

# IMPACTOS NA SIMULAÇÃO ATMOSFÉRICA DEVIDO À MUDANÇA DO USO E COBERTURA DA TERRA NA AMÉRICA DO SUL

*Atmospheric simulation impacts due to Land Use and Land Cover Changes*

**Gabriel Pereira<sup>1</sup>**  
**Maria Elisa Siqueira Silva<sup>2</sup>**  
**Elisabete Caria Moraes<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**  
**Divisão de Sensoriamento Remoto**

Av. dos Astronautas, 1.758, Jardim da Granja, 122272-010, São José dos Campos, São Paulo  
{gabriel; bete}@dsr.inpe.br

**<sup>2</sup>Universidade de São Paulo**

**Programa de Pós-Graduação em Geografia Física**

Av. Professor Lineu Prestes, 338, Butantã, 05508-900, São Paulo, São Paulo  
elisasiq@usp.br

## RESUMO

Os modelos regionais de previsão do tempo e clima são ferramentas importantes para o entendimento das interações entre a biosfera e atmosfera, porém, sua acurácia depende de parametrizações realísticas dos processos que envolvem estas variáveis. Na maioria dos modelos regionais, o mapa de uso e cobertura da terra não é atualizado com frequência e encontra-se defasado, influenciando, nos resultados obtidos a partir das simulações de tempo e clima. As mudanças de uso e cobertura da terra ocasionam alterações no balanço de energia, na temperatura do ar, na precipitação, na umidade do ar e na circulação regional e global. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo principal verificar o impacto nas simulações numéricas do RegCM4 oriundas da atualização do mapa de uso e cobertura da terra utilizados pelo modelo de superfície Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS). A partir da atualização do uso e cobertura da terra utilizado no modelo de superfície BATS para o ano 2007 obteve-se uma melhora de 10% na simulação da precipitação, aumentando de 0,84 para 0,92 o coeficiente de correlação (significante a  $p < 0,05$ , teste t-Student). Ainda, nota-se uma boa concordância das simulações no que diz respeito à temperatura máxima e mínima, com coeficientes de correlação próximo a 0,95 e valores muito próximos ao esperado.

**Palavras chave:** RegCM4. Modelagem numérica. Sensoriamento remoto. Precipitação. Temperatura do ar.

## ABSTRACT

The weather and climate regional models are important tools for understanding the interactions between the biosphere and atmosphere, however its accuracy depends of realistic parameterizations of processes involving these variables. In most regional models, land cover and land use maps are not frequently updated and is outdated, influencing the results obtained from simulations of weather and climate. The land use and land cover changes modify the air temperature, precipitation, air moisture, energy balance and regional and global circulation. Consequently, the land use and land cover maps and its physical-chemical and biological properties are an important variable for numerical models of terrestrial systems. However, in majority regional weather and climate models, the land use and land cover map is not updated frequently, being out-of-date and influencing in the results of simulations. Therefore, this work has as main objective to analyze the impacts in numerical simulations of RegCM4 resulting of land use and land cover map updating used by the Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS). In addition, the update of the South America 2007 land use and land cover map used by BATS improves in 10% the simulation of precipitation, increasing from 0.84 to 0.92 the correlation coefficient (significant at  $p < 0.05$ , Student's t-test). Moreover, there is a good agreement of simulations regarding the maximum and minimum temperature, with correlation coefficients near to 0.95 and very close to the observed values.

**Keywords:** RegCM4. Numerical modeling. Remote sensing. Precipitation. Air temperature.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos milênios a cobertura da terra sofre alterações devido às mudanças naturais como, por exemplo, o deslocamento dos continentes e glaciações periódicas, no entanto atualmente o desenvolvimento humano pode ser considerado como a principal fonte de mudanças na paisagem e na biodiversidade (FORMAN, 1995). Estas mudanças ocorrem desde a pré-história, na qual a crescente domesticação de animais e a manipulação de espécies vegetais proporcionaram a utilização do fogo para transformar florestas em pastagens e áreas agrícolas (GOLDEWIJK; RAMANKUTTY, 2004).

Frequentemente utilizado na literatura, o termo ‘uso e cobertura da terra’ pode ser dividido em: I) ‘Uso da terra’, que se refere às atividades antropogênicas ou ações imediatas de modificação e conversão de coberturas vegetais, englobando áreas urbanas e rurais, áreas agrícolas, áreas de preservação permanente (APP), unidades de conservação, entre outras e II) ‘Cobertura da terra’, que diz respeito aos tipos de cobertura vegetal natural de uma determinada área, como, por exemplo, floresta ombrófila, cerrado, caatinga, savanas, tundra, entre outros (DE SHERBININ, 2002).

Os impactos nas mudanças de uso e cobertura da terra abrangem alterações no balanço de energia, na temperatura do ar, na precipitação, na umidade do ar e na circulação regional e global (HOUGHTON et al., 1996; MCGUFFIE; HENDERSON-SELLERS, 2001; DA ROCHA et al., 2009; DAVID; WALKO; AVISSAR, 2011). Ainda, estes impactos provocam a degradação dos solos (ISLAM; WEIL, 2000), dos mananciais de água (CARTER; KREUTZWISER; LOE, 2004) e a alteração do escoamento superficial (MOLDERS; RUHAAK, 2002).

Dadas às circunstâncias acima descritas, mapas de uso e cobertura da terra constituem-se em uma importante variável para a modelagem numérica de sistemas terrestres. Diversos modelos de previsão do tempo e clima, assim como, modelos biogeoquímicos, necessitam destes dados

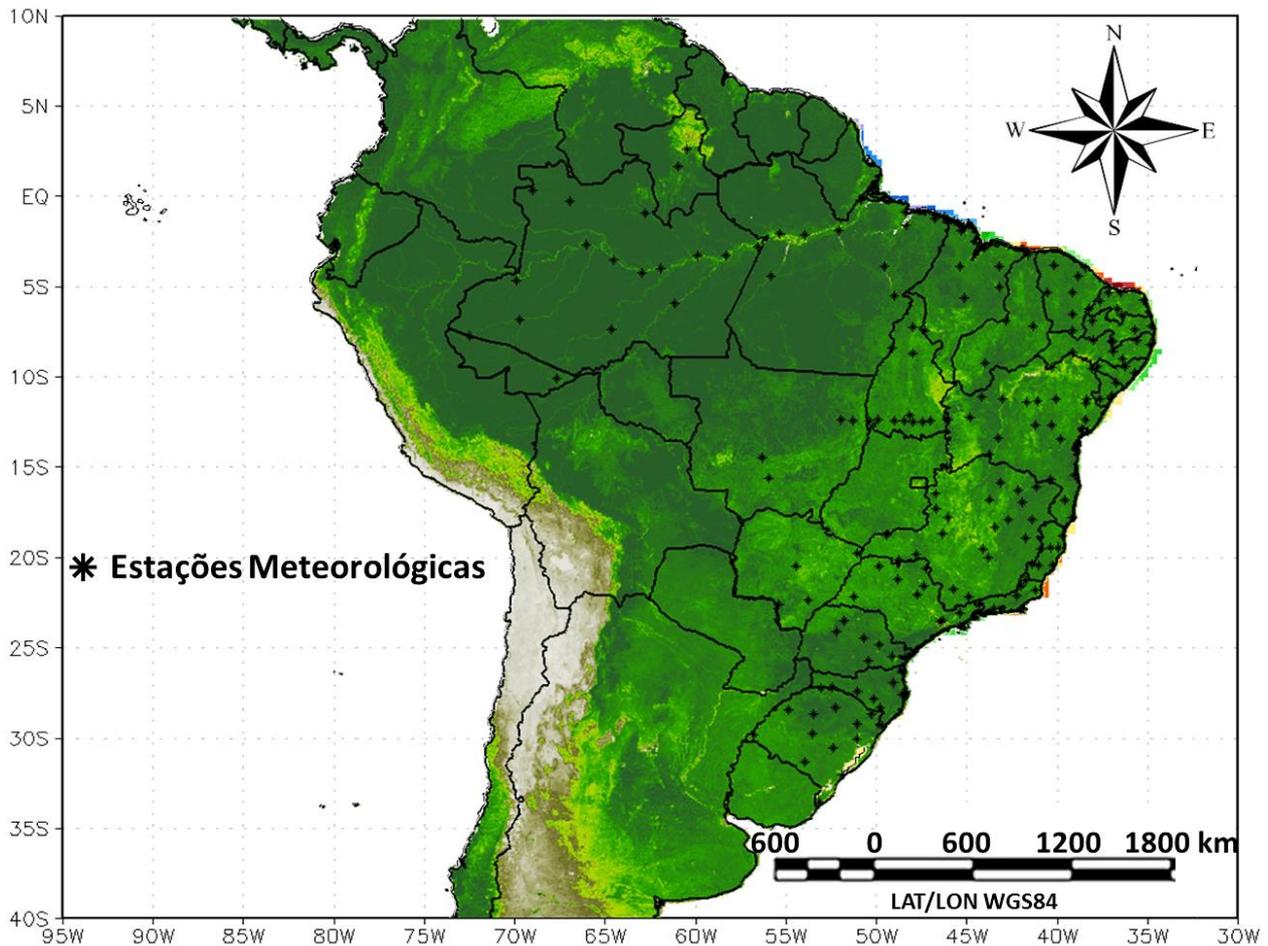
como parâmetro de entrada para simular os processos físicos que ocorrem na camada biosfera-atmosfera (MCGUFFIE; HENDERSON-SELLERS, 2001). Entretanto, na maioria dos modelos regionais de previsão do tempo e clima, o mapa de uso e cobertura da terra não é atualizado com frequência e encontra-se defasado, influenciando, desta forma, nos resultados obtidos a partir das simulações. Pode-se citar como exemplo a utilização do mapa de uso e cobertura da terra de 1992 do *Global Land Cover Characterization* (GLCC) atualmente inserido no modelo *Regional Climate Model system* versão 4 (RegCM4), originado a partir de dados orbitais do sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) a bordo do satélite *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) com resolução espacial nominal de 1 km.

