: Grupo de Planejamento Científico do LBA, 48 p., 1996. (Plano experimental conciso).
- Li, B.; Avissar, R. The impact of spatial variability of land surface heat fluxes. *Journal of Climate*, v.7, p.527-537, 1994.
- Lilly, D. K. On the numerical simulation of buoyant convection. *Tellus*, v.2, p.148-172, 1962.
- Lynn, B.; Rind, D.; Avissar, R. The importance of mesoscale circulations generated by subgrid-scale landscape heterogeneities in general circulation models. *Journal of Climate*, v. 8, p.191-205, 1995.
- Machado, L. A fronteira agrícola na Amazônia. *Geografia e Meio Ambiente no Brasil*. Organizadores Becker, B. K. et al. (Hucitec, São Paulo), 1998.
- Mahrer, Y.; Pielke, R. A. A numerical study of the airflow over irregular terrain. *Beitrag zur Physik der Atmosphere*, n.50, p.98-113, 1977.
- Manzi, O; Planton, S. Calibration of a GCM using ABRACOS and ARME data and simulation of Amazonian deforestation. In *Amazonian deforestation and climate*, Gash, J.H.C., Nobre, C.A., Roberts, J.M. e Victoria, R.L. (eds.) John Wiley and Sons, 1st ed, p.505-530, 1996.
- Mellor, G. L. & Yamada, T. Development of a turbulence closure-model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*, n.20, v.4, p.851-875, 1982.
- Molinari, J. A general form of Kuo's cumulus parameterization. *Monthly Weather Review*, v. 113, n. 8, p. 1411-1416, 1985.
- Nobre, C.A.; Sellers, P.; Shukla, J. Regional climate change and amazonian deforestation model. *Journal of Climate*, v.4, n.10, p.957-988, 1995.
- Nepstad, D.; Carvalho, G.; Barros, A. C.; Alencar, A.; Capobianco, J. P.; Bishop, J.; Moutinho, P.; Lefebvre, P.; Silva; U. L.; Prins, E. Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 154, n. 3, p. 395-407, 2001.

- Olson, J.S. Global ecosystem framework-definitions. USGS EROS Data Center Internal Report, 37 pp, 1994.
- Peixoto, C. P. Épocas de semeadura e densidade de plantas de soja: I. Componentes da produção e rendimento de grãos. *Scientia Agricola*. v. 57, doi: 10.1590/S0103-90162000000100015, 2000.
- Pielke, R. A.; Cotton, W. R.; Walko, L. R.; Tremback, C. J.; Lyons, W. A.; Grasso, L. D.; Nicholls, M. E.; Moran, M. D.; Wesley, D. A.; Lee, T. J.; Copeland, J. H. A comprehensive meteorological modeling system – rams. *Meteorology Atmospheric Physics*, v.49, p.69-91, 1992.
- Pinto, L. D. V. O. Fluxos de energia sobre uma floresta tropical na Amazônia, 60pp. Dissertação de Mestrado - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.
- Rocha, H. R. da. Modelagem e observações das relações biosfera-atmosfera na região Sudeste. 142 pp. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998.
- Rocha, H. R. da; Goulden, M. L.; Miller, S. D.; Menton, M. C.; Pinto, L.; Freitas, H. C. de; Figueira, A. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. *Ecological Applications*, Washington, v. 14, n. 4, p. S22-S32, 2004.
- Rosolem, R. O impacto do desmatamento no ciclo hidrológico: um estudo de caso para a rodovia Cuiabá-Satarém, 81 pp. Dissertação de Mestrado da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- Segal, M.; Arritt, W. Nonclassical mesoscale circulations caused by surface sensible heat-flux gradients. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.73, p.1593-1604, 1992.
- Sellers, P.J.; Randall, D.A.; Collatz, G.J.; Berry, J.A.; Field, C.B.; Dazlich, D.A.; Zhang, C.; Collelo, G.D.; Bounoua L. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *Journal of Climate*, v.9, p.676-705, 1996.

- Silva Dias, M.A.F.; Regnier, P. Simulation of mesoscale circulations in a deforested area of Rondônia in dry season. In: Gash, J. H. C.; Nobre, C. A.; Roberts, J. M.; Victoria, R. L. eds. *Amazonian Deforestation and Climate*. Chichester: John Wiley, p. 531 – 547, 1996.
- Silva Dias, M.A.F.; Rutledge, S.; Kabat, P.; Silva Dias, P. L.; Nobre, C.; Fisch, G.; Dolman, A. J.; Zipser, E.; Garstang, M; Manzi, A.; Fuentes, J. D.; Rocha, H.; Marengo, J.; Plana-Fattori, A.; Sá, L.; Alvalá, R.; Andreae, M. O.; Artaxo, P.; Gielow, R.; Gatti, L. Cloud and rain processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon Region. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, LBA special issue, v. 107, n. D20, p. 39-1-39-18, 2002.
- Smagorinsky, J. General circulation experiments with the primitive equations: 1. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, v.91, p.99-164, 1963.
- Soares-Filho, B. S. Cenários de desmatamento para a Amazônia. *Estudos Avançados*, v.19, n.54, p.137-152, 2005.
- Walko, R. L.; Cotton, W. R.; Meyers, M. P.; Harrington, J. Y. New RAMS cloud microphysics parameterization Part I: the single moment scheme. *Atmospheric Research*, n.38, p.29 – 62, 1995.
- Walko, R. L.; Band, L. E.; Baron, J.; Kittel, T. G. F.; Lammers, R.; Lee, T. J.; Ojima, D.; Pielke, R. A.; Taylor, C.; Tague, C.; Tremback, C. J; Vidale, P. L. Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. *Journal of Applied Meteorology*, n.39, v.6, 931-944, 2000.
- Walko, R. L.; Tremback, C. J. Modifications for the Transition From LEAF-2 to LEAF-3, ATMET technical note. (disponível em www.atmet.com), 2005.
- Wang, J.; Bras, R.; Eltahir, B. A stochastic linear theory of mesoscale circulation induced by the thermal heterogeneity of the land surface. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 53, p.3349-3366, 1996.
- Wang, J.; Bras, R.; Eltahir, A. Numerical simulation of nonlinear mesoscale circulations induced by the thermal heterogeneities of land surface. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v.55, p.447-464, 1998.

- Wang, J.; Bras, R.; Eltahir, A. The impact of observed deforestation on the mesoscale distribution of rainfall and clouds in Amazonia. *Journal of Hydrometeorology*, v.1, p.267-286, 2000.
- Wetzel, P.; Argentini, S.; Boone, A. Role of land surface in controlling daytime cloud amount: Two case studies in the GCIP-SW area. *Journal of Geophysical Research*, v.101, p.7359-7370, 1996.
- Zhang, H.; Henderson-Sellers, A.; Impacts of tropical deforestation. Part I: Process Analysis of local climatic Change. *Journal of Climate*, v.9, p.1497-1517, 1996.