

Ilhas de calor e eventos de precipitação na região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ)

Andrews José de Lucena

Geógrafo; Doutorando em Engenharia Ambiental (Ciências Atmosféricas em Engenharia) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) / Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – lucenageo@yahoo.com.br

Eduardo Barbosa Corrêa

Meteorologista; Doutorando em Engenharia Civil - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) / Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - ebcorrea@gmail.com

Otto Corrêa Rotunno Filho

Engenheiro Civil; Professor do Programa de Engenharia Civil - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) / Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - otto@coc.ufrj.br

Leonardo de Faria Peres

Meteorologista; Professor adjunto do Departamento de Meteorologia – Instituto de Geociências (IGEO) / Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza (CCMN) / Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - leonardo.peres@igeo.ufrj.br

José Ricardo de Almeida França

Meteorologista; Professor Associado III - Departamento de Meteorologia Instituto de Geociências (IGEO) / Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza (CCMN) / Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - jricardo@lma.ufrj.br

Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva

Meteorologista; Professora do Departamento de Meteorologia – Instituto de Geociências (IGEO) / Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza (CCMN) / Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - justi.meteoro@gmail.com

Abstract

Heat islands are a phenomenon of urban areas where the air temperature and surface temperature are much hotter than the surrounding environment, characterized as a serious environmental problem. These cores with higher temperatures are due to significant changes in energy and water budget for the city and they are still responsible for generating and aggravating situations of thermal discomfort and of extreme rainfall events and disasters. This paper aims to map the heat islands in the metropolitan region of Rio de Janeiro (RMRJ) and to present the corresponding relationship with rainfall events. Remote sensing imagery data, meteorological modeling and synoptic maps are used. In addition, algorithms for conversion of brightness temperature on surface temperature and spatial techniques to correlate heat islands to rainfall are adopted. The results allow to identify that the hottest areas of urban regions favour the increase of urban precipitation.

Palavras-chave: ilhas de calor; sensoriamento remoto; modelagem atmosférica.

Introdução

As áreas urbanas estão sujeitas a uma série de problemas ambientais, estimulando a proposição de abordagens com enfoque em novas soluções para esses grandes desafios. A ilha de calor representa um dos problemas mais graves de mudanças climáticas em escala local, merecendo maior atenção dos pesquisadores e autoridades para aprimorar o monitoramento e estabelecer medidas de mitigação, haja vista sua suposta elevada pegada ecológica (Santamouris *et al.*, 2007). O sensoriamento remoto em conjunto com a modelagem atmosférica oferece avanços quanto ao conhecimento do fenômeno que se convencionou denominar ilha de calor, contribuindo para o aperfeiçoamento da observação e do monitoramento, para a sua delimitação espacial e para as medidas de mitigação.

As ilhas de calor são definidas como as áreas mais aquecidas da cidade em razão das profundas alterações nos atributos naturais originais, como na cobertura e uso do solo, na forma e geometria e nos constituintes atmosféricos. Como implicações, mudanças significativas ocorrem no balanço de energia, na estocagem e na liberação de calor e na turbulência e na dispersão atmosférica (Oke, 1988; Arnfield, 2003). Pesquisadores de várias partes do mundo, tanto das regiões temperadas quanto das regiões tropicais, têm se dedicado ao estudo das ilhas de calor, buscando conhecer melhor as causas e conseqüências do fenômeno (Roth, 2007).

O uso de dados de sensoriamento remoto constitui-se em uma atividade cientificamente fundamentada e robusta para a avaliação das ilhas de calor urbana (Gallo *et al.*, 1999) e, portanto, relevante nos estudos de clima urbano a partir do uso das bandas termais de diversos sensores, contando com informações disponibilizadas historicamente desde o satélite TIROS, passando pelo NOAA-AVHRR,

LANDSAT, MODIS até mais recentemente o ASTER, entre outros. A modelagem atmosférica, muitas vezes acoplada aos ambientes urbanos (Yoshikado, 1994) e em sintonia com o sensoriamento remoto, é fundamental para os estudos em clima urbano (Freitas e Silva Dias, 2005). As simulações contribuem para o entendimento da atmosfera em seus níveis mais inferiores, nas camadas mais próximas à superfície, apresentando, como resultado, por exemplo, os fluxos de calor intra-urbano. Os modelos em meso-escala mostram habilidade em reproduzir o fenômeno da ilha de calor urbana e seus efeitos correlatos, que simulam sua intensidade, sua estrutura espacial e dinâmica temporal.

Inúmeros trabalhos têm recorrido ao sensoriamento remoto e à modelagem atmosférica, seja em conjunto ou separados, para analisar a ilha de calor urbana. Rao (1972) promoveu os primeiros trabalhos utilizando bandas termais do sensor TIROS para examinar a ilha de calor de superfície das cidades da costa leste do médio Atlântico nos EUA. Voogt e Oke (2003) sumarizam as principais aplicações do sensoriamento remoto para os estudos de clima urbano, mais precisamente da ilha de calor: as diferenças de aquecimento e resfriamento entre o rural e o urbano; modelo de balanço de energia para áreas urbanas; avaliação detalhada das relações da temperatura da superfície e do ar para diferentes tipos de superfícies urbanas; distribuição espacial da temperatura de superfície de áreas pavimentadas e áreas vegetadas.

A modelagem atmosférica de mesoescala também tem permitido a realização de simulações para a ilha de calor urbana, com destaque para o MM5. Lin *et al.* (2010) analisaram o impacto da urbanização sobre o ciclo diurno da região sul da China. Os resultados das simulações com o MM5 mostram que a urbanização ampliada nos últimos anos induziu ao aumento do ciclo diurno médio da temperatura da superfície espacialmente, assim como do fluxo de calor sensível e da camada limite planetária, e levou à diminuição, por outro lado, da umidade relativa do ar, do vapor de água e do fluxo de calor latente. O exercício de simulação conduzido mostra também que a intensidade da ilha de calor urbano (ICU) é cerca de 0,4°C maior no período noturno e atinge valores superiores em cerca de 1,3 °C durante o dia, após a expansão urbana.

Kinouchi and Yoshitani (2001) aplicaram o MM5 para quantificar os impactos do aumento do calor antropogênico, da vegetação e da reabilitação de águas superficiais na área central de Tóquio. Com o aumento do calor antropogênico, a temperatura é, de forma geral, intensificada durante a noite; com o aumento da cobertura vegetal, a temperatura máxima do ar e da superfície sofrem redução de 0,1 °C e 0,6 °C, respectivamente; ao dobrar a área de superfície da água, a redução máxima na temperatura do ar é estimada em 0,5 °C.

Para a região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), Moraes *et al.* (2005) analisam a influência de sistemas sinóticos e características locais da RMRJ na formação e dissipação da ilha de calor urbana, a partir de simulações com MM5. Foi identificado que o máximo de temperatura coincide com a ocupação urbana da RMRJ, sobretudo em sua parte norte, o que indica a formação de ilha de calor urbana. Os autores concluem que simulações numéricas da atmosfera, interpretadas em conjunto com suas respectivas condições sinóticas, oferecem uma significativa capacidade de prognóstico da ilha de calor urbana.

Muitos estudos têm mostrado que as áreas urbanas são sujeitas a maiores ocorrências de chuvas, tendo, como pioneiros, os trabalhos de Changnon (1968) e Holtzman and Thom (1970) para La Porte e Chicago. Dettwiller and Changnon (1976) analisam os possíveis efeitos urbanos no incremento diário de chuva para três grandes cidades em diferentes climas, a saber: Paris, St. Louis e Chicago. Nessas três cidades, foi verificado um aumento entre 19 e 39% no total de chuvas, com efeito bem mais pronunciado nas cidades mais quentes, e também em função de efeitos locais urbanos que favorecem a convecção.