Nas últimas décadas, devido ao aumento do número de satélites obtendo informações da superfície terrestre, os dados de Sensoriamento Remoto têm sido amplamente utilizados para originar mapas globais de uso e cobertura da terra. O desenvolvimento de produtos de uso e cobertura da terra derivados de satélites ambientais teve como objetivo inicial suprir a demanda dos modelos globais e regionais (ZHAN et al., 1999). Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo principal analisar as simulações numéricas do RegCM4 derivadas da atualização das classes de uso e cobertura da terra utilizados pelo *Biosphere Atmosphere Transfer Scheme* (BATS) implementado no RegCM4.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de Estudo

A área de estudo (Figura 1) compreende a área entre as coordenadas geográficas com latitudes entre N 10°00’ e S 40°00’, longitudes entre W 95°00’ e W 30°00’, e representa um recorte do domínio espacial utilizado nas simulações com o modelo RegCM. A região selecionada destaca-se principalmente pelas diferenças



**Figura 1:** Localização da área de estudo e estações meteorológicas utilizadas para validar o modelo RegCM4

econômicas, culturais e pela grande biodiversidade, originando uma diversificada dinâmica do uso e cobertura da terra. O maior país em extensão e economia é o Brasil, nele pode-se encontrar seis grandes domínios paisagísticos que comportam um mostruário bastante complexo das principais paisagens e ecologias do mundo (AB'SABER, 2003).

Quatro deles são intertropicais e dois deles subtropicais: domínio das terras baixas florestadas da Amazônia; domínio das depressões interplanálticas semiáridas do Nordeste; domínio dos 'mares de morros' florestados da fachada atlântica brasileira; domínio dos chapadões recobertos por cerrados e penetrados por florestas-galerias; domínio dos planaltos de Araucárias do Brasil Meridional; e domínio das pradarias mistas do sudeste do Rio Grande do Sul, terras uruguaias e argentinas.

## 2.2 Material Utilizado

### 2.2.1 Dados de entrada do modelo RegCM4

O RegCM4 pode ser considerado como um modelo numérico de área limitada, caracterizado pela boa consistência na representação dos fenômenos meteorológicos. No entanto, sua eficácia depende das condições iniciais e de contorno lateral provenientes de modelos globais que irão suprir as informações necessárias ao início dos processamentos. Atualmente, encontram-se disponíveis diversos produtos globais para uso em modelos regionais de previsão do tempo e clima, que apresentam distintas características e resoluções espaciais. Além destes dados, o modelo RegCM4 necessita de informações da temperatura da superfície do mar (TSM), altimetria, índice de área foliar, uso e cobertura da terra, tipo funcional da

vegetação, textura e cor dos solos, entre outras.

Neste trabalho, utilizaram-se os produtos contendo as informações das condições iniciais e de contorno lateral e as informações de TSM provenientes das reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) denominado ERA-Interim para o ano de 2007. Os dados das reanálises representam as estimativas globais dos principais parâmetros meteorológicos utilizados em modelos regionais e globais, modelados a partir da assimilação de dados de superfície, navios, radiossondas, aviões, sensoriamento remoto, entre outros. Estes dados estão disponíveis desde 1989, possuem resolução espacial de 1,5° (aproximadamente 170 por 170 km), 37 níveis de pressão e fornecem informações de diversas variáveis meteorológicas a cada seis horas (DEE et al., 2011).

### 2.2.2 Dados meteorológicos

Para avaliar as simulações realizadas no RegCM4 utilizaram-se os dados de 2007 de precipitação (mm), temperatura mínima (°C) e temperatura máxima (°C) disponibilizadas pelo CPTEC. Estes dados correspondem às informações derivadas do *Surface Synoptic Observations* (SYNOP/INMET), das plataformas de coleta de dados (PCDs) do Centro de Missão de Coleta de Dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CMCD/INPE) e parceiros do Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hídricos (PMTCRH/INPE).

Os dados meteorológicos, disponibilizados pelo Grupo de Previsão Climática do INPE com resolução espacial de 0,25° (aproximadamente 28 por 28 km), foram originados a partir da interpolação por Krigeagem simples dos dados das estações meteorológicas. O período de abrangência dos dados depende da variável meteorológica e da frequência (diário ou mensal). Desta forma, os dados mensais são disponibilizados de 1961 até o presente e os dados diários são disponibilizados a partir de 1997. No total

foram utilizadas 183 estações meteorológicas, na qual 64 estão localizadas na região Nordeste, 39 no Norte, oito no Centro-Oeste, 27 no Sul e 45 no Sudeste, como visualizada na Figura 1.

### 2.2.3 Produto de uso e cobertura da terra MCD12Q1

O sensor MODIS das plataformas Terra/Aqua possuem órbita polar, ângulo de imageamento de aproximadamente 55°, altitude de 700 km e faixa imageada de 2330 km. O horário de passagem varia sobre um dado ponto da superfície de acordo com a plataforma: enquanto a plataforma Terra, cujos produtos originados destas recebem a sigla MOD, cruza o Equador em sua órbita descendente às 10h30min e 22h30min; a plataforma Aqua, onde os produtos são denominados de MYD, em sua órbita ascendente, cruza o Equador às 13h30min e 01h30min. Ainda, os produtos originados de informações de ambas as plataformas recebem a sigla MCD. Neste trabalho utilizou-se o produto MCD12Q1 (uso e cobertura da terra para a América do Sul, resolução espacial de 500 por 500 m, anual) e MCD12C1 (uso e cobertura da terra, resolução espacial de 5600 por 5600 m, global e anual).

### 2.2.4 Dados do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM)

Os dados do TRMM foram utilizados neste trabalho para analisar a distribuição espacial da precipitação sobre a América do Sul e verificar a consistência dos resultados de precipitação obtidos com o RegCM4. O satélite TRMM foi desenvolvido através de uma parceria entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a agência espacial japonesa *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA). Os dados de precipitação estimados a partir deste radar proporcionam a representação de aproximadamente 66% do regime hidrológico associado às chuvas. Os dados de precipitação do TRMM são estimados a partir de um

algoritmo que combina múltiplos sensores orbitais originando, desta forma, os dados de precipitação global (HUFFMAN et al., 2007).

### 2.2.5 Dados complementares

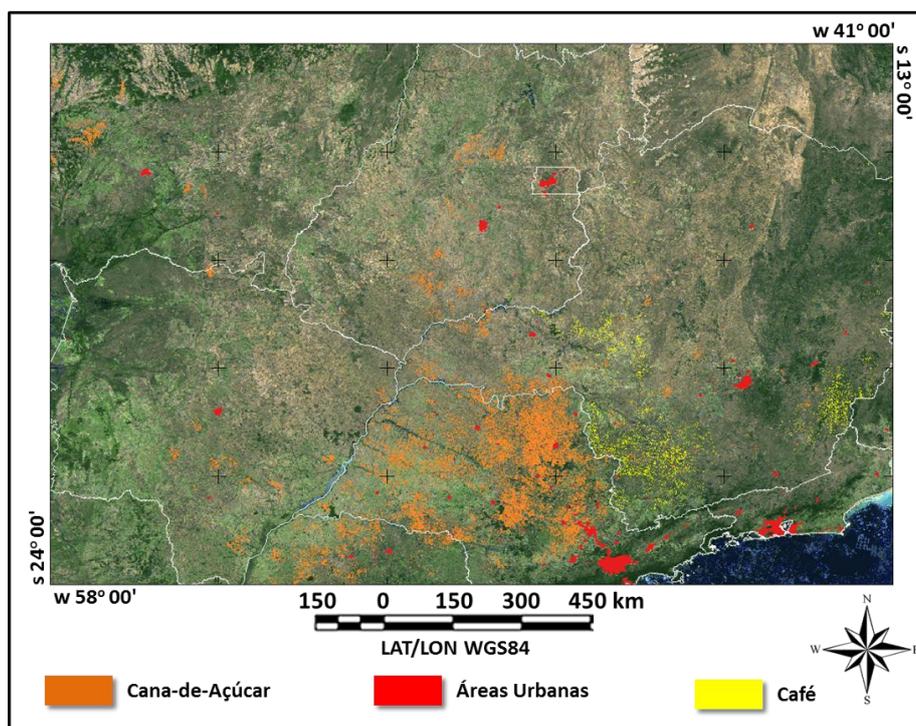
Neste trabalho, dados complementares foram utilizados para auxiliar no refinamento do mapa de uso e cobertura da terra proveniente do produto MCD12Q1. Entre os principais produtos empregados, destacam-se os dados do programa Mapeamento da Cana via Imagens de Satélite de Observação da Terra (CANASAT) e do CAFESAT, desenvolvido pelo INPE, os quais foram utilizados para atualizar a classe agricultura. Estes apresentam estimativas da área de cana-de-açúcar e café, obtidas a partir da interpretação visual de imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM) abordo do satélite Landsat (MOREIRA; ADAMI; RUDORFF, 2004; RUDORFF et al., 2010). Além destes produtos, utilizaram-se os dados de intensidade de luzes originados pelo *Operational Linescan System* (OLS) do *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP) desenvolvido pela *National Oceanic*

*and Atmospheric Administration* (NOAA) *National Geophysical Data Center* (NGDC) para auxiliar na extração de áreas urbanas (CROFT, 1978). A Figura 2 exhibe um exemplo dos dados produzidos pelo CANASAT, CAFESAT e com os dados de intensidade de luzes para a região central do Brasil.

## 2.3 Metodologia

### 2.3.1 Simulações no RegCM4

A primeira versão do modelo climático regional RegCM foi desenvolvida no final da década de 80 com base no modelo numérico *Mesoscale Model* versão 4 (MM4) por Dickinson et al. (1989) e Giorgi (1989). Porém, desde a primeira versão, o modelo vem sofrendo melhorias nas parametrizações físicas, na representação dos processos da superfície, na parametrização da convecção, entre outras. O RegCM4 possui dois modelos de superfície implementados, o *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme* (BATS) e o



**Figura 2:** Imagem do sensor MODIS, composição 3B4G1R (cor verdadeira), com os dados disponibilizados pelo CANASAT (laranja) e CAFESAT (amarelo) e áreas urbanas delimitadas pelo fatiamento do mapa de luzes do OLS/DMSP (vermelho)

*Community Land Model* (CLM) desenvolvidos por Dickinson et al. (1986) e Oleson (2004), respectivamente, assim como, diversos esquemas de convecção de cúmulos, umidade, condições iniciais e de contorno lateral, fluxos oceânicos e gradiente de pressão.

O BATS é utilizado para descrever as interações entre a biosfera e atmosfera, simulando a influência da vegetação e umidade do solo nas trocas de momentum, energia e vapor d'água. Este modelo possui 20 tipos de uso e cobertura da terra, considera a textura e a cor dos solos (variando de grossa a fina; escura a clara), além de avaliar a camada de neve, de solo e de raízes. As parametrizações do modelo incluem a previsão do conteúdo de água no solo a partir da precipitação, do derretimento da neve, da condensação de umidade no dossel, da evapotranspiração, do escoamento superficial e da infiltração na camada de raízes (REGCM TEAM, 2010). Uma das limitações deste modelo é a utilização de parâmetros físicos estáticos para a vegetação, ou seja, não contabilizar as variações no vigor vegetativo e no ciclo fenológico de diversas espécies.

De um modo geral, pode-se dividir o RegCM4 em três módulos principais: (I) Pré-processamento, onde as informações de altimetria, uso e cobertura da terra, TSM e as variáveis meteorológicas são interpoladas e reprojadas de acordo com a área de estudo; (II) RegCM, módulo responsável pela execução do modelo e (III) Pós-processamento, onde são realizadas operações de média (diária, mensal, anual), interpolação e conversão de variáveis.

Neste trabalho, definiram-se como parâmetros iniciais do modelo os seguintes valores: início da simulação dia 1 de outubro de 2007, final da simulação dia 1 de janeiro de 2008, 180 pontos na coordenada x (longitude), 180 pontos na coordenada y (latitude) e 18 pontos em z (altitude), resolução espacial de 50 km<sup>2</sup> e início da grade em S 22° 00' e O 60° 00'. Estes parâmetros originaram uma grade com 32.400 pontos, abrangendo as latitudes entre N 17°45' e S

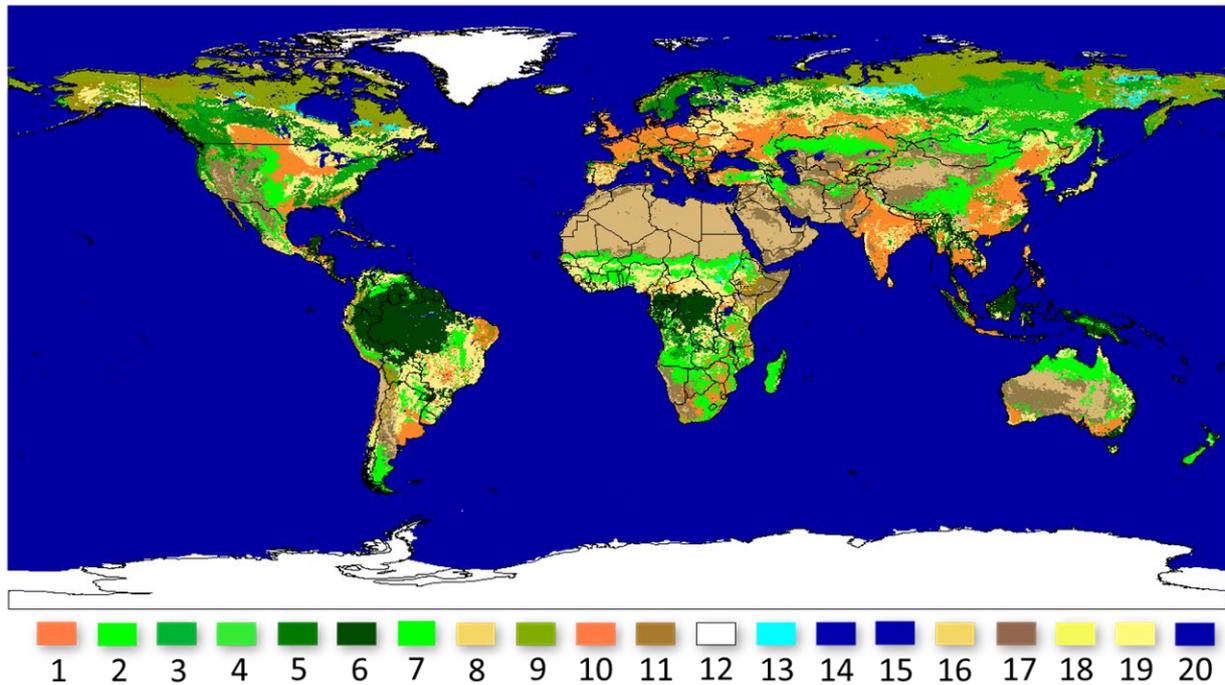
52°45' e longitudes entre W 100°00' e W 20°00'. Em relação aos parâmetros físicos do modelo, optou-se por empregar os métodos mais utilizados na literatura, adotando-se o esquema de fechamento cúmulos desenvolvido por Fritsch e Chappell (1980) e o esquema de fluxo oceânico proposto por Zeng, Zhao e Dickinson (1998).

### **2.3.2 Atualização do mapa de uso e cobertura da terra utilizado pelo BATS**

Os dados do *Global Land Cover Characterization* (GLCC) utilizados pelo BATS para modelar os processos e trocas entre a superfície e a atmosfera dividem a superfície terrestre em 20 classes de uso e cobertura da terra (Figura 3). Este mapa foi gerado a partir de dados orbitais do sensor AVHRR/NOAA com resolução espacial nominal de 1 km para o ano de 1992. Devido à defasagem do mapa, uma das maneiras para modificar o uso e cobertura da terra no RegCM4 consiste na alteração do arquivo em formato *American Standard Code for Information Interchange 2* (ASCII), originado na etapa de pré-processamento e interpolação das modificações no modelo.

A principal desvantagem da alteração do arquivo ASCII refere-se à localização espacial de cada classe de uso e cobertura da terra, pois o mesmo não possui coordenadas geográficas. Consequentemente, optou-se por alterar o arquivo original em formato *Network Common Data Form* (NetCDF) utilizado na etapa de pré-processamento. Este arquivo, denominado 'GLCC\_BATS\_\*min.nc', em que o asterisco (\*) representa a resolução espacial do dado, está dividido em 21 camadas. A camada principal do arquivo constitui o código de cada classe de uso e cobertura da terra (como descrito na Tabela 1) e as 20 camadas seguintes indicam a proporção de cada classe.

A informação da proporção é utilizada nos processos de interpolação entre as diferentes possibilidades de resolução horizontal do modelo. Atualmente, o modelo RegCM4 utiliza mapas de uso e cobertura da



**Figura 3:** Uso e cobertura da terra utilizado pelo BATS proveniente do GLCC para o ano de 1992

terra com seis resoluções espaciais distintas, que varia de 4 a 112 km<sup>2</sup> (especificamente, 4, 6, 9, 18, 56 e 112 km<sup>2</sup>). Desta forma, ao se utilizar um mapa de uso e cobertura da terra com resolução espacial diferente à adotada nas configurações iniciais do modelo, os valores atribuídos a cada pixel são referentes à classe de uso e cobertura da terra dominante que o compõe, no entanto, os valores proporcionais de cada elemento que compõe o pixel são armazenados, de forma que os processos físicos são calculados separadamente para cada extensão identificada.

**Tabela 1-** Classes de uso e cobertura da Terra do GLCC utilizadas pelo BATS.

Nº	Classe
1	Predominância Agrícola
2	Gramíneas
3	Floresta de coníferas
4	Floresta de coníferas decidual
5	Floresta Estacional Decidual
6	Floresta Ombrófila Densa
7	Vegetação Herbácea
8	Deserto
9	Tundra
10	Agricultura irrigada
11	Semideserto
12	Gelo / Glaciar
13	Região Pantanosa / Alagada
14	Água interior

- 15 Oceano
- 16 Vegetação arbustiva perene
- 17 Vegetação arbustiva decidual
- 18 Mosaico de Floresta e pastagem
- 19 Mosaico de pastagem e floresta
- 20 Combinação de água e terra

Para a atualização do uso e cobertura da terra do modelo, foram empregados os dados do ano de 2007 provenientes do produto MCD12Q1 (para a América do Sul) e MCD12C1 (para o restante do globo). Nesta etapa, optou-se em utilizar o esquema de classificação proposto pelo *International Geosphere-Biosphere Programme* (IGBP) que separa a superfície em 17 classes. A partir de diversos mapeamentos realizados por órgãos federais e produtos orbitais, o mapa proveniente do MODIS foi atualizado, eliminando eventuais erros na classificação. Desta forma, as áreas urbanas foram atualizadas a partir do fatiamento dos níveis digitais acima de 56 provenientes do mapa de luzes originado pelo OLS/DMSP, novas áreas agrícolas foram inseridas a partir do produto CANASAT (RUDORFF et al., 2010) e áreas com café mapeadas pelo CAFESAT (MOREIRA; ADAMI; RUDORFF, 2004) foram inseridas na classe Mosaico de floresta e pastagem devido à sua fenologia.

Para eliminar erros de omissão de áreas desmatadas na Floresta Amazônica, utilizaram-se os dados do PRODES referentes ao ano de 2007. Consequentemente, no novo mapa, áreas na qual a floresta havia sido derrubada e que foram classificadas como floresta pelo produto MCD12 passou a ser atribuídas como áreas de gramíneas no novo mapa. Devido à inconsistência entre os esquemas de classificação utilizados pelo BATS e os disponibilizados pelo produto MCD12, as 17 classes do IGBP foram relacionadas com as classes equivalentes do produto GLCC, utilizado pelo BATS. A Tabela 2 mostra as classes do IGBP e suas respectivas classes no BATS (entre parênteses) remapeadas a partir da análise espacial dos dados.

**Tabela 2:** Remapeamento das classes do IGBP para as classes do BATS.

Nº	Classificação do IGBP	Classificação utilizada pelo BATS
1	Hidrografia	Água interior / Oceano (14 e 15)
2	Floresta de coníferas	Floresta de coníferas (3)
3	Floresta Ombrófila Densa	Floresta Ombrófila Densa (6)
4	Floresta de coníferas decidual	Floresta de coníferas decidual (4)
5	Floresta Estacional Decidual	Floresta Estacional Decidual (5)
6	Mosaico de Floresta e pastagem	Mosaico de Floresta e pastagem (18)
7	Vegetação arbustiva fechada	Vegetação arbustiva decidual (17)
8	Vegetação arbustiva aberta	Semideserto (11)
9	Savana lenhosa	Mosaico de Floresta e pastagem (18)
10	Savana	Mosaico de pastagem e floresta (19)
11	Gramíneas	Gramíneas (2)
12	Áreas alagadas permanentemente	Região Pantanosa / Alagada (13)
13	Predominância Agrícola	Predominância Agrícola (1)
14	Áreas Urbanas	Deserto (8)
15	Mosaico de Áreas Agrícolas / Vegetação	Predominância Agrícola (1)
16	Gelo / Glaciar	Gelo / Glaciar (12)
17	Solo exposto ou vegetação rala	Deserto (8)

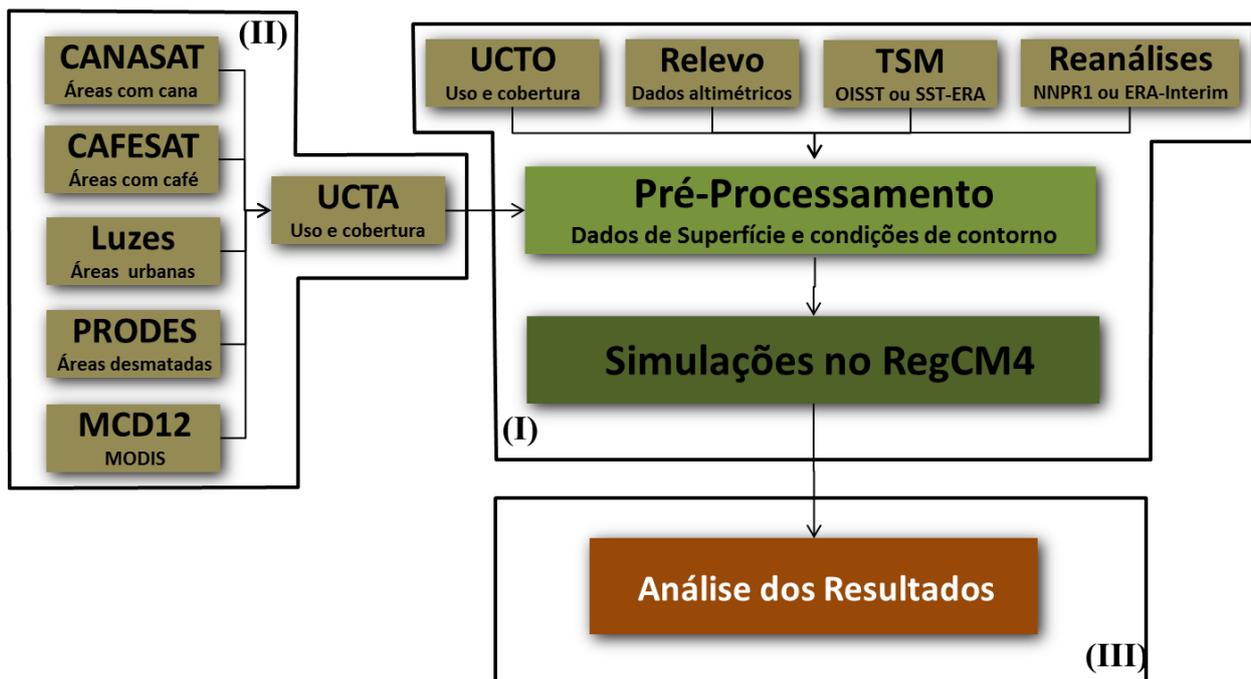
Após o remapeamento, as classes de uso e cobertura da terra foram separadas no aplicativo SPRING, desenvolvido pelo INPE, em uma camada principal e 20 camadas contendo as proporções de cada classe no pixel, sendo estas interpoladas para a resolução de 0.033 graus (aproximadamente 4 km<sup>2</sup>). Alguns procedimentos (transformação e compatibilização de diferentes dados, amostragem aleatória, extração de atributos, entre outros) foram realizados na linguagem LEGAL, implementada no SPRING (SPRING, 2005). Esta linguagem funciona a partir de linhas de comando e foi proposta por Câmara Neto (1995) com o objetivo de auxiliar as operações espaciais e análises estatísticas. A última etapa consistiu na atualização do arquivo 'GLCC\_BATS\_2min.nc' com os dados atualizados de uso e cobertura da terra a partir de um programa realizado no *Interactive Data Language* (IDL).

### 2.3.3 Fluxograma da metodologia

A Figura 4 exhibe o fluxograma da metodologia, dividido em três etapas principais. A primeira (I) consiste nas simulações no RegCM4 com o mapa de uso e cobertura da terra original do modelo (GLCC de 1992), utilizando como condições iniciais, de contorno lateral e de TSM os dados do Era-interim, o modelo de superfície BATS e o esquema de convecção cúmulos proposto por Emmanuel (1992). Nesta etapa, os resultados das simulações foram avaliados a partir dos dados provenientes do INMET/CPTEC. A segunda etapa (II) refere-se à atualização do mapa de uso e cobertura da terra a partir de produtos e dados orbitais disponíveis atualmente. A última etapa (V) consistiu na análise dos resultados obtidos durante o trabalho e avaliação a partir dos dados meteorológicos disponíveis.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5a mostra o mapa de uso e cobertura da terra utilizado pelo modelo de superfície BATS para determinar os



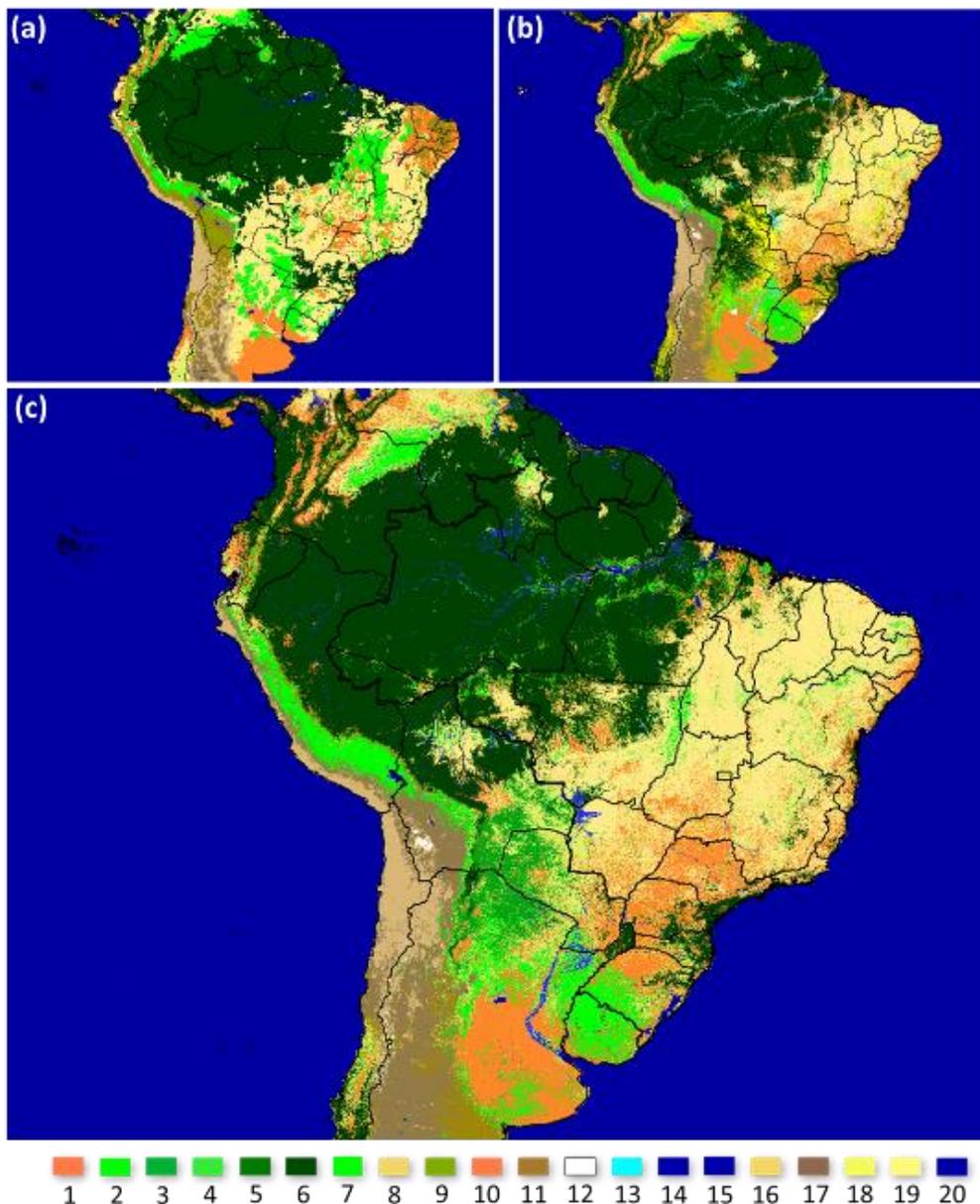
**Figura 4:** Fluxograma da metodologia, dividido em 5 etapas principais

parâmetros físicos (IAF, albedo, rugosidade, tipo de solo, entre outros) necessários às simulações dos processos que ocorrem entre a biosfera-atmosfera. Este dado, correspondente ao produto derivado do sensor AVHRR/NOAA com resolução espacial nominal de 1 km e obtidos no ano de 1992, encontra-se defasado e possui algumas inconsistências como, por exemplo, a classificação de áreas agrícolas no interior da região nordeste e ausência destas em Santa Catarina, Paraná e Rio grande do Sul, omissão de corpos d'água na floresta Amazônica e no bioma Pantanal. Além disto, desde a década de 90, o uso e cobertura da terra apresentou modificações significativas na América do Sul. Pode-se citar, por exemplo, o acentuado desmatamento do bioma Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, além do crescimento de áreas agrícolas.

A Figura 5b apresenta o mapa de uso e cobertura da terra proveniente do produto MCD12Q1 do sensor MODIS composto pelo mosaico das observações das plataformas Aqua e Terra, com resolução espacial nominal de 500 m. Entre as principais diferenças em relação à Figura 5a, pode-se destacar a expansão de áreas agrícolas, a diminuição de áreas florestadas como a floresta Amazônica,

a delimitação de áreas agrícolas, entre outras. Considerando que o mapa produzido com os dados do sensor MODIS apresenta uma concordância que pode variar de 60% a 90% para diferentes classes de uso e cobertura, com uma acurácia global de 78%, optou-se por melhorar a classificação para a América do Sul a partir de mapeamentos provenientes do PRODES, CANASAT e CAFESAT, como demonstrado na Figura 5c.

Na Tabela 3 pode-se visualizar a tabulação cruzada entre o mapa de uso e cobertura da terra originado do modelo (GLCC, 1992), representado nas linhas, e o mapa final, originado do produto MCD12Q1 (Figura 5c), descrito nas colunas. Esta indica as alterações nas classes de uso e cobertura da terra ocorridas a partir da substituição das informações provenientes do GLCC (1992) pelos dados originados do sensor MODIS (MCD12Q1). Desta forma, a última linha e a última coluna da tabela representam a área total ( $\times 10^1$  km<sup>2</sup>) de cada classe temática no mapa final de 2007 e do GLCC de 1992, respectivamente. Pode-se citar como exemplo, a classe 1 (Predominância Agrícola), que possuía uma área de 1.775.820 km<sup>2</sup> no mapa do GLCC e passou para 2.667.010 km<sup>2</sup> no mapa de 2007, um aumento de



**Figura 5:** (a) Uso e cobertura da terra de 1992 do GLCC atualmente inserido no modelo RegCM4; (b) Uso e cobertura da terra do ano de 2007 proveniente do produto MCD12Q1 (para a América do Sul); (c) Atualização do uso e cobertura da terra do ano de 2007 proveniente do produto MCD12Q1 a partir dos dados do PRODES, CANASAT, CAFESAT e mapa de luzes

aproximadamente 50%. Ainda, nas colunas é possível verificar quais classes foram alteradas para dar origem ao novo mapa, e nas linhas a posição onde as áreas antigas estavam inseridas na nova classificação. Conseqüentemente, os valores em **negrito** correspondem às áreas que não sofreram alterações entre os dois mapas.

Deste modo, aproximadamente 691.130 km<sup>2</sup> foram classificados como áreas agrícolas em ambos os mapeamentos, entretanto, 528.490 km<sup>2</sup> de floresta ombrófila

densa e 120.940 km<sup>2</sup> de vegetação herbácea foram convertidas para agricultura. Ressalta-se ainda que no mapa do GLCC, aproximadamente 108.000 km<sup>2</sup> (classificados como áreas agrícolas), foram remapeados para outras classes. Esta variação pode ser verificada principalmente na região Nordeste, na qual as áreas do sertão classificadas como agrícolas (Figura 5a) foram transformadas em vegetação arbustiva decidual e em mosaico de pastagem e floresta (Figura 5c). Devido à diferença de resolução e registro dos mapas,

**Tabela 3:** Tabulação cruzada entre mapa de uso e cobertura da terra do GLCC 1992 e o mapa atualizado para o ano de 2007.

GLCC \ MCD12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	TOTAL (x10 km <sup>2</sup> )
1	69.113	14.275	56	14	1408	9200	1	2112	0	836	22	2237	25	98	7	8972	14.873	54.333	177.582
2	12.941	43.083	2764	40	6518	7884	0	769	0	36.973	664	1418	105	637	0	15.952	6587	1797	138.131
3	183	35	461	0	10	323	0	1	0	0	0	39	0	0	0	1	245	67	1366
6	52.849	18.963	141	8	5899	610.907	0	1271	0	98	11	13.770	0	7	0	684	16.375	40.875	761.859
7	12.094	17.949	32	0	3188	4833	418	619	0	181	17	2862	1	0	0	637	18.741	64.716	126.289
8	290	1225	171	10	21	241	0	42.450	0	11.353	817	77	0	92	0	949	329	383	58.409
9	1504	5152	71	7	86	5901	0	3877	220	15.243	927	56	0	0	0	1295	938	1419	36.697
10	286	4	4	0	1	155	0	25	0	3	0	40	0	0	0	1	36	36	592
11	580	4880	29	6	32	268	0	641	0	43.167	22	64	24	39	0	7397	679	163	57.990
12	234	499	435	7	39	128	0	14	0	120	2420	8	0	8	0	421	127	0	4461
13	302	251	0	0	29	895	0	0	0	0	0	273	1	0	0	0	109	230	2091
14	2067	1234	107	3	191	2281	0	229	0	673	142	1667	4103	7	0	710	789	993	15.195
15	5526	1696	3378	72	693	6100	0	1989	0	2470	170	2766	10	3.555.67	6	4807	1561	587	3.587.505
16	1821	1848	3	3	107	173	0	654	0	29.260	17	47	0	59	234	7266	1008	81	42.580
17	1351	7238	100	3	24	2657	0	10.176	0	21.525	57	123	0	14	0	2260	1395	17.202	64.124
19	1157	708	5055	20	404	17.125	0	206	0	1512	902	199	43	429	0	2849	6555	20	37.185
TOTAL (x10 km <sup>2</sup> )	266.701	148.132	13.258	251	57.721	707.235	420	68.657	220	171.088	6486	31.686	4394	3.557.093	247	59.574	134.058	329.337	

**Legenda:**

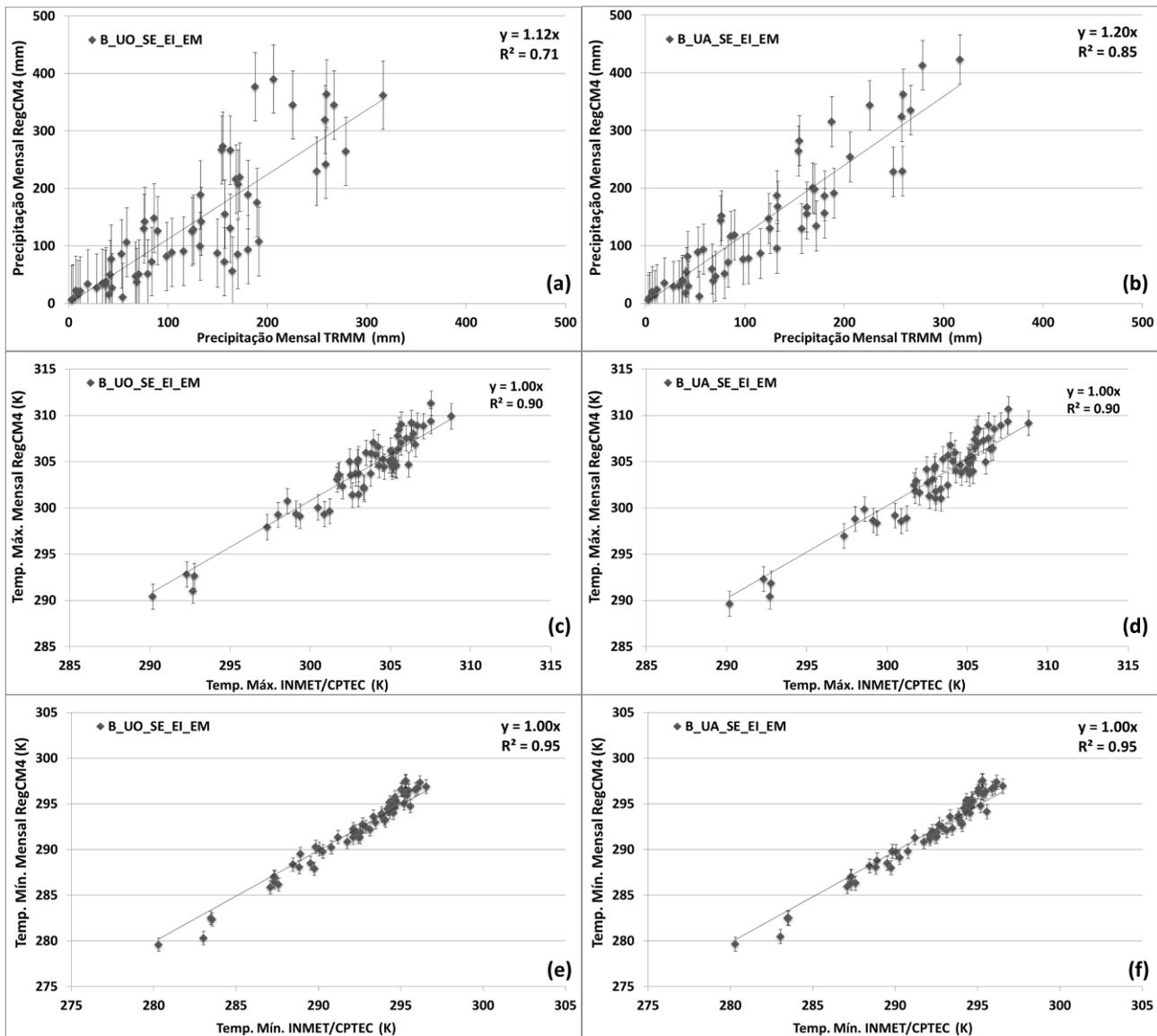
1	Predominância Agrícola	2	Gramíneas	3	Floresta de coníferas	4	Floresta de coníferas decidual	5	Floresta Estacional Decidual
6	Floresta Ombrófila Densa	7	Vegetação Herbácea	8	Deserto	9	Tundra	10	Agricultura irrigada
11	Semideserto	12	Gelo/ Glaciar	13	Região Pantanosa/ Alagada	14	Água interior	15	Oceano
16	Vegetação arbustiva decidual	17	Mosaico de Floresta e pastagem	18	Mosaico de pastagem e floresta	19	Mosaico de pastagem e floresta	20	Combinação de água e terra

as áreas litorâneas e próximas aos corpos d'água foram convertidas para outros usos.

Outra modificação no mapa de uso e cobertura da terra refere-se à substituição de áreas de floresta ombrófila densa, vegetação herbácea (189.630 km<sup>2</sup> e 179.490 km<sup>2</sup>, respectivamente) e áreas agrícolas (140.275 km<sup>2</sup>), por gramíneas (classe 2), correspondendo a um aumento de aproximadamente 7%. A partir do remapeamento das classes do MCD12Q1 para as classes de uso e cobertura presentes no BATS, obteve-se uma melhor representação das classes que correspondem à floresta de coníferas (classe 3, 870% de aumento), floresta de coníferas decidual (classe 4) e floresta estacional decidual (classe 5). Ressalta-se que estas duas últimas não possuíam representação na classificação do GLCC. Além disto, regiões de floresta ombrófila densa (classe 6) diminuíram 8%, contudo, em relação ao mapa do GLCC, foram mantidas apenas 86% da área original, desta forma, áreas classificadas erroneamente como agrícolas (classe 1), gramíneas (classe 2) e mosaico de pastagem e floresta (classe 9) na antiga classificação foram substituídas por áreas de floresta neste novo mapa. As demais classes sofreram variações menos

significativas, com destaque para a inserção de áreas compostas por mosaico de floresta e pastagem (classe 18), substituindo áreas agrícolas, floresta ombrófila densa e vegetação herbácea, além da classe 19 (mosaico de pastagem e floresta), que manteve apenas 200 km<sup>2</sup> em relação ao antigo mapa.

As Figura 6a e 6b exibem a relação entre os dados mensais de precipitação (eixo x) estimados pelo TRMM e simulados pelo RegCM4 (eixo y) a partir do emprego do mapa de uso e cobertura original (B\_UO\_SE\_EI\_EM) e com a alteração do mapa de uso e cobertura a partir da aplicação dos dados provenientes dos produtos MCD12Q1, PRODES, CANASAT, CAFESAT e mapa de luzes (B\_UA\_SE\_EI\_EM), respectivamente. Nas regressões, percebe-se uma melhora significativa na correlação da precipitação entre os dados estimados e simulados pelo modelo. Desta forma, com a atualização do uso e cobertura da terra no RegCM4, percebe-se uma melhora de 10% na relação entre os dados do TRMM e os resultados da simulação B\_UA\_SE\_EI\_EM, proporcionando um aumento de 0,84 para 0,92 no coeficiente de



**Figura 6:** Relação entre os dados mensais de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima simulados pelo RegCM4 a partir do mapa de uso e cobertura original (a, c, e) e com a alteração do mapa de uso e cobertura (b, d, f)

correlação (significante a  $p < 0,05$ , teste *t-Student*).

A partir das alterações realizadas no uso e cobertura da terra, percebe-se que embora os resultados simulados apresentem uma melhor correlação com os dados estimados a partir do TRMM, em geral, os valores de precipitação encontram-se 20% acima dos previstos. Contudo, apesar da parametrização cúmulos desenvolvida por Emmanuel (1992) superestimar a precipitação, esta permite uma melhor representação da variação interanual e do padrão espacial das chuvas. Entre as principais fontes de erro pode-se destacar a taxa de fluxo de massa convectivo, fração de

água condensada convertida em precipitação, além das particularidades de umedecimento e aquecimento da superfície.

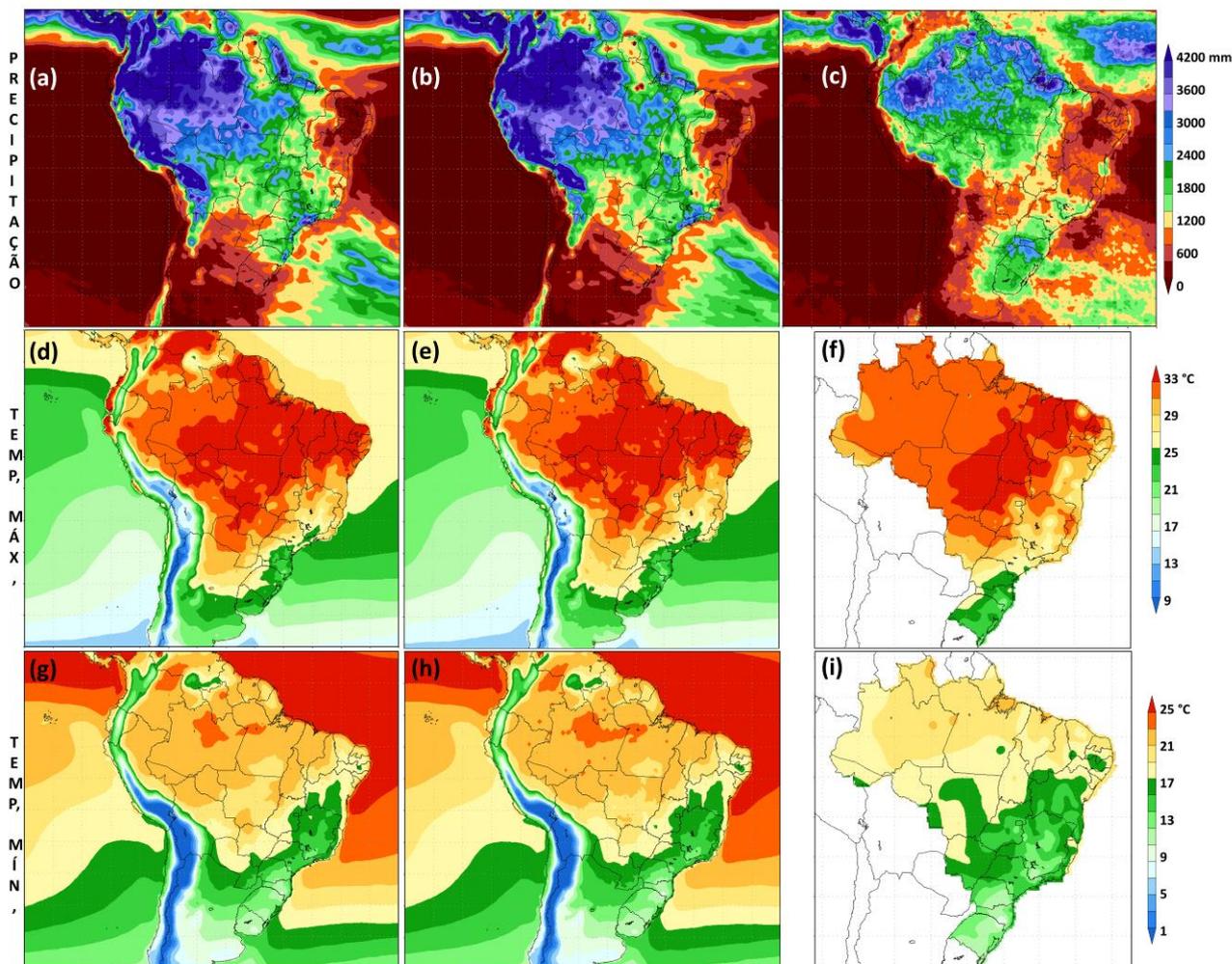
As Figuras 6c e 6d mostram a relação entre os dados mensais de temperatura máxima (eixo x) estimados pelo INMET/CPTEC e simulados pelo RegCM4 (eixo y) a partir do emprego do mapa de uso e cobertura original (B\_UO\_SE\_EI\_EM) e através do mapa atualizado para 2007 (B\_UA\_SE\_EI\_EM), respectivamente. Nesta variável, percebe-se uma boa concordância em ambas as simulações, com coeficientes de correlação próximos a 0,95. Embora a alteração do uso e cobertura esteja associada diretamente aos parâmetros físicos como, por

exemplo, albedo, IAF e fração máxima de cobertura vegetal, não se constatou uma grande diferença espacial entre as simulações realizadas no que se refere à alteração da temperatura média anual.

O mesmo padrão pode ser verificado nas Figuras 6e e 6f, que exibem a relação entre os dados mensais de temperatura mínima (eixo x) estimados pelo INMET/CPTEC e simulados pelo RegCM4 (eixo y) a partir do emprego do mapa de uso e cobertura original (B\_UO\_SE\_EI\_EM) e com o mapa atualizado para 2007 (B\_UA\_SE\_EI\_EM), respectivamente. Nestes, os valores de correlação foram de aproximadamente 0,97. Ressalta-se que as simulações de temperatura máxima e mínima apresentaram uma boa consistência com os

dados do INMET/CPTEC, obtendo um valor muito próximo ao esperado. A Figura 7 mostra a diferença entre a média anual de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima simuladas pelo RegCM4 a partir do emprego do mapa de uso e cobertura original (Figuras 7a, 7d e 7g), a partir do mapa atualizado para 2007 (Figuras 7b, 7e e 7h), assim como, os dados estimados pelo TRMM (Figura 7c) e pelo INMET/CPTEC (Figuras 7f e 7i).

Com as modificações realizadas no modelo, percebe-se que os resultados decorrentes do emprego do uso e cobertura atual apresenta uma melhor concordância com os dados observados, porém observa-se que os valores de precipitação encontram-se



**Figura 7:** Simulações de precipitação (a, b), temperatura máxima (d, e) e temperatura mínima (g, h) a partir do emprego do mapa de uso e cobertura original (B\_UO\_SE\_EI\_EM) e a partir do mapa atualizado para 2007 (B\_UA\_SE\_EI\_EM), respectivamente; (c) Mapa anual de precipitação estimada pelo TRMM; (f) Mapa anual da média de temperatura máxima proveniente do INMET/CPTEC; (i) Mapa anual da média de

temperatura mínima estimado do INMET/CPTEC

superestimados, especialmente na porção Sul de Minas Gerais, no litoral da região Sul e Sudeste, assim como, na região Amazônica e áreas circunvizinhas. Todavia, a região Sul do Brasil e áreas localizadas no Noroeste do Estado do Pará exibem volumes pluviométricos muito abaixo dos estimados pelo TRMM.

Em relação à temperatura máxima e mínima, percebe-se uma boa concordância em ambas as simulações. De um modo geral, a ausência de estações nas regiões Norte e Centro-Oeste originou regressões em que os dados simulados pelo RegCM4 e estimados pelo INMET/CPTEC ficaram muito próximos ao esperado, uma vez que nestas áreas encontram-se os maiores erros. Porém, percebe-se que uma superestimativa da temperatura na região Norte e em parte da região Centro-Oeste, em algumas áreas, a média anual da temperatura máxima e mínima pode ficar 2°C a 5°C acima dos valores esperados. Desta forma, o aquecimento da superfície, ocasionado pela interação da radiação eletromagnética com o alvo, pode estar contribuindo para as superestimativas de precipitação nestas áreas.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os modelos regionais de previsão do tempo e clima são ferramentas importantes para o entendimento das interações entre a biosfera e atmosfera, porém, sua acurácia depende de parametrizações realísticas dos processos que envolvem estas variáveis. Na maioria dos modelos regionais, o mapa de uso e cobertura da terra não é atualizado com frequência e encontra-se defasado, influenciando, desta forma, nos resultados obtidos a partir das simulações. Desta forma, os dados de sensoriamento remoto provenientes de plataformas orbitais possibilitam a obtenção de informações multiespectrais com variadas resoluções espaciais e temporais. Estas informações podem ser empregadas para atualizar os dados

de entrada de modelos atmosféricos, regionais ou globais.

Além disto, as imagens orbitais permitem estimar diversos parâmetros físico-químicos e biológicos necessários na simulação das interações entre a radiação eletromagnética e os objetos que compõem a superfície terrestre. Com a atualização do uso e cobertura da terra utilizado pelo modelo de superfície BATS, percebe-se uma melhora de 10% na simulação da precipitação, proporcionando um aumento de 0,84 para 0,92 no coeficiente de correlação (significante a  $p < 0,05$ , teste t-Student). Ainda, nota-se uma boa concordância das simulações no que diz respeito à temperatura máxima e mínima, com coeficientes de correlação próximos à 0,95 e valores muito próximos ao esperado.

#### REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A.N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- CÂMARA NETO, G. **Modelos, linguagens e arquiteturas para banco de dados geográficos**. 1995. 265 f. Tese (Doutorado)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1995.
- CARTER, N.; KREUTZWISER, R. D.; LOE, R. C. Closing the circle: linking land use planning and water management at the local level. **Land Use Policy**, Guildford, v. 22, no. 2, p. 115-127, 2005.
- CROFT, T. A. Nighttime images of the earth from space. **Scientific America**, New York, v. 239, p. 86-98, 1978.
- DA ROCHA, R. P. et al. Precipitation diurnal cycle and summer climatology assessment over South America: an evaluation of Regional Climate Model version 3 simulations. **Journal of Geophysical Research**, Washington, D.C., v. 114, D10108, 2009.
- DAVID, M.; WALKO, R. L.; AVISSAR, R. Effects of Deforestation on Spatiotemporal

- Distributions of Precipitation in South America. **Journal of Climate**, Boston, no. 24, p. 2147-2163, 2011.
- DEE, D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berks, v. 137, no. 656, p. 553-597, 2011.
- DE SHERBININ, A. **CIESIN thematic guides to land-use and land-cover change**. Palisades: Center for International Earth Science Information Network of Columbia University, 2002. Disponível em: <[http://sedac.ciesin.columbia.edu/tg/guide\\_frame.jsp?g=47](http://sedac.ciesin.columbia.edu/tg/guide_frame.jsp?g=47)>. Acesso em: 08 ago. 2011.
- DICKINSON, R. E. et al. **Biosphere-atmosphere transfer scheme (bats) for the near community climate model**. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 1986. (NCARE/TN-275+STR).
- DICKINSON, R. E. et al. A regional climate model for the western United States. **Climatic Change**, Dordrecht, no. 15, p. 383-422, 1989.
- EMANUEL, K.A. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Washington, no. 48, p. 2313-2335, 1991.
- FORMAN, R. T. T. **Land mosaics: the ecology of landscapes and regions**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- FRITSCH, J. M.; CHAPPELL, C. F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. part I: convective parameterization. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v. 37, no. 8, p. 1722-1733, 1980.
- GIORGI, F. Two-dimensional simulations of possible mesoscale effects of nuclear war fires. **J. Geophys. Res.**, Malden, no. 94, p. 1127-1144, 1989.
- GOLDEWIJK, K. K.; RAMANKUTTY, N. Land cover change over the last three centuries due to human activities: the availability of new global data sets. **Geo Journal**, Dordrecht, no. 61, p. 335-344, 2004.
- HOUGHTON, J. T. et al. **Climate change 1995: the science of climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. Contribution of working group 1 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- HUFFMAN, G. J. et al. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scale. **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v. 8, no. 1, p. 38-55, 2007.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 55, no. 1, p. 69-78, 2000.
- MCGUFFIE, K.; HENDERSON-SELLERS, A. Forty years of numerical climate modelling. **International Journal of Climatology**, Prague, v. 21, no. 9, p. 1067-1109, 2001.
- MOREIRA, M. A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Análise espectral e temporal da cultura do café em imagens Landsat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 3, p. 223-231, 2004.
- MOLDERS, N.; RUHAAK, W. On the impact of explicitly predicted runoff on the simulated atmospheric response to small-scale land-use changes an integrated modeling approach. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 63, no. 1-2, p. 3-38, 2002.
- OLESON, K. E. A. **Technical description of the Community Land Model (CLM)**. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2004.
- REGCM TEAM. **RegCM version 4.0 core description**. Disponível em: <<http://eforge.escience-lab.org/gf/download/docmanfileversion/4/235/regcm-guide.pdf>>. Acesso: 18 ago. 2011.
- RUDORFF, B. F. T. et al. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using

landsat data. **Remote Sensing**, Basel, v. 2, no. 4, p. 1057-1076, 2010.

SPRING. **Sistema de processamento de informações georreferenciadas: versão 4.3**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.

ZENG, X.; ZHAO, M.; DICKINSON, R. E. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using toga coare and tao data. **Journal of Climate**, Boston, no. 11, p. 2628-2644, 1998.

ZHAN, X. et al. **Enhanced land cover and land cover change product, algorithm theoretical basis documents (ATBD): version 2.0.**, Greenbelt: NASA, GSFC, 1999.

**Data de submissão:** 05.11.2012

**Data de aceite:** 12.12.2012

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited