



IMPACTO DA CONSIDERAÇÃO DE UMA REGIÃO URBANIZADA NO BALANÇO DE ENERGIA EM SUPERFÍCIE.

Herika Pereira Rodrigues¹, Ênio Pereira de Souza²

RESUMO

Neste trabalho, testou-se o impacto de se considerar a presença de uma parametrização de superfície urbana, o TEB, no modelo BRAMS. Foram realizados dois experimentos numéricos sobre o Sudeste do Brasil. A consideração da região metropolitana causou impacto no saldo de radiação e nos fluxos de superfície. Como consequência, a temperatura, a umidade e a precipitação também foram afetadas. A parametrização de superfície urbana produziu valores mais realistas nas regiões metropolitanas.

Palavras-chave: Precipitação, TEB, BRAMS.

IMPACT OF THE CONSIDERATION OF AN URBANIZED AREA ON THE SURFACE ENERGY

ABSTRACT

In this work we tested the impact of considering the presence of an urban surface parameterization, the TEB module, into the BRAMS model. Two numeric experiments were run over Southeast Brazil. Considering the metropolitan region caused impact on the radiation budget and on the surface fluxes. As a consequence, temperature, humidity and precipitation were also affected. The urban surface parameterization produced more realistic values over metropolitan regions.

Keywords: Precipitation, TEB, BRAMS.

INTRODUÇÃO

A sociedade moderna que na sua maioria vive em ambientes urbanizados, tem sido atraída a estudos da climatologia urbana devido às transformações ambientais provocadas pelo processo de urbanização. Conseqüentemente, as condições de conforto térmico nas cidades são alteradas. A grande concentração de áreas construídas, a substituição de áreas verdes por pavimentação asfáltica, o adensamento populacional, os parques industriais, associados à concentração de poluentes, criam nas cidades um clima com especificidades que nos permite falar em “clima urbano”.

Devido ao acréscimo de carga térmica, as temperaturas no meio intra-urbano são maiores que na área rural circundante, ocorrendo o que se convencionou chamar “ilha de calor”. À noite, a ilha de calor pode continuar existindo enquanto perdurar a dissipação da energia térmica armazenada durante o dia pela estrutura urbana e a sua atmosfera. O aumento de temperatura nas cidades provoca uma redução da umidade relativa do ar. Isto se explica pelo aumento da pressão de vapor saturado, visto que, para maiores temperaturas o ponto de saturação é mais alto, havendo a diminuição da umidade relativa.

¹ Aluna do Curso de Meteorologia (bolsista P PIBIC/CNPq), Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, UFPG, Campina Grande, PB, e-mail: herika_hpr@hotmail.com

² Meteorologista, Professor. Doutor, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, UFPG, Campina Grande, PB, e-mail: esouza@dca.ufcg.edu.br

Na busca de instrumentos que minimizem os efeitos da urbanização sobre os principais elementos do clima, e conseqüentemente, sobre a qualidade térmica dos espaços, várias pesquisas vêm sendo conduzidas no Brasil e no mundo.

Os efeitos causados pela presença de áreas urbanizadas da Região Metropolitana de São Paulo foram estudados por Freitas (2003) através da modelagem numérica e da análise de dados observacionais. Foram definidos dois tipos de ocupação urbana, diferindo na verticalização e espaçamento entre as construções. O modelo Regional Atmospheric Model System – Town Energy Balance (RAMS-TEB), utilizado na pesquisa, mostrou pelo resultado das simulações que o calor antropogênico de origem veicular são de extrema importância no ciclo diurno de temperatura e umidade na região estudada e que a interação entre a brisa marítima e a ilha de calor intensificam as zonas de convergência no centro da cidade, podendo ocasionar a re-circulação de poluentes. A topografia também foi analisada e constatou-se que esta influenciou na intensidade da brisa marítima e na sua propagação sobre o continente. Quanto à presença de grandes corpos d'água, foi diagnosticado pelo autor, a sua contribuição para a diminuição das amplitudes do ciclo diurno de temperatura através das circulações do tipo brisa lacustre. Com o uso do modelo de dispersão, confirmou-se que a propagação da frente de brisa para o interior, transporta para áreas remotas os poluentes emitidos pela região metropolitana de São Paulo, diminuindo a concentração dos mesmos na região emissora.

Niachou et al. (2005) estudaram a distribuição dos ventos e a temperatura do ar dentro e fora de dois "canyons" urbanos na cidade de Atenas-Grécia no verão de 2002. O experimento foi executado numa base de 24 horas, sendo avaliada a temperatura na superfície das paredes externas dos edifícios e na camada asfáltica, em conjunto com medições da velocidade dos ventos em vários níveis no centro e fora dos "canyons" como também próximo das fachadas. O objetivo principal da pesquisa foi analisar as diferenças de ventos e temperatura contribuindo para um melhor conhecimento do micro ambiente criado dentro dos canyons urbanos e assim, interpretar o potencial de ventilação natural e híbrida em edifícios.

Velazquez-Lozada et al. (2006) utilizaram o modelo RAMS para simular três cenários distintos, referentes ao solo vegetado, ao solo urbano real e ao solo urbano futuro, observando-se a reação da atmosfera a esses cenários simulados no modelo. Fotografias aéreas e dados de superfície foram usados para identificar a presença de uma ilha de calor urbana na cidade de San Juan em Porto Rico. Os autores concluíram que o solo urbano interfere significativamente na dinâmica geral da parte norte da ilha de Porto Rico, devendo ser levado em consideração para estudos que simulem as condições atmosféricas locais ou de qualquer outra cidade tropical com cenários urbanos semelhantes ao estudado.

Trusilova e Jung (2007) investigaram os efeitos do solo urbano no clima europeu em escala regional e local. O modelo *Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research* (PSU-NCAR) *Mesoscale Model* (MM5) foi utilizado para simular dois cenários contrastantes e representativos da urbanização na Europa. Os valores de temperatura nas proximidades da superfície e precipitações foram bem distintos quando comparados os resultados gerados pelas simulações. Devido às grandes modificações na circulação atmosférica pela inserção das cidades, foi possível observar que a variação da temperatura no ciclo diurno em regiões com grande desenvolvimento urbano, uma redução média de 1,26°C a 0,71°C no verão e de 0,73°C a 0,54°C no inverno. O regime de chuvas no verão sofreu uma redução de -0,05mm a 0,22mm ao dia, e no inverno, um aumento de 0,09mm a 0,16mm ao dia. Concluiu-se com a pesquisa que regiões altamente urbanizadas afetam não só o clima no meio urbano, mais também as regiões do seu entorno, sendo importante a sua contribuição para a previsão dos impactos do crescimento urbano no clima regional.

Zhang et al. (2007) simularam uma ilha de calor urbana na cidade de Chongqing na China, utilizando o modelo Urban Canopy incorporado ao modelo meteorológico RAMS (RAMS – UC). Foram consideradas as emissões de calor antropogênico, a estrutura geométrica da malha urbana e características termodinâmicas da cidade. Calculou-se também o saldo de radiação, a temperatura e a precipitação. A partir dos testes de sensibilidade entre o RAMS original e o RAMS modificado e de dados observados, os autores concluíram que o modelo original não pode simular exatamente uma ilha de calor urbana, especialmente à noite, ao passo que com o RAMS modificado (RAMS – UC) os resultados foram significativamente melhorados.

Atualmente, um dos aspectos fundamentais da modelagem numérica da atmosfera é a parametrização de superfícies. O SVAT (*Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer*) é a parte do modelo que trata do balanço de massa e energia entre a superfície e a atmosfera. Até o final dos anos 1990, o processo de modelar a superfície dos modelos numéricos já levava em consideração importantes aspectos físicos da superfície, como cobertura vegetal, tipo de solo, cobertura de água, etc. A distinção entre diversos tipos de cobertura e uso do solo é determinante para a partição dos fluxos de superfície, que são os principais forçamentos da atmosfera. Contudo, a consideração de áreas urbanas não se justificava, pela baixa resolução dos modelos.

À medida que se aumenta a resolução horizontal dos modelos, aspectos importantes da heterogeneidade do solo se tornam proeminentes. Uma importante característica do uso do solo são as áreas cobertas por zonas urbanas. As características de uma cidade são próprias, dados o tipo de construção e processo de urbanização, a partição dos fluxos será diferente dos outros tipos de cobertura.

A versão 4.0 do *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System* – BRAMS conta no seu SVAT com uma parametrização de superfície, o TEB (*Town Energy Balance*).

O objetivo principal do presente trabalho foi avaliar algumas variáveis meteorológicas, como as componentes do balanço de energia para a região metropolitana de São Paulo e Rio de Janeiro, através da calibração do modelo BRAMS, levando em consideração a existência das regiões urbanas e testando o impacto de suas características no balanço de energia em superfície. As imagens foram geradas através do uso do modelo BRAMS e o aplicativo de visualização GrADS (*Grid Analysis Display System*).

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

São Paulo

A cidade de São Paulo, capital do estado de São Paulo é a maior cidade do Brasil, das Américas e de todo o hemisfério Sul, cidade brasileira mais influente no cenário global, sendo considerada a 14^a cidade mais globalizada do planeta. A região metropolitana de São Paulo é constituída por 39 municípios, sendo a terceira maior aglomeração urbana das Américas, possui 19.223.897 habitantes, o que a torna a sexta maior aglomeração urbana do mundo. Regiões muito próximas a São Paulo são também regiões metropolitanas do estado, como Campinas e Baixada Santista; outras cidades próximas compreendem aglomerações urbanas em processo de conurbação, como São José dos Campos, Sorocaba e Jundiaí.

Devido a sua extensa área urbana, a cidade possui um caráter bastante heterogêneo, variando de regiões altamente adensadas e verticais a bairros residenciais horizontais e de baixíssima densidade. Isto faz com que muitos habitantes da cidade praticamente desconheçam regiões do município além dos seus locais de residência ou de trabalho.

O clima de São Paulo é considerado subtropical (tipo Cwa segundo Köppen), com diminuição de chuvas no inverno e temperatura média anual de 20,7°C, tendo invernos brandos e verões com temperaturas moderadamente altas, aumentadas pelo efeito da poluição e da altíssima concentração de edifícios. O mês mais quente, fevereiro, tem temperatura média de 24°C e o mês mais frio, julho, de 17°C. A capital paulista tem também um dos menores índices de insolação do Brasil, com médias de seis horas de insolação diária/mensal em janeiro e sete horas em julho.

Devido a proximidade do mar, a maritimidade é uma constante do clima local, sendo responsável por evitar dias de calor intenso no verão ou de frio intenso no inverno e tornar a cidade úmida. A umidade tem índices considerados aceitáveis durante todo o ano, embora a poluição atinja níveis críticos no inverno, devido ao fenômeno de inversão térmica e pela menor ocorrência de chuvas de maio a setembro.

A precipitação anual média é de 1.376,2 mm, concentrados principalmente no verão. As estações do ano são relativamente bem definidas: o inverno é ameno e estio, e o verão, moderadamente quente e chuvoso. Outono e primavera são estações de transição. Geadas ocorrem esporadicamente em regiões mais afastadas do centro, e em invernos rigorosos, em boa parte do município. Também ocorrem freqüentemente em alguns municípios vizinhos.

Rio de Janeiro

A cidade do Rio de Janeiro é a segunda maior metrópole do Brasil, situada no Sudeste do país. A cidade ocupa a margem ocidental da baía de Guanabara e algumas de suas respectivas ilhas (como Governador e Paquetá), e desenvolveu-se sobre estreitas planícies aluviais comprimidas entre montanhas e morros. A serra do Mar, rebordo do planalto Atlântico, ergue-se a noroeste, distando cerca de 40 quilômetros do litoral, e divisa a metrópole do interior.

O clima é classificado como tropical atlântico (Aw), segundo o modelo de Köppen, e a média anual das temperaturas é de 23,1 °C. Por se tratar de uma cidade litorânea, o efeito da maritimidade é bastante perceptível, traduzindo-se em amplitudes térmicas relativamente baixas. A média anual das temperaturas médias máximas mensais é 26,1 °C, e das médias mínimas mensais, 20 °C. Já as médias anuais das temperaturas máximas e mínimas absolutas aferidas em cada mês ficam, respectivamente, em 36,2 °C e 13,8 °C. Julho é o mês mais frio, com médias máxima e mínima de 24 °C e 17 °C, e janeiro, o mais quente (29 °C e 23 °C).

Os verões são marcados por dias quentes e úmidos, eventualmente suplantando a barreira dos 40 °C em pontos isolados, enquanto os invernos apresentam-se amenos e com regime de chuvas mais restrito, com mínimas raramente inferiores a 10 °C. De modo geral, o ano pode ser dividido em duas estações: uma, relativamente quente e chuvosa, e outra, de temperaturas amenas; desta forma, primavera e outono agregam-se às características das demais, tratando-se mais de intervalos de transição do que estações propriamente definidas.

O volume pluviométrico acumulado anual é de 1.086 mm. As chuvas concentram-se nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, tornando-se mais esparsas no período de junho a agosto. Abril e novembro apresentam números razoáveis, ainda que menores que os dos meses de maior pluviosidade.

Temporais não são incomuns no verão, os quais invariavelmente ocasionam vítimas, fatais ou não, sendo o motivo maior os deslizamentos nas encostas da cidade.

Descrição do modelo numérico utilizado e o esquema TEB

O uso de modelos numéricos para estudar a atmosfera é prática cada vez mais comum, tanto para a pesquisa da atmosfera (tendo sua principal utilização na representação de fenômenos de mesoescala), quanto para a previsão de tempo e clima. Na atualidade, tornou-se possível estudar a complexa superfície das cidades e o seu efeito no clima local e regional. Quando se tentava estudar os efeitos da cobertura de uma região, geralmente se atribuía a cobertura do solo características de deserto ou semi-deserto, sendo necessário para a melhoria das simulações uma representação mais realista do solo urbano.

O modelo numérico utilizado neste trabalho foi o “*Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*” (BRAMS), na versão 4.2, que foi desenvolvido a partir do RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), cuja estrutura básica é descrita por Pielke et al. (1992). O BRAMS é um modelo regional de mesoescala e é integrado na versão não-hidrostática. Dentre as parametrizações físicas utilizadas neste trabalho estão: radiação de onda longa e de onda curta de acordo com Chen e Cotton (1983). A turbulência na Camada Limite Planetária é calculada segundo Mellor e Yamada (1986). A microfísica segue o esquema descrito por Walko et al. (1995). A convecção profunda é do tipo Kuo (Kuo, 1974), modificada por Molinari (1985) e Molinari e Corsetti (1985). A interação superfície-atmosfera foi feita no BRAMS através do modelo LEAF-2 (Walko et al., 2000) e a convecção rasa foi calculada segundo Souza (1999).

Recentemente foi implementado no BRAMS o esquema Town Energy Balance – TEB, proposto por Masson (2000), que é capaz de fazer uma representação mais realista da cidade. No TEB (Town Energy Budget), a representação de áreas urbanizadas é feita utilizando uma geometria de “canyon” local em vez da representação usual de solo nu ou da modificação dos parâmetros da vegetação. O esquema LEAF-2 permite o refinamento dos balanços radiativos, calor turbulento e fluxos de superfície. Os detalhes sobre a implementação do TEB no BRAMS podem ser encontrados em Freitas (2003).

Oke e colaboradores propuseram na década de 1970 um modelo de “canyon” em que uma rua é margeada por duas faces de paredes. Porém esse modelo não interage com dados atmosféricos (radiação, ventos acima da cobertura dos edifícios), apenas são forçados por eles.

Devido à forma complexa da malha urbana das cidades, o balanço de energia é dividido em três partes, levando-se em consideração a superfície dos telhados, ruas e paredes e os efeitos de orientação são mediados para ruas e paredes. Também permite distinguir se uma determinada área é formada por edifícios altos ou baixos, como o tipo de atividade exercida (residencial, comercial ou industrial).

As regiões urbanas são representadas no esquema TEB como:

- Os edifícios têm a mesma dimensão (largura e altura);
- As edificações estão dispostas em ruas idênticas, sendo que a sua largura é bem menor que o seu comprimento;
- A orientação das ruas é possível em qualquer orientação;

Paredes ensolaradas ou sombreadas são tratadas em conjunto uma vez que estas são idênticas para todos os processos físicos, com exceção da radiação solar direta. O TEB não utiliza uma única temperatura da superfície urbana (representativa de toda a cobertura urbana) e sim, três temperaturas de superfície, representativas dos telhados (TR), ruas (Tr) e paredes (Tw). Para o tratamento dos fluxos de condução para/do interior das construções (telhados ou paredes) ou solo (ruas), cada tipo de superfície é discretizada em várias camadas. As equações que descrevem a evolução da temperatura das camadas são baseadas em considerações de balanço de energia.

As equações prognósticas para as camadas superficiais do telhado, paredes e ruas, de maneira genérica, podem ser escritas como:

$$C_{*k} \frac{\partial T_{*k}}{\partial t} = (1 - \delta_{snow}) \frac{1}{d_{*k}} (S_{*k}^{\#} + L_{*k}^{\#} - H_{*k} - LE_{*k} - G_{*k,1,2}) + \delta_{snow} \frac{1}{d_{*k}} (G_{*snow,1} - G_{*k,1,2})$$

Em que,

O subscrito * denota R, r, w, descrevendo telhado, rua e parede respectivamente.

T_{*k} é a temperatura da k-ésima camada da superfície considerada (na equação acima, $k=1$, indicando a camada mais externa);

C_{*k} representa a capacidade térmica;

d_{*k} é a espessura da camada;

$S_{*k}^{\#}$, $L_{*k}^{\#}$, H_{*k} , LE_{*k} , $G_{*k,1,2}$ e $G_{*snow,1}$ referem-se à radiação solar líquida, radiação infravermelha líquida, fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente, e condução do fluxo de calor entre a camada superficial (em contato com o ar) e a camada adjacente, condução dos fluxos de calor entre a base do manto de neve e a superfície, respectivamente;

δ_{snow} é a fração de neve na superfície (zero nas paredes).

Assume-se que a camada superficial de cada superfície é suficientemente fina, tal que a temperatura média da camada pode ser utilizada para avaliar os fluxos radiativos e turbulentos. Isto significa que as temperaturas da superfície T_* são calculadas como:

$$T_* = T_{*1}$$

Para as outras camadas a temperatura é obtida através de uma simples equação de condução de calor. Para a k-ésima camada:

$$c_{*k} \frac{\partial T_{*k}}{\partial t} = \frac{1}{d_{*k}} (G_{*k-1,k} - G_{*k,k+1})$$

Nessas equações, o fluxo de condução entre as camadas k e k+1 (para k < n, em que n é o número de camadas) é:

$$G_{*k,k+1} = \bar{\lambda}_{k,k+1} \frac{T_{*k} - T_{*k+1}}{\frac{1}{2}(d_{*k} + d_{*k+1})}$$

Com

$$\bar{\lambda}_{k,k+1} = \frac{d_{*k} + d_{*k+1}}{(d_{*k}/\lambda_k) + (d_{*k+1}/\lambda_{k+1})}$$

Sendo λ_k a condutividade térmica para a camada k.

As condições de fronteira inferior para telhados e paredes são dadas pela temperatura interna das construções. Para as ruas é utilizada uma fronteira inferior de fluxo zero.

No esquema TEB os fluxos antropogênicos também são levados em consideração, sendo o aquecimento doméstico e a combustão, as principais fontes de calor e umidade que são liberadas para a atmosfera pela atividade humana. As fontes de combustão são divididas em industrial e veicular. Os fluxos de calor e umidade para essas fontes são especificados no esquema pelo usuário de acordo com as informações adquiridas para essas atividades na região pretendida para o estudo. O balanço de energia em superfície não é modificado diretamente pela ação desses fluxos, pois são liberados para o ar. Os fluxos relacionados à atividade industrial podem influenciar diretamente a atmosfera e os fluxos relacionados à atividade veicular modificarão o balanço de ar no canyon.

Na simulação realizada com o esquema TEB foram utilizadas duas configurações correspondentes aos dois tipos de ocupação urbana. A Tabela 01 mostra a diferença entre elas.

Tabela 01: Configurações de parâmetros referentes às ocupações urbanas tipo 1 e tipo 2 introduzidas no esquema TEB para o experimento.

Parâmetro	Urbano tipo 1	Urbano tipo 2
Altura das construções	50 m	5m
Largura das construções	25 m	5m
Z_0	0,8 m	0,6m
Fonte veicular de calor sensível	30 W/m ² (máximo)	20 W/m ² (máximo)
Fonte veicular de calor latente	7 W/m ² (máximo)	5 W/m ² (máximo)
Fonte industrial de calor sensível	20 W/m ²	30 W/m ²
Fonte industrial de calor latente	40 W/m ²	50 W/m ²

Descrição dos Experimentos

Foram realizados dois experimentos numéricos, um simulado usando o TEB ativo e outro com o TEB não acionado, tendo ambos os experimentos características gerais comuns. Para a pesquisa o modelo BRAMS foi iniciado a 00:00 UTC do dia 10 de fevereiro de 2009 e integrado durante um período de 48 horas, isto é, até a 00:00 UTC do dia 11 de fevereiro de 2009. As resoluções das grades horizontais são de 16 km e 4 km respectivamente. A Figura 1 indica a cidade de São Paulo e Rio de Janeiro na resolução de 16 km (grade 1).

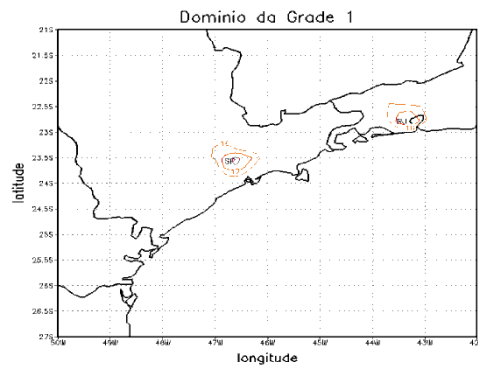


Figura 1: Área em estudo gerada através do aplicativo de visualização GrADS (Grid Analysis Display System).

A Figura 2 mostra a área de estudo e os pontos analisados. A região 1 refere-se a cidade de São Paulo (coordenadas: 23,6°S;46,6°W), a região 2 à cidade do Rio de Janeiro (coordenadas: 22,8°S; 43,4°W) e por fim, um ponto qualquer apresentado para comparação como área não-metropolitana (coordenadas: 22,0°S;49,0°W).

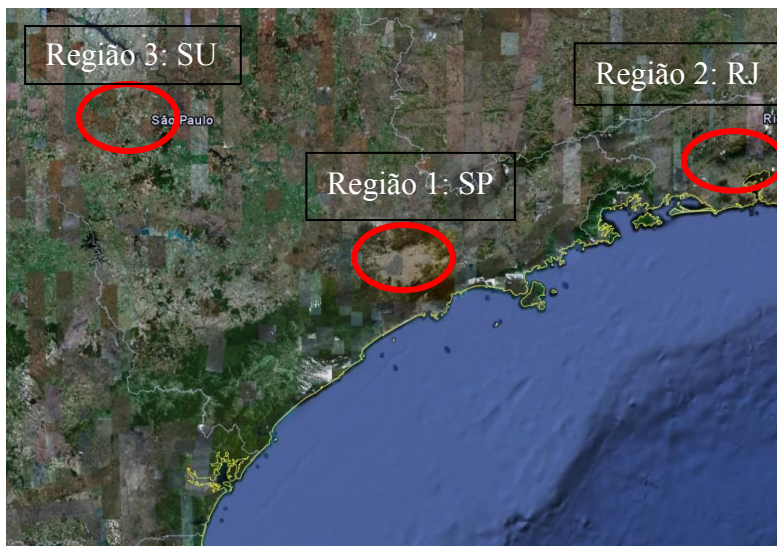


Figura 2: Imagem de satélite obtida pelo Google Earth com as indicações das respectivas áreas analisadas na pesquisa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Discute-se, inicialmente, a precipitação acumulada entre os dois dias estudados, para a região 1, 2 e 3, São Paulo, Rio de Janeiro e região Sem Urbanização.

Na Figura 3 para São Paulo, a chuva começou a partir das 11 UTC (Hora Local=UTC-3) do dia 10 de fevereiro e teve um aumento significativo (entre 26,0 e 28,0 mm) até por volta das 23 UTC do mesmo dia, quando cessou. À partir das 15 UTC do dia 11 de fevereiro tornou a chover atingindo entre 28,0 e 32,0 mm de chuva (acumulada desde o início da simulação). O modelo com o TEB apresenta valores menores de precipitação acumulada em relação ao modelo sem o TEB. Mas isso não significa que a existência da cidade diminui a chuva. Isso é apenas um caso isolado. O que se deduz deste resultado, é que a parametrização urbana afeta a distribuição de precipitação sobre as áreas urbanas.

Para a Figura 4, à partir das 15 UTC do dia 10 de fevereiro começou a precipitar, ocorrendo um aumento gradativo até as 17 UTC, chegando a atingir entre 4,5 e 7,0 mm aproximadamente. À partir daí, a chuva cessou até às 13 UTC do dia seguinte, quando aumentou novamente até 17 UTC, voltando a cessar, chegando a atingir entre 10,0 e 20,0 mm (acumulado desde o início da simulação). O modelo com o TEB apresentou valores bem maiores em relação ao modelo sem o TEB. Nesse caso, o Rio de Janeiro mostrou resultado contrário ao de São Paulo.

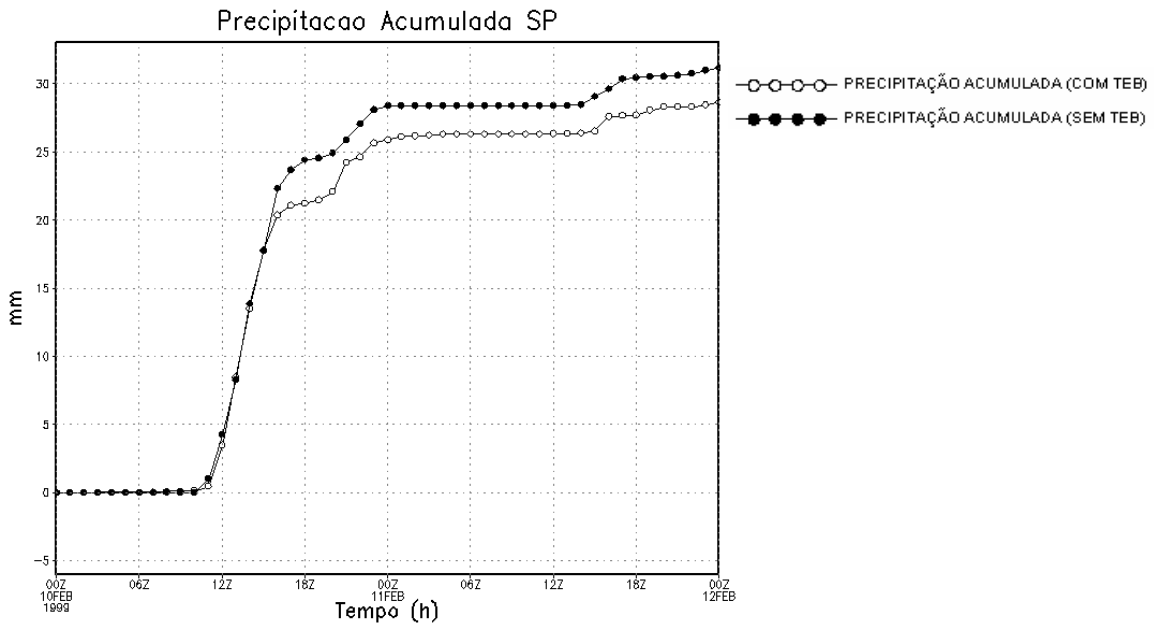


Figura 3: Precipitação Acumulada para a região 1: SP.

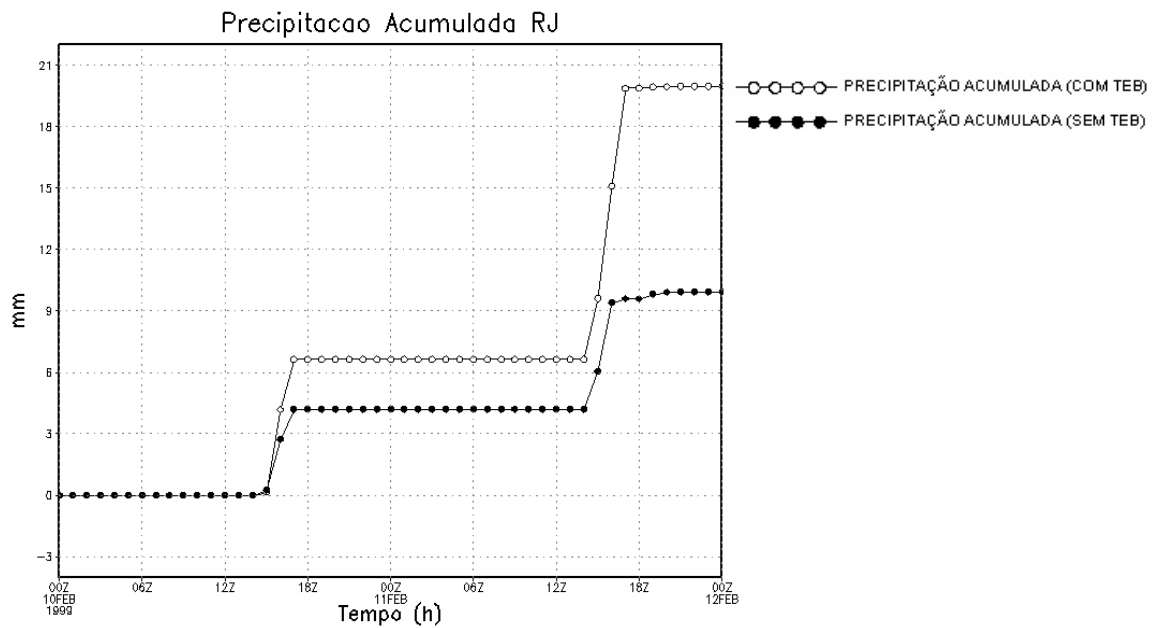


Figura 4: Precipitação Acumulada para a região 2: RJ.

A Figura 5 mostra que valores das duas curvas são quase iguais. Isso é interessante para ilustrar a diferença que o modelo com o TEB ativado faz para regiões urbanizadas (Figuras 3 e 4) e não-urbanizadas (Figura 5). Ou seja, para regiões urbanizadas o TEB apresenta-se com valores diferenciados daqueles sem o TEB.

A Figura 8, para os dias 10 e 11 de fevereiro, apresenta valores mínimos e máximos por volta das 9 e 18 UTC, respectivamente, para a região sem urbanização. Para o dia 10 de fevereiro apresenta valores mínimos de 22 °C e máximos de 28 °C. Para o dia 11 de fevereiro apresenta valores mínimos de 23 °C e máximos de 29,5 °C aproximadamente. Note-se que, para uma região distante das grandes áreas metropolitanas, o efeito destas áreas é muito pequeno.

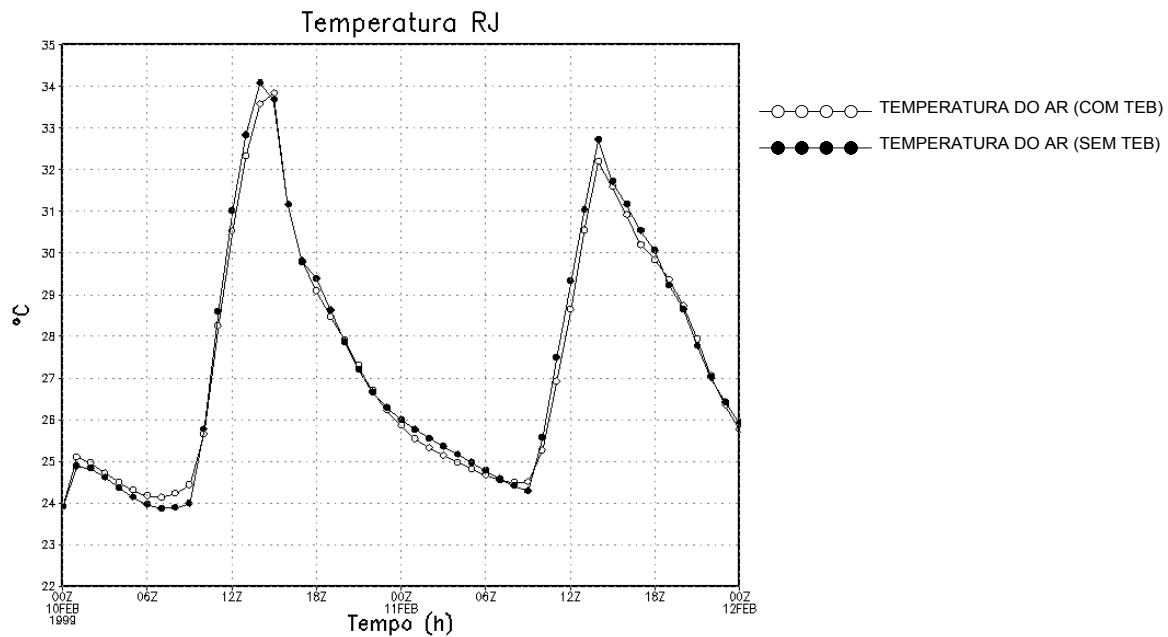


Figura 7: Temperatura do Ar para a região 2: RJ.

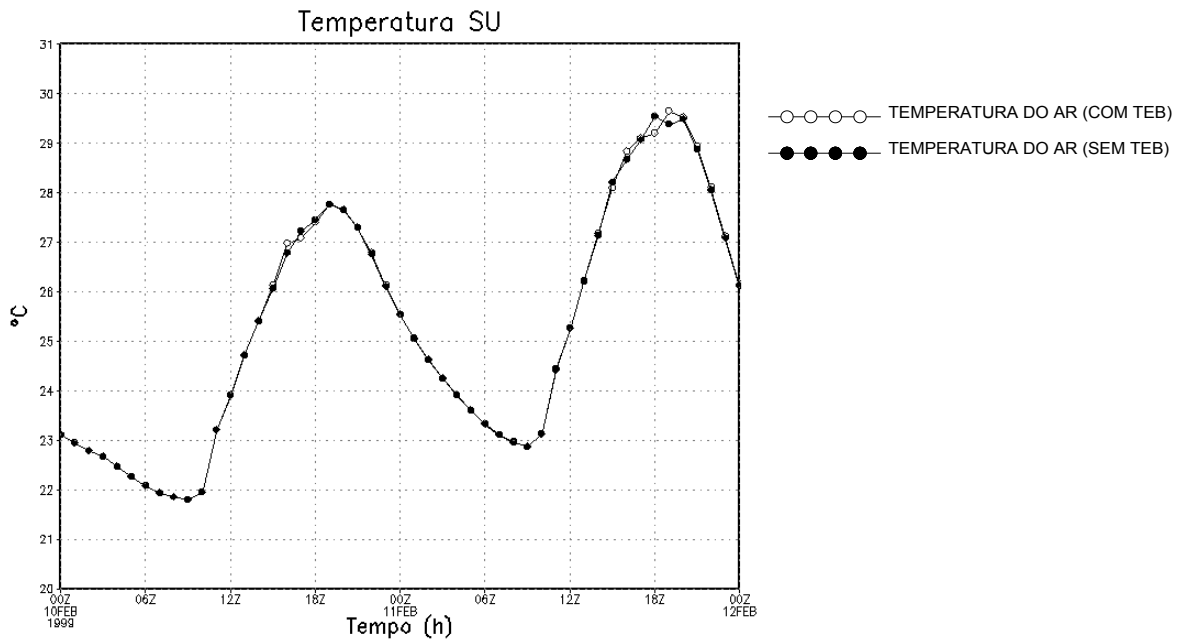


Figura 8: Temperatura do Ar para a região 3: SU.

Discute-se agora a razão de mistura gerada nos experimentos. A Figura 9 apresenta valores para a região de São Paulo. Para o dia 10, os valores mínimos ocorrem por volta das 10 UTC (em torno de 15,7 g/kg com o TEB e 15,3 g/kg sem o TEB), e máximos por volta das 18 UTC (em torno de 16,95 g/kg com o TEB e 17,3 g/kg sem o TEB). Já no dia 11 de fevereiro, os valores mínimos ocorrem por volta das 8 UTC (em torno de 15,7 g/kg com o TEB e valores em torno de 15 g/kg sem o TEB). Um importante ponto dessa discussão é que a superfície urbana causa noites mais úmidas e dias mais secos sobre São Paulo.

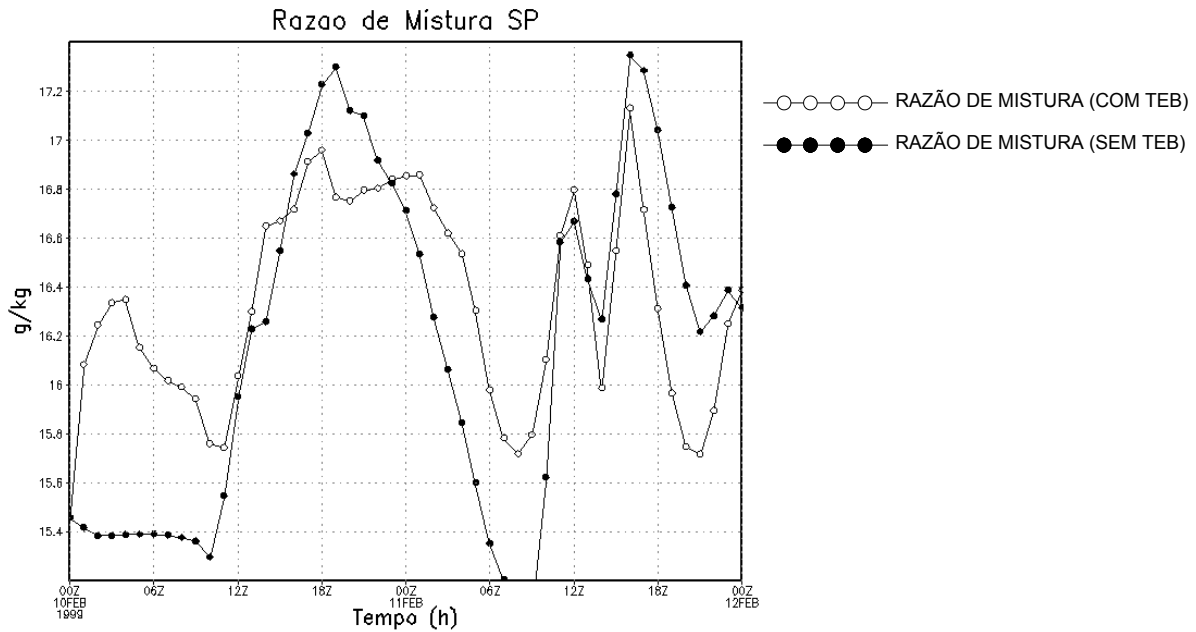


Figura 9: Razão de Mistura para a região 1: SP.

A Figura 10 apresenta valores para a região 2 (Rio de Janeiro). O dia 10 de fevereiro apresenta valores mínimos por volta das 13 UTC (em torno de 14,7 g/kg com o TEB e 14,5 g/kg sem o TEB), e máximos por volta das 21 UTC (em torno de 18,0 g/kg com o TEB e 17,8 g/kg sem o TEB). No dia 11 de fevereiro ocorrem mínimos às 9 UTC (em torno de 16,3 g/kg com o TEB e 15,8 g/kg sem o TEB), e máximos às 18 UTC (em torno de 18,8 g/kg com o TEB e 19,0 g/kg sem o TEB). A tendência de a região urbanizada produzir dias mais secos e noites mais úmidas também é observada no Rio de Janeiro. Porém, o efeito durante o dia é menos expressivo. Isso pode ser atribuído à precipitação simulada, principalmente no segundo dia. Outro aspecto é que, por ser uma cidade litorânea, a circulação sobre o Rio de Janeiro deve agir de forma diferente do que acontece sobre São Paulo.

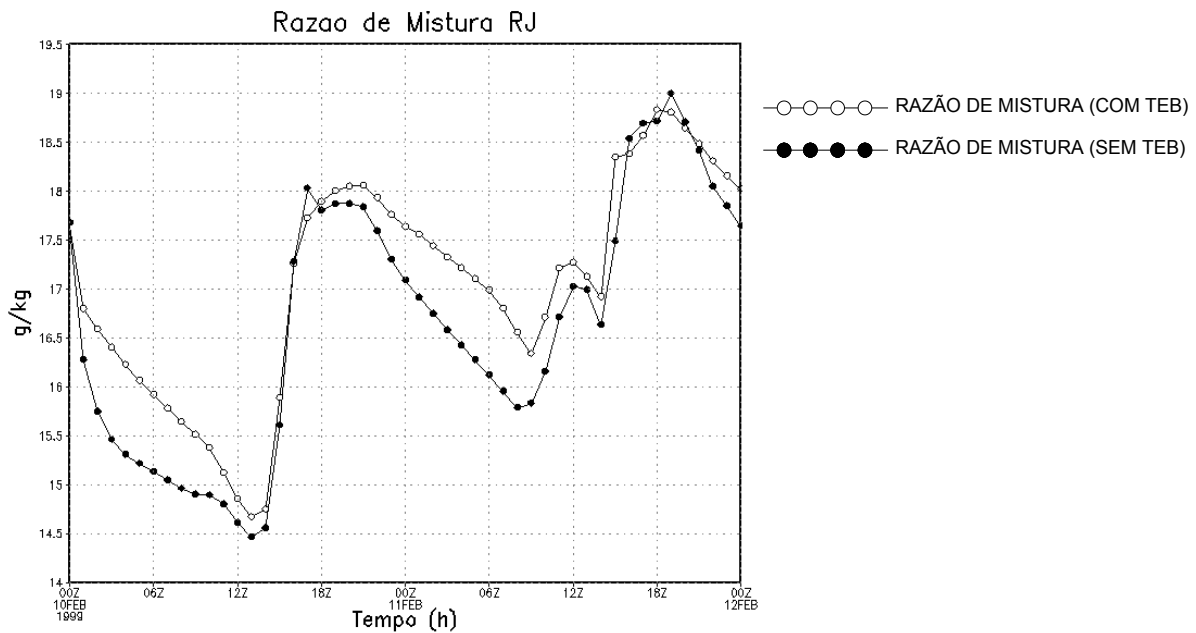


Figura 10: Razão de Mistura para a região 2: RJ.

A Figura 11 mostra que as curvas para a área sem urbanização estão sobrepostas. No dia 10 tem mínimos às 9 UTC (em torno de 16,4 g/kg) e máximos as 17 UTC (em torno de 19,0 g/kg) e no dia 11 de fevereiro tem mínimo as 9 horas (em torno de 16,8 g/kg) e máximo as 14 horas (em torno de 19,8 g/kg).

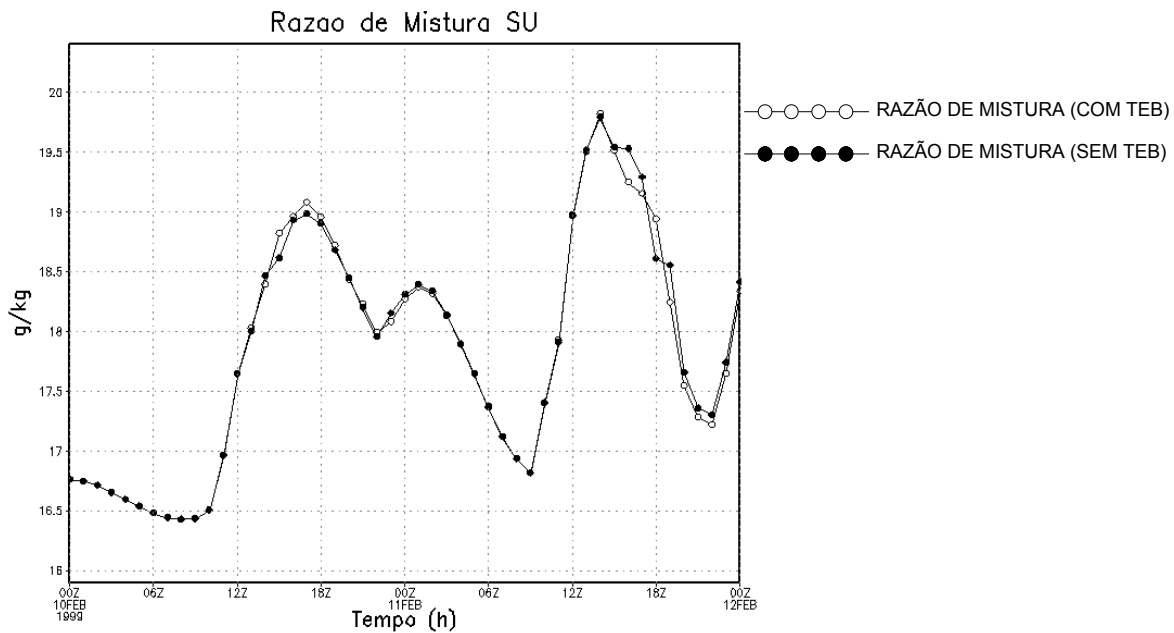


Figura 11: Razão de Mistura para a região 3: SU.

Discute-se, em seguida, a temperatura do ponto de orvalho (T_d), tanto para o modelo com o TEB quanto para o modelo sem o TEB. A Figura 12 apresenta os valores para a região em São Paulo. Note-se que a curva para T_d reflete as condições de temperatura e de umidade discutidas anteriormente. As curvas estão bem distintas, das quais para o dia 10 de fevereiro, os valores mínimos ocorrem por volta das 10 UTC (em torno de $19,7^{\circ}\text{C}$ com o TEB e $19,2^{\circ}\text{C}$ sem o TEB) e os valores máximos ocorrem por volta das 18 horas (em torno de $20,8^{\circ}\text{C}$ com o TEB e $21,1^{\circ}\text{C}$ sem o TEB). Para o dia 11 de fevereiro os valores mínimos ocorrem por volta das 9 UTC (em torno de $19,6^{\circ}\text{C}$ com o TEB e valores abaixo de 19°C sem o TEB) e valores máximos ocorrem por volta das 18 UTC (em torno de $20,9^{\circ}\text{C}$ com o TEB e $21,1^{\circ}\text{C}$ sem o TEB). A diferença entre as curvas é bem nítida e mostra o quanto a consideração da área urbana diminui a saturação durante o dia e aumenta durante a noite.

A Figura 13 apresenta as curvas para o Rio de Janeiro. Para o dia 10 de fevereiro, os valores mínimos ocorrem por volta das 13 UTC (em torno de $19,5^{\circ}\text{C}$ com o TEB e $19,3^{\circ}\text{C}$ sem o TEB) e máximos por volta das 21 UTC (em torno de $22,7^{\circ}\text{C}$ com o TEB e $22,5^{\circ}\text{C}$ sem o TEB). No dia 11 de fevereiro os valores mínimos ocorrem por volta das 9 UTC (em torno de $21,1^{\circ}\text{C}$ com o TEB e $20,5^{\circ}\text{C}$ sem o TEB) e máximos por volta das 19 UTC (em torno de $23,3^{\circ}\text{C}$ com o TEB e $23,5^{\circ}\text{C}$ sem o TEB). As curvas apresentam-se mais aproximadas quando comparadas com a figura 12, para São Paulo.

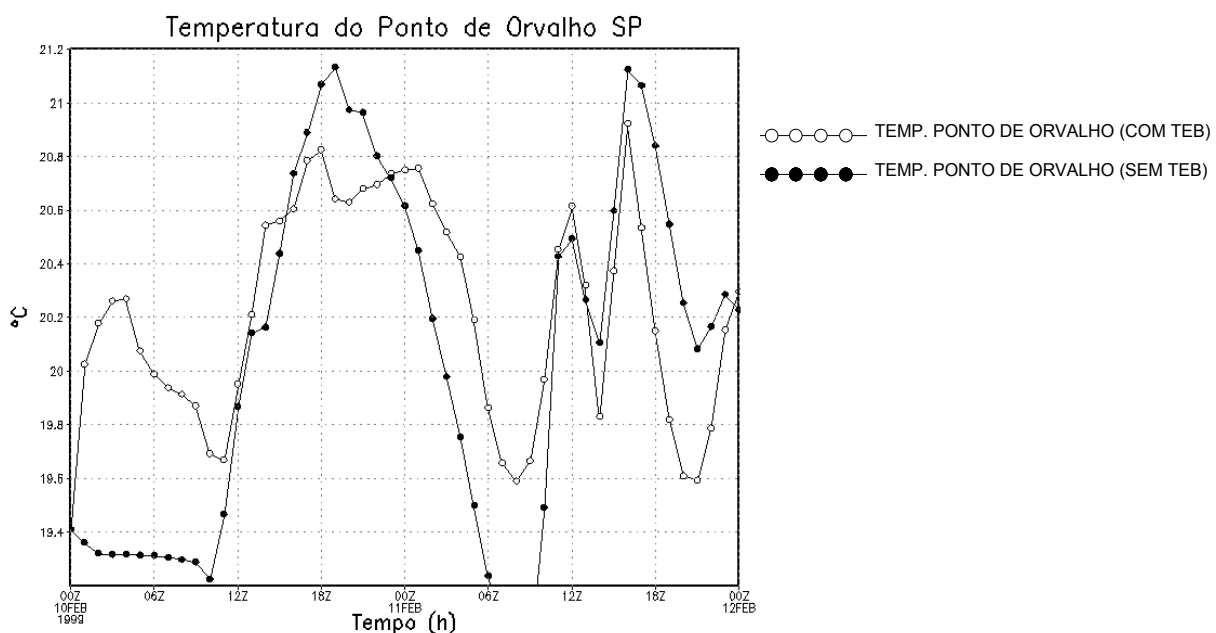


Figura 12: Temperatura do Ponto de Orvalho para a região 1: SP.

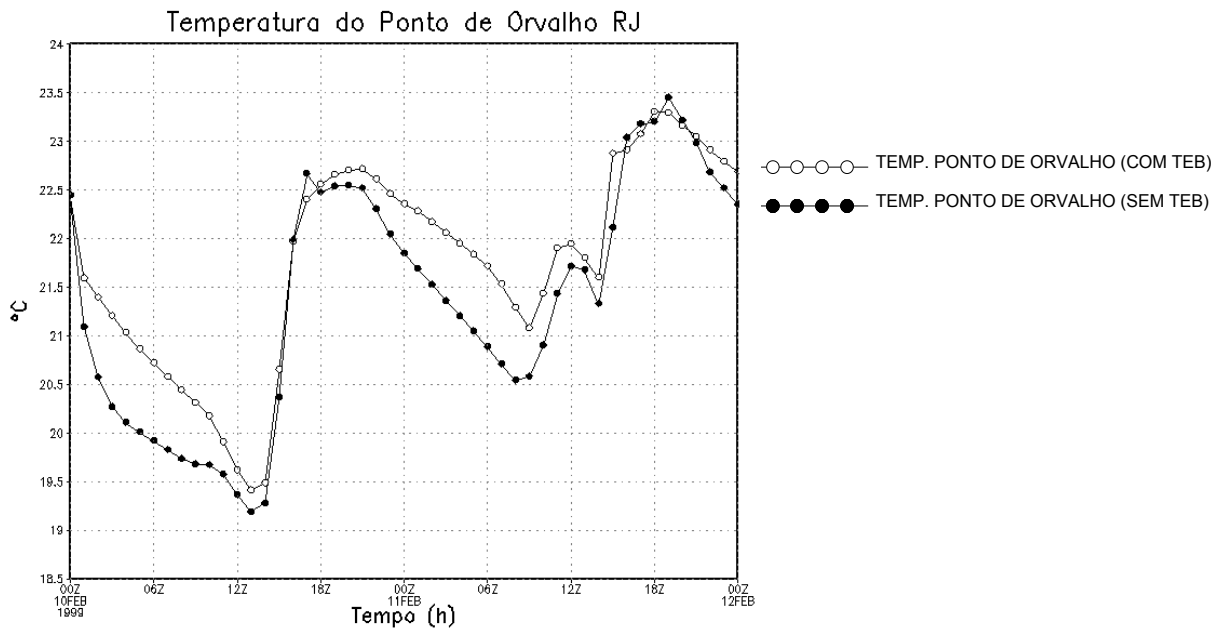


Figura 13: Temperatura do Ponto de Orvalho para a região 2: RJ.

A Figura 14 apresenta valores da temperatura do ponto de orvalho para a região sem urbanização. No dia 10 os valores mínimos ocorrem por volta das 9 UTC (em torno de 20,8 °C) e máximos às 17 UTC (em torno de 23,2 °C). Já para o dia 11 de fevereiro os valores mínimos ocorrem às 9 UTC (em torno de 21,1 °C) e os máximos às 14 UTC (em torno de 23,7 °C). As curvas estão praticamente sobrepostas confirmando que não há variações notáveis para o TEB sem que haja uma região urbanizada.

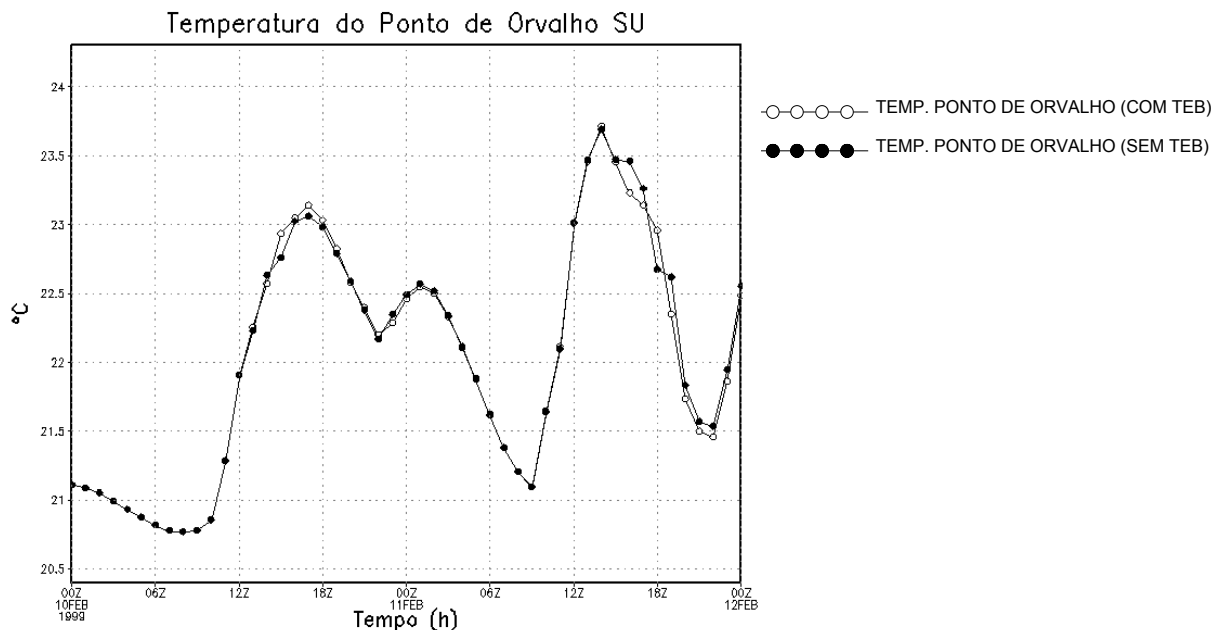


Figura 14: Temperatura do Ponto de Orvalho para a região 3: SU.

As Figuras 15, 16 e 17 apresentam o saldo de radiação para as 3 regiões em estudo. A Figura 15 apresenta o balanço de energia para a região metropolitana de São Paulo. Da 00 UTC às 9 UTC do dia 10 de fevereiro, a curva com o TEB apresenta valores em torno de 30 W.m⁻² e a curva sem o TEB apresenta valores em torno de -30,0 W.m⁻². Às 9 UTC ambas as curvas aumentam seus valores atingindo um máximo por volta das 14 UTC (800,0 W.m⁻² como o TEB e 680,0 W.m⁻² sem o TEB) voltando a decrescer até às 22 UTC (atingindo 30 W.m⁻² na curva com o TEB e valores em torno de -50,0 W.m⁻² sem o TEB). No dia seguinte começa a aumentar às 9 UTC chegando a um pico às 16 UTC (800,0 W.m⁻² como o TEB e 780,0 W.m⁻² sem o TEB) tornando a decrescer até às 22 UTC (atingindo -20,0 W.m⁻² na curva com o TEB e valores em torno de -60,0 W.m⁻² sem o TEB).

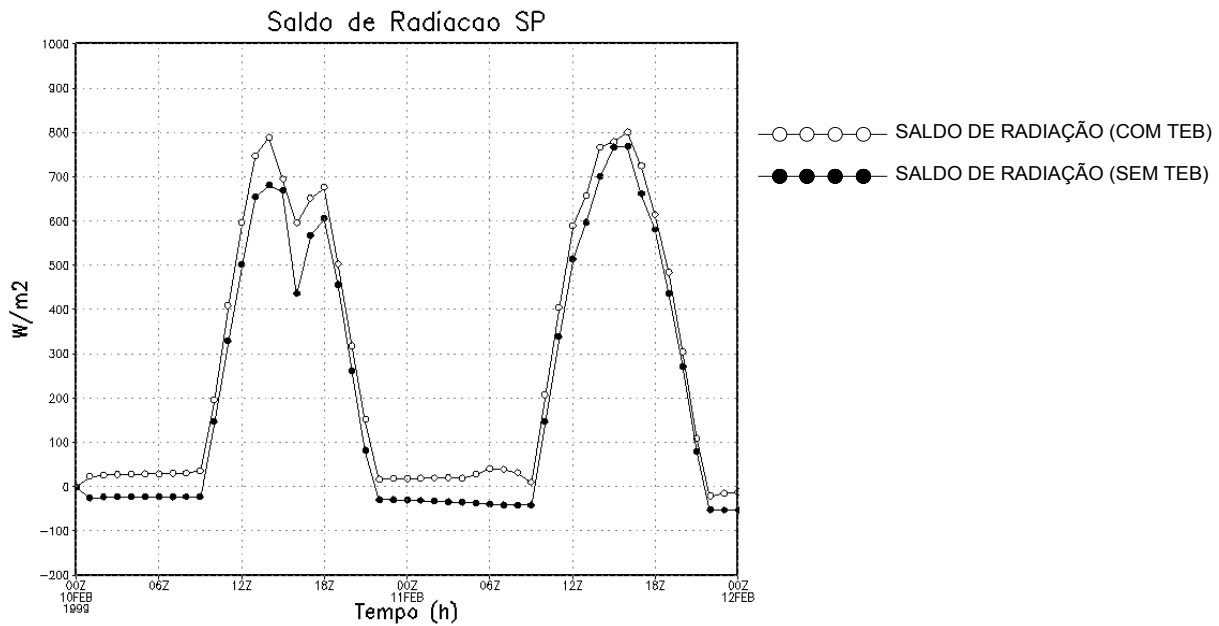


Figura 15: Saldo de Radiação para a região 1: SP.

A Figura 16 apresenta valores para a região metropolitana do Rio de Janeiro. Os valores iniciais das curvas são 40 W.m^{-2} com o TEB e $-10,0 \text{ W.m}^{-2}$ sem o TEB. Às 9 UTC o saldo de radiação aumenta até atingir um máximo às 14 UTC ($750,0 \text{ W.m}^{-2}$ como o TEB e $680,0 \text{ W.m}^{-2}$ sem o TEB), decrescendo até às 22 UTC tornando a atingir 40 W.m^{-2} com o TEB e $-10,0 \text{ W.m}^{-2}$ sem o TEB. No dia seguinte às 9 UTC começa a aumentar novamente atingindo máximo às 14 UTC ($720,0 \text{ W.m}^{-2}$ como o TEB e $680,0 \text{ W.m}^{-2}$ sem o TEB), tornando a decrescer até atingir 40 W.m^{-2} com o TEB e $-10,0 \text{ W.m}^{-2}$ sem o TEB por volta das 22 UTC.

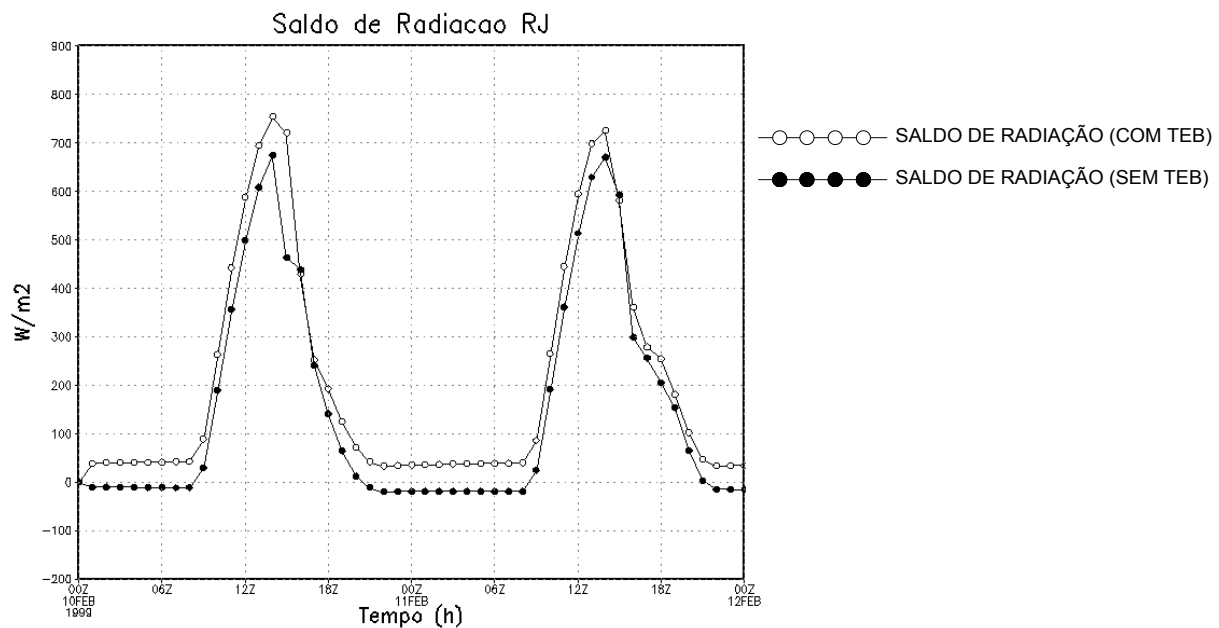


Figura 16: Saldo de Radiação para a região 2: RJ.

A Figura 17 apresenta os valores do saldo de radiação para a região sem urbanização. Percebe-se que as curvas são praticamente iguais, com valores no período diurno de $-10,0 \text{ W.m}^{-2}$, aumentado das 9 UTC às 16 UTC (com máximo de $780,0 \text{ W.m}^{-2}$ dia 10 de fevereiro e $840,0 \text{ W.m}^{-2}$ no dia 11 de fevereiro.) tornando a decrescer até atingir $-10,0 \text{ W.m}^{-2}$ por volta das 22 UTC. Esse ciclo ocorre em ambos os dias, tendo apenas uma diferença nos valores máximos.

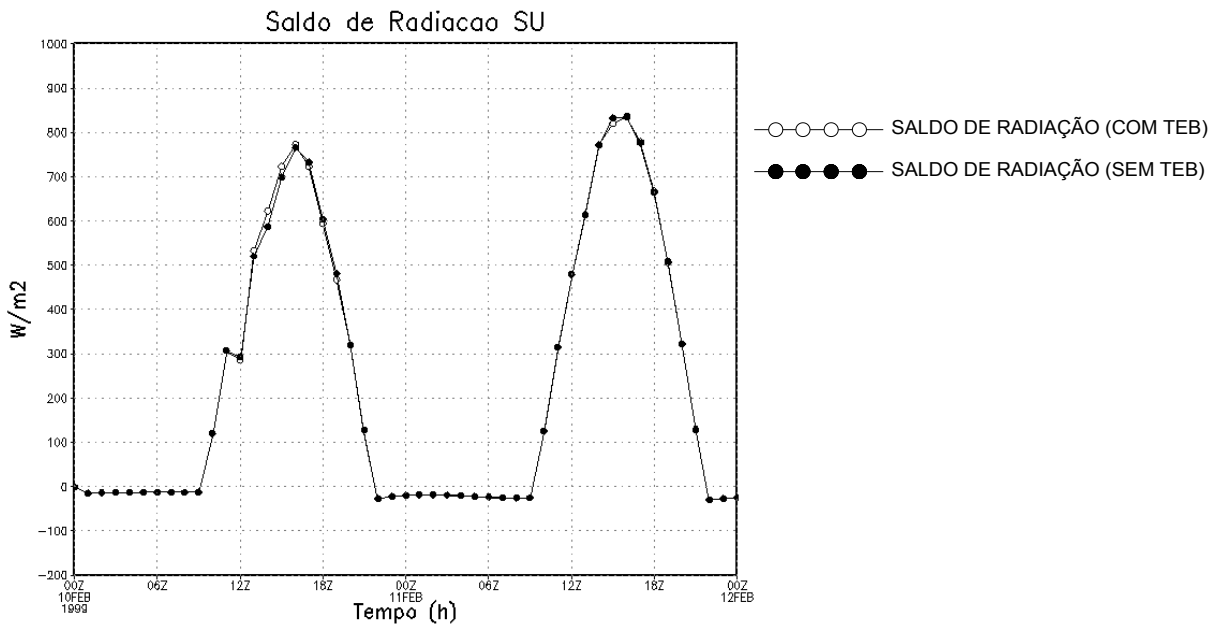


Figura 17: Saldo de Radiação para a região 3: SU.

Discute-se, a seguir, os fluxos de calor sensível e latente para as 3 regiões em estudo. A Figura 18 apresenta curvas de fluxo de calor sensível para a região 1: SP. Durante o período noturno para o dia 10 de fevereiro, o fluxo é praticamente zero. À partir das 9 UTC a atividade solar faz com que os valores comecem a se elevar, atingindo um máximo às 18 UTC (em torno de $300,0 \text{ W.m}^{-2}$ com o TEB e $180,0 \text{ W.m}^{-2}$ sem o TEB, tornando a cair até às 21 UTC atingindo zero W.m^{-2} novamente. O fluxo só começa a aumentar a partir das 9 UTC do dia 11 de fevereiro atingindo um máximo por volta das 18 UTC (em torno de $410,0 \text{ W.m}^{-2}$ com o TEB e $280,0 \text{ W.m}^{-2}$ sem o TEB), voltando a cair novamente até atingir zero por volta das 22 horas. Em praticamente quase toda a simulação feita, o fluxo de calor sensível com o TEB manteve-se mais elevado do que o sem o TEB.

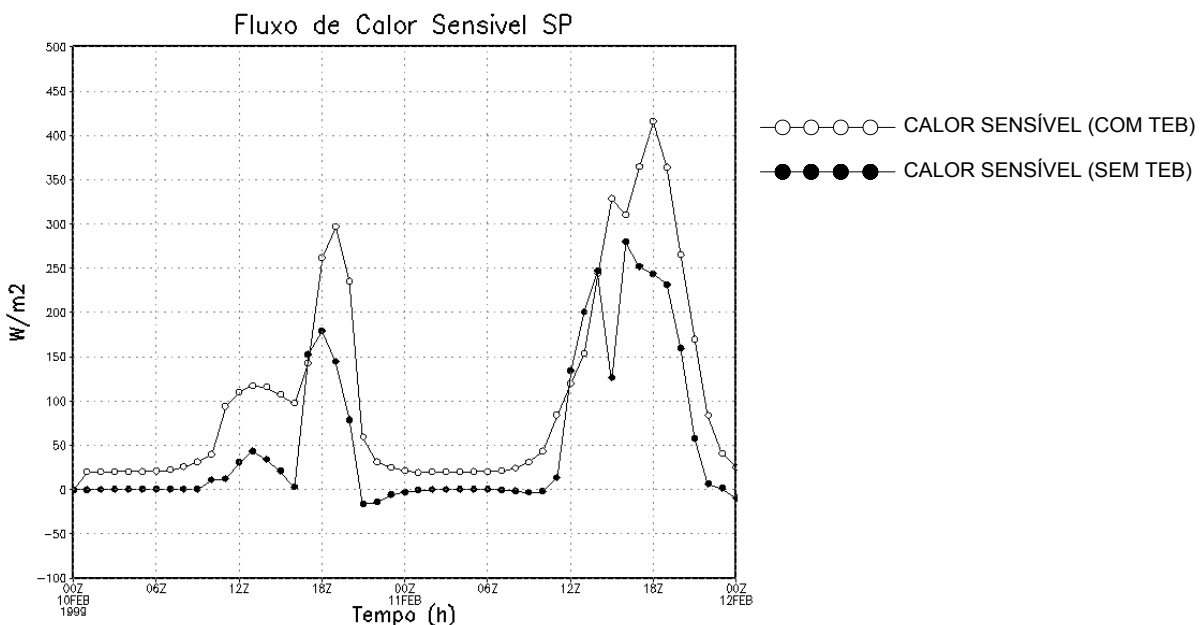


Figura 18: Fluxo de Calor Sensível para a região 1: SP.

A Figura 19 apresenta valores de fluxo de calor sensível para a região 2: Rio de Janeiro. Os valores iniciam em torno de zero W.m^{-2} e só a partir das 9 horas do dia 10 de fevereiro começa a aumentar, atingindo um pico máximo às 15 UTC aproximadamente (em torno de $480,0 \text{ W.m}^{-2}$ com o TEB e sem o TEB), decrescendo até às 23 UTC aproximadamente, voltando a atingir zero W.m^{-2} . Apenas a partir das 9 UTC do dia seguinte o fluxo de calor sensível começa a aumentar novamente, atingindo um máximo às 14 UTC (em torno de $360,0 \text{ W.m}^{-2}$ com o TEB e $420,0 \text{ W.m}^{-2}$ sem o TEB), voltando a cair novamente até atingir zero W.m^{-2} às 22 horas. Os valores com o TEB apresentam-se um pouco superiores para o dia 10 de

fevereiro, e inferiores no dia 11 de fevereiro. Note-se, que mais uma vez, os resultados para o Rio de Janeiro são diferentes dos de São Paulo, indicando a influência de possíveis fatores externos às cidades.

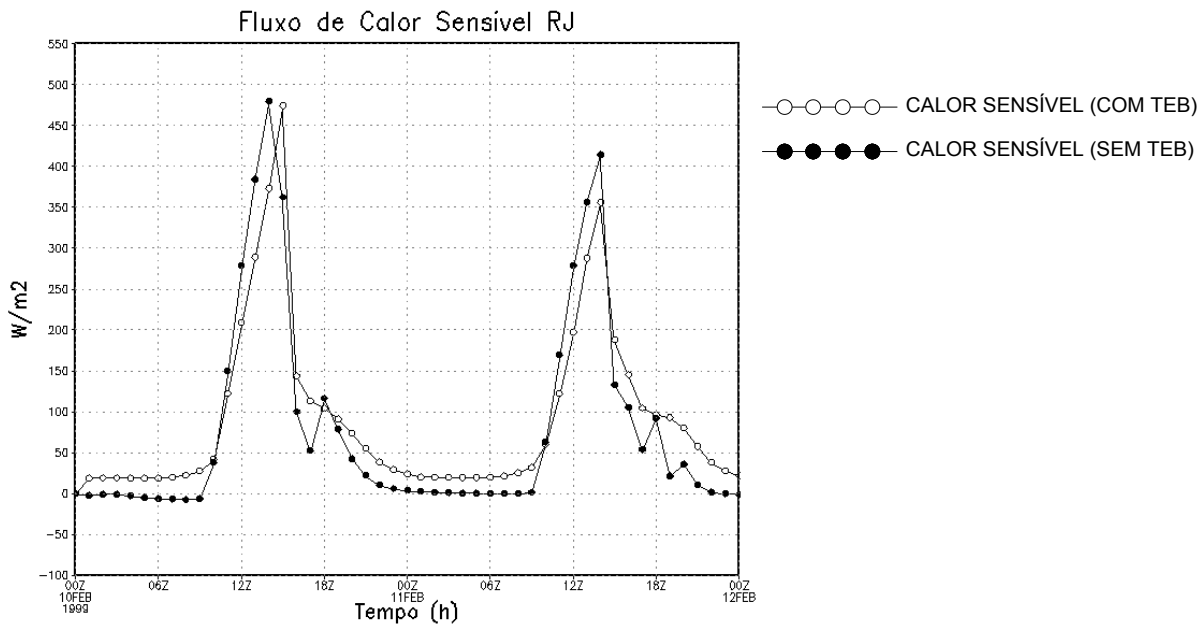


Figura 19: Fluxo de Calor Sensível para a região 2: RJ.

A Figura 20 apresenta valores para a região 3. Observa-se que há uma pequena diferença nas curvas com e sem o TEB, podendo ser consideradas praticamente com valores iguais. Os valores começam em torno de zero e aumentam a partir das 9 UTC do dia 10 de fevereiro, chegando a um pico às 16 UTC (em torno de $150,0 \text{ W.m}^{-2}$ com o TEB e $95,0 \text{ W.m}^{-2}$ sem o TEB), voltando a decrescer até às 24 UTC, quando torna a ter valores nulos. Às 9 horas do dia seguinte torna a aumentar atingindo outro pico às 15 UTC (em torno de $95,0 \text{ W.m}^{-2}$ com o TEB e $110,0 \text{ W.m}^{-2}$ sem o TEB), e então decrescendo novamente até por volta das 24 UTC.

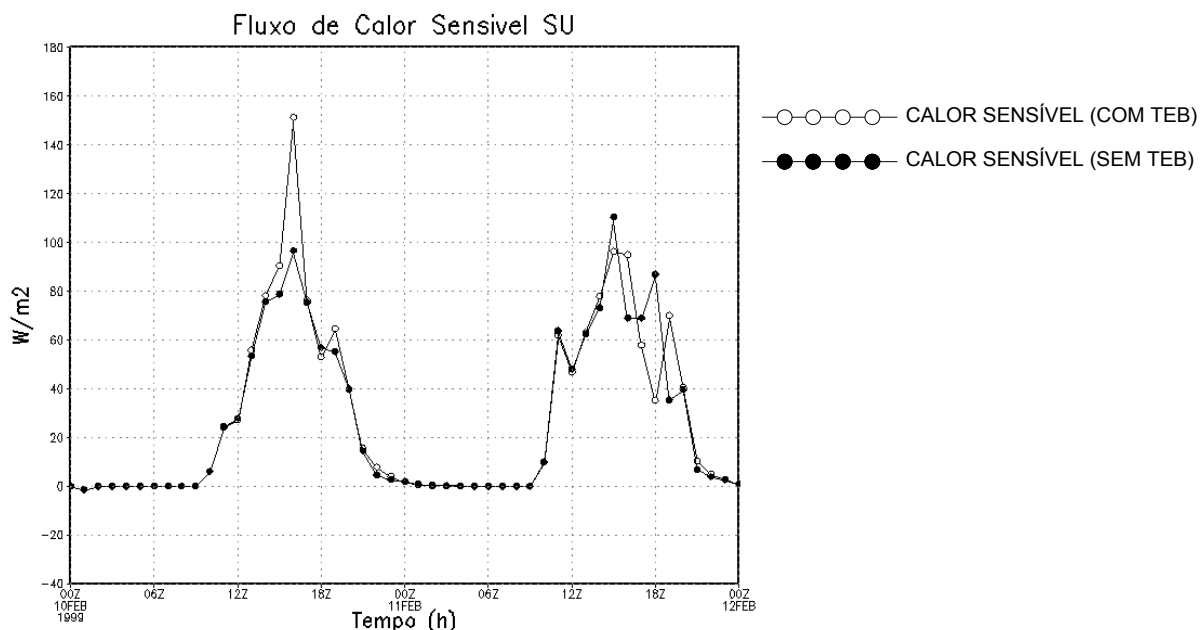


Figura 20: Fluxo de Calor Sensível para a região 3: SU.

As Figuras 21, 22 e 23 apresentam curvas para o fluxo de calor latente para as regiões de São Paulo, Rio de Janeiro e região qualquer sem urbanização (SU), respectivamente. As curvas com o TEB ativado são aquelas com círculo fechado, e as sem o TEB, com o círculo aberto.

A Figura 21, para São Paulo, mostra que o fluxo começa a aumentar às 10 UTC atingindo um máximo às 15 UTC aproximadamente (em torno de $500,0 \text{ W.m}^{-2}$ com o TEB e $720,0 \text{ W.m}^{-2}$ sem o TEB), e diminuindo a partir daí até às 24 UTC, tornando a oscilar em torno de zero. Às 9 UTC do dia 11 de fevereiro

começa a aumentar atingindo outro pico às 15 UTC para a curva sem o TEB (em torno de $600,0 \text{ W.m}^{-2}$). Para a curva com o TEB, existem 3 picos observados às 12 UTC, às 16 UTC e às 19 UTC (todos esses picos têm valores de $270,0 \text{ W.m}^{-2}$). Esses picos tornam a decrescer atingindo valores nulos próximos às 24 UTC.

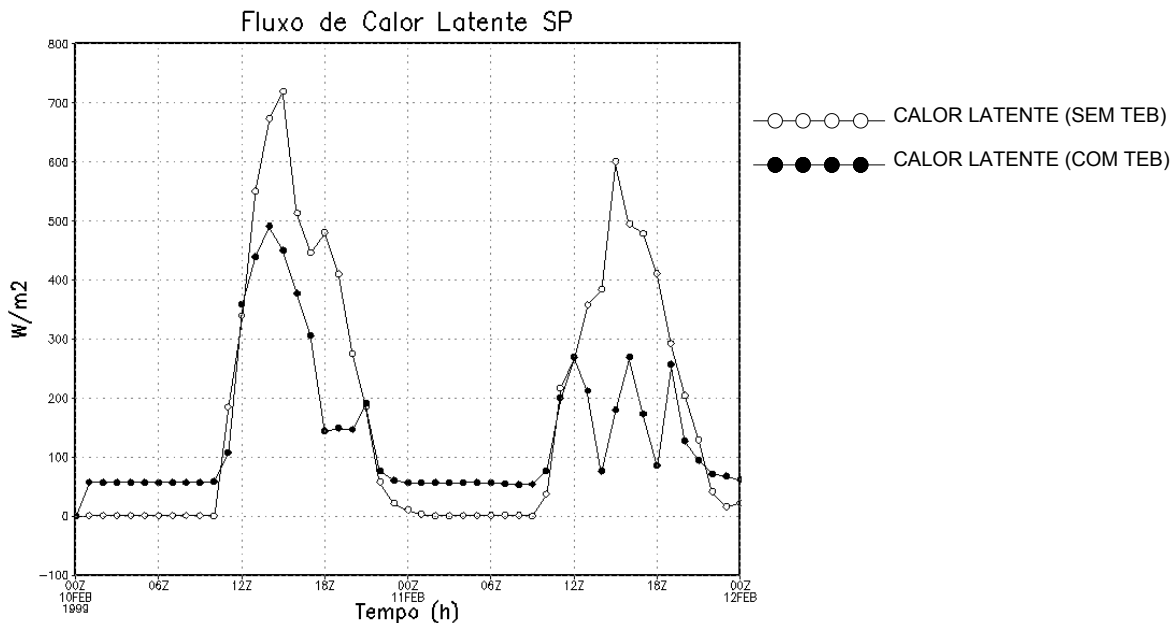


Figura 21: Fluxo de Calor Latente para a região 1: SP.

A Figura 22, para o Rio de Janeiro, apresenta valores nulos (sem o TEB) e $50,0 \text{ W.m}^{-2}$ (com o TEB), até às 14 UTC começando a aumentar atingindo um pico às 16 UTC (em torno de $400,0 \text{ W.m}^{-2}$ com o TEB e $470,0 \text{ W.m}^{-2}$ sem o TEB). O fluxo de calor latente volta a decrescer até às 24 UTC (em torno de $0,0 \text{ W.m}^{-2}$ sem o TEB e $50,0 \text{ W.m}^{-2}$ com o TEB). À partir das 9 UTC do dia seguinte torna a aumentar, chegando a um máximo por volta das 15 UTC (em torno de $540,0 \text{ W.m}^{-2}$ com o TEB e $570,0 \text{ W.m}^{-2}$ sem o TEB) e volta a decrescer até às 24 UTC. Os valores com o TEB apresentam-se inferiores nos máximos atingidos, e superiores para o restante do gráfico.

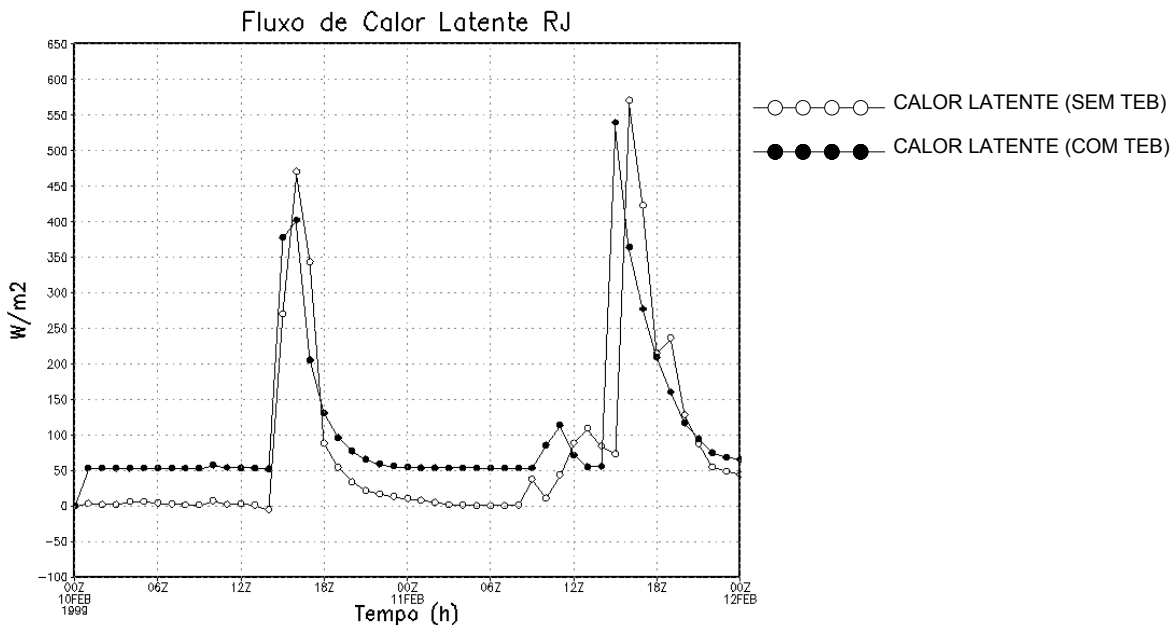


Figura 22: Fluxo de Calor Latente para a região 2: RJ.

Para a região sem urbanização (Figura 23), as curvas estão sobrepostas em praticamente todo o gráfico, tendo valores negativos durante o período noturno (da 00 UTC às 10 UTC) para o dia 10 de fevereiro, atingindo um pico por volta das 17 horas ($700,0 \text{ W.m}^{-2}$) tornando a decrescer só atingindo valores nulos às 3 UTC do dia 11 de fevereiro. Esse valor começa a aumentar às 9 horas atingindo um máximo às 16 UTC ($830,0 \text{ W.m}^{-2}$), tornando a decrescer até atingir zero novamente na madrugada do dia seguinte.

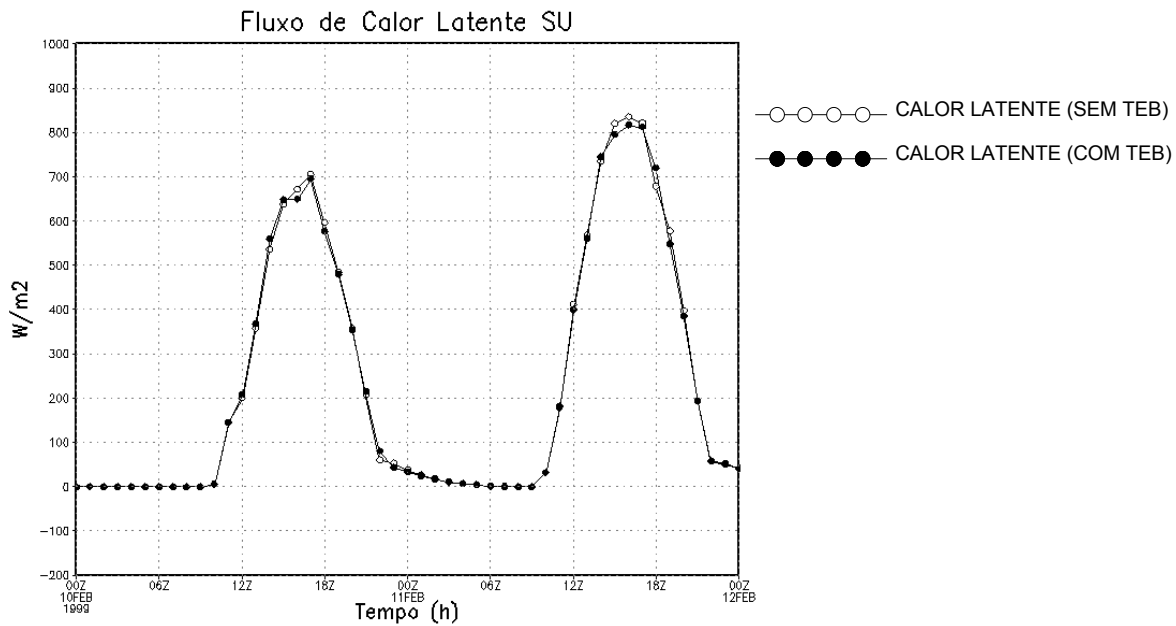


Figura 23: Fluxo de Calor Latente para a região 3: SU.

CONCLUSÕES

De acordo com as comparações feitas para o balanço de energia entre as três regiões em estudo, pode-se perceber que a modelagem feita com a ferramenta TEB ativada apresenta valores mais realistas para as regiões urbanizadas (São Paulo – SP e Rio de Janeiro – RJ). Sem o TEB a temperatura da superfície é vista de maneira uniformizada (como por exemplo, na região sem urbanização, o TEB apresenta os mesmos valores, comparado com a estimativa sem o TEB acionado).

Pode-se ver também que o impacto é diferente, dependendo a área da cidade, posicionamento em relação ao litoral, etc. Há um claro impacto sobre o balanço de radiação em superfície e sobre os fluxos de calor sensível e de calor latente. A quantidade de precipitação também é sensível à parametrização urbana.

O TEB tende a reproduzir características típicas das cidades, que são, maior temperatura durante o dia e menores valores durante a noite. Há também a tendência de deixar as grandes regiões metropolitanas mais úmidas à noite e secas durante o dia.

Assim, pode-se concluir que TEB é importante para a estimativa dos fluxos do balanço de energia, uma vez que possibilita uma maior precisão em seus valores sobre as regiões metropolitanas.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica.

BIBLIOGRAFIA

BEZERRA, P. C. **Efeito da Resolução horizontal na previsão de eventos chuvosos extremos. Dissertação de Mestrado.** (Departamento de Ciências Atmosféricas. Universidade Federal de Campina Grande. 65p. 2002.

CHEN, C.; COTTON, E.W. R. A One-dimensional simulation of the stratocumulus capped mixed layer. **Boundary-Layer Meteorology:** v.25, p.289-321, 1983.

FREITAS, E. D.; **Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes,** Tese de doutorado (Departamento de ciências atmosféricas). Universidade de São Paulo. 156p. 2003.

KUO, H. L. Further Studies of the Parametrizations of the influence of cumulus convective on large-scale flow. **Journal of the Atmospheric Sciences:** v.31, p.1232-1240, 1974.

- MELLOR, G.L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics and Space Physics**: v.20, p.851-857, 1986.
- MOLINARI, J. A general form of Kuo's cumulus parameterization. **Monthly Weather Review**. vol. 113, 1411-1416, 1985.
- MOLINARI, J.; CORSETTI, T., Incorporation of cloud-scale and mesoscale downdrafts into a cumulus parameterization: results of one – and three-dimensional integrations. **Monthly Weather Review**: v.113, p.485-501, 1985.
- NIACHOU, K.; LIVADA, I.; SANTAMOURIS, M. A study of temperature and distribution inside two urban street canyons in Athens. **International conference “Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment”**. Santorini-Grécia, 2005.
- PEREIRA, G., RUTLEDGE, S.: Diurnal cycle of shallow and deep convection for a tropical land and an ocean environment and its relationship to synoptic wind regimes. **Monthly Weather Review**, v.134, p.2688-2701, 2006.
- PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO R. L.; TREMBACK, C. J.; LYONS, W. A.; GRASSO, L. D.; NICHOLS, M. E.; MORAN, M. D.; WESLEY, D. A.; LEE, T. J.; COPELAND, J. H. A comprehensive meteorological modeling system-RAMS. **Meteorology and Atmospheric Physics**. v. 49, p.69-91, 1992.
- SOUZA, E. P. **Estudo teórico e numérico da relação entre convecção e superfícies heterogêneas na região amazônica**. Tese de doutorado (Departamento de ciências atmosféricas). Universidade de São Paulo, 121p. 1999.
- TRUSILOVA, K.; JUNG, M. Urbanization Impacts on the Climate in Europe: Numerical Experiments by the PSU-NCAR Mesoscale Model (MM5). **Journal of Applied Meteorology Climatology**. 47, 1442-1455, 2008.
- WALKO, R. L., COTTON, W.R., MEYERS, M.P., HARRINGTON, J.Y. New rams cloud microphysics parameterization. 1. The Single-Moment Scheme. **Atmospheric Research**: v.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 Sr, R., TAYLOR, C., TAGUE, C., TREMBACK, C.J., VIDALE, P.L. Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. **Journal of Applied meteorology**. v. 39, p. 931-944, 2000.
- ZHANG, H.; et al. Modified RAMS-Urban Canopy Model for Heat Island Simulation in Chongqing, China. **American Meteorological Society**. 509-523, 2008.