Os estudos iniciais realizados pelo METROMEX (Experimentos em Meteorologia Metropolitana) para cidades americanas confirmam que os efeitos urbanos incrementam a precipitação convectiva entre 5 e 25%. Estudos realizados após o uso do METROMEX têm confirmado essa tendência para outras regiões, como Tóquio, México e Atlanta (Kanda, 2006). Recentes investigações sugerem que a ilha de calor urbana favorece o surgimento de nuvens baixas (Inoue and Kimura, 2004). Outros estudos com o uso de modelos têm observado um incremento da convecção e precipitação associada à urbanização (Rozoff *et al.*, 2003).

Dixon and Mote (2003) discutem o aumento de tempestades em Atlanta causado pela ilha de calor urbana. A umidade mais próxima à superfície parece ser o fator mais importante para a precipitação induzida pela ilha de calor urbana. Os eventos de chuva tendem a ocorrer em condições atmosféricas mais instáveis do que aqueles em dias de chuva-livre, mas não instável o suficiente para produzir convecção generalizada.

Kanda (2006) enumera as três possíveis causas da indução das chuvas urbanas: a rugosidade da superfície, a adição do fluxo de calor sensível e o incremento de aerossóis antrópicos, como os poluentes. Entretanto, o autor chama atenção para estudos que têm refutado os efeitos urbanos na precipitação (Kanae *et al.*, 2004) e que maiores observações e pesquisas em modelagem são necessárias antes de considerar o efeito urbano na precipitação como um fato conclusivo (Dabberdt *et al.*, 2000).

A partir desse breve histórico referencial, este trabalho tem como objetivo analisar o campo térmico na RMRJ a partir da temperatura da superfície estimada pelo satélite Landsat e a simulada pelo modelo de mesoescala MM5, evidenciando relações entre o aumento da temperatura urbana e potenciais indicadores de chuva urbana. Somam-se a essa análise outros resultados do modelo, como o calor latente e sensível, a advecção de temperatura, o vento e a altura da camada limite que possam favorecer a indução das chuvas.

Metodologia

A área de estudo, que abrange a região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), está representada na Figura 1. Localizada na região sudeste do Brasil e beirando a costa leste do oceano Atlântico, a região é marcada por uma morfologia bastante irregular composta pelos domínios de baixada, ao nível do mar, até os maciços costeiros e serras, com elevações acima de 1500 metros (Figura 2), configurando um sistema físico complexo. À margem oeste da baía de Guanabara, localizada no centro do mapa, desenvolveu-se a ocupação urbana que se expandiu por toda a RMRJ nos sentidos sul, leste, oeste e noroeste, consolidando a classe urbana nas áreas de baixada costeira, como a baixada da Guanabara. Por outro lado, uma classe rural ou urbana de baixa densidade é identificada nas franjas urbanas do extremo norte, leste e oeste, ainda em fase de consolidação de sua urbanização, enquanto as áreas mais vegetadas encontram-se nos maciços e serras ou mistura-se com a classe rural ou urbana de baixa densidade (Figura 3).

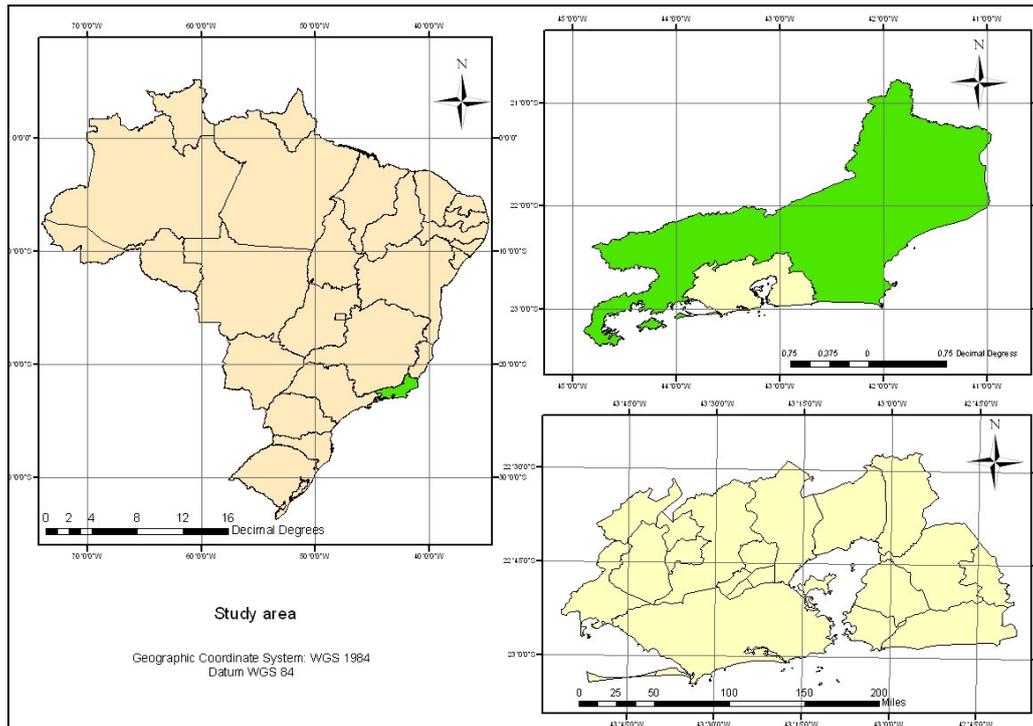


Figura 1: Mapa do Brasil (acima e à esquerda), do estado do Rio de Janeiro (acima e à direita) e da região metropolitana do Rio de Janeiro - RMRJ (abaixo e à direita)

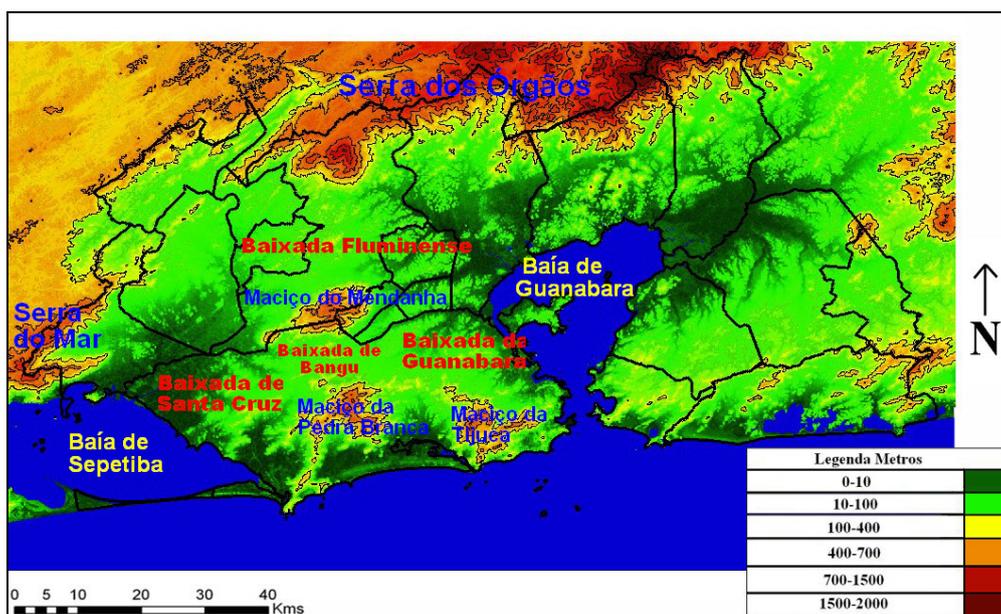


Figura 2: Mapa do relevo da RMRJ

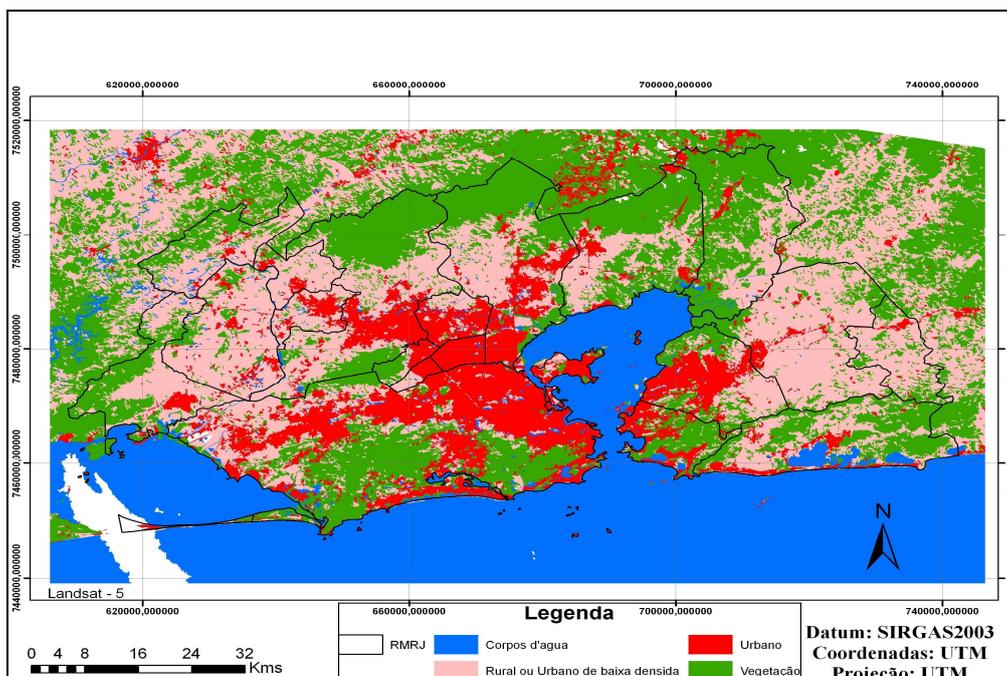


Figura 3: Classes do uso do solo na RMRJ

Duas imagens do sensor Landsat5-TM foram selecionadas para análise (Tabela 1), sendo uma de verão (15/02/2010) e outra de inverno (26/08/2010), no intuito de observar o campo térmico da ilha de calor urbana em situações sazonais distintas. Como critérios empregaram-se imagens com ausência ou baixa nebulosidade.

Tabela 1 - Características das imagens para a RMRJ

Características	LANDSAT-5 (2010)	LANDSAT-5 (2010)
Sensor	TM	TM
Data de Aquisição	15/02/2010	26/08/2010
Horário (Brasília)	9h42min	9h42min
Órbita/Ponto	217/76	217/76
Cobertura de Nuvens	10%	20%
Bandas Espectrais	7	7
Resolução Espacial	1, 2, 3, 4, 5, 7 (30 metros); 6(120)	1, 2, 3, 4, 5, 7 (30 metros); 6(120)
Projeção	UTM, Zona 23S	UTM, Zona 23S
Datum	WGS-84	WGS-84

A partir da banda termal do Landsat (banda 6 com intervalo espectral entre 10,2 e 12,4 μm), foi calculada a temperatura da superfície continental (TSC). O cálculo da temperatura da superfície passa pelas seguintes etapas: 1) transformação dos dados brutos, originalmente em números digitais (ND), para radiância; 2) cálculo da temperatura de brilho através da inversão da função de Planck; 3) cálculo da transmitância atmosférica a partir de dados de temperatura e umidade relativa do ar e 4) estimativa da emissividade da superfície. Maiores detalhes sobre a operacionalização com os cálculos e descrição das equações podem ser obtidos em Lucena et al. (2010a e b).

Nas simulações desenvolvidas com o modelo MM5 (Grell et al 1995), foram utilizados três domínios aninhados, centralizados sobre a RMRJ com resoluções horizontais de 27 km, 9 km e 3 km, respectivamente. Todos os domínios utilizaram topografia e uso do solo originados do *United States Geological Survey* (USGS) com resolução espacial de 1 km. As simulações abrangeram os mesmos recortes espaciais da imagem Landsat. Os campos de temperatura da superfície, calor latente, calor sensível, advecção de temperatura, umidade relativa do ar, direção e intensidade do vento e altura da camada limite foram extraídos do domínio de maior resolução, ou seja, 3 km (Figura 4).

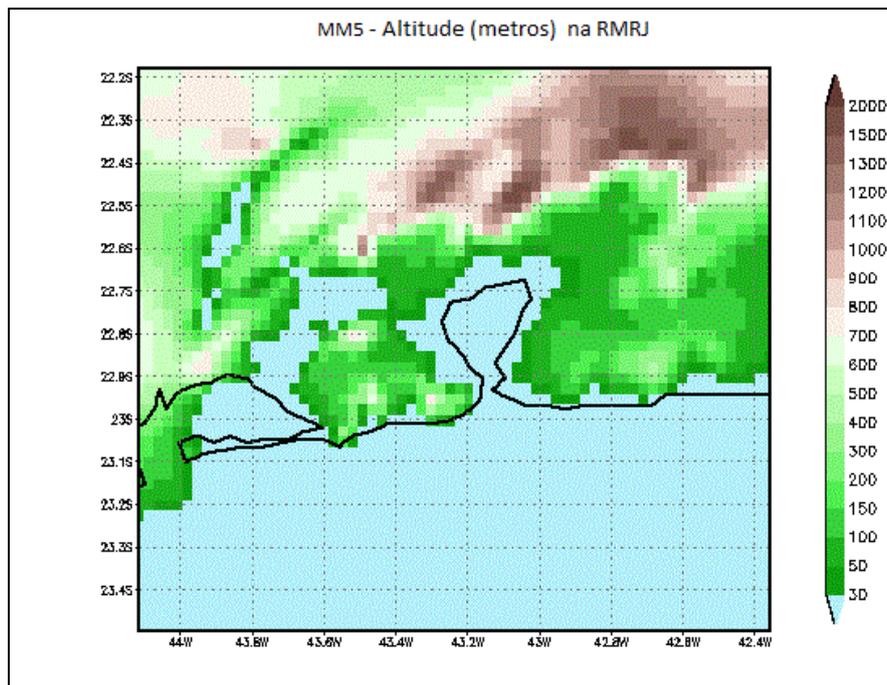


Figura 4: Domínio 3 do modelo MM5 para a RMRJ

O modelo foi inicializado com dados meteorológicos do modelo global GFS (Global Forecast System model) do National Center for Environmental Prediction (NCEP) com resolução espacial de $0,5^\circ$ (~55 km) e resolução temporal de 3 horas. Esses dados abrangeram o período integral de cada simulação.

Dados de temperatura do ar de cinco estações meteorológicas (Copacabana, Vila Militar, Marambaia, Jacarepaguá e Xerém) foram utilizados para comparar com a temperatura da superfície do Landsat e do modelo, buscando a validação do modelo e do comportamento da temperatura no espaço geográfico.

A temperatura do ar obtida nas estações meteorológicas, obedece ao padrão da Organização Meteorológica Mundial (OMM), isto é, a temperatura a 1,5m do solo. Quanto à temperatura estimada pelo sensor Landsat e a simulada pelo modelo, correspondem à temperatura de contato com o solo, isto é, no nível do solo.

Imagens GOES de vapor de água e cartas sinóticas de superfície para o horário das 9h30m (ou 9h45m) e 9h, respectivamente, sempre obedecendo ao horário de Brasília, e que se aproximam do horário das imagens Landsat (9h42m) e das simulações do MM5 (9h), foram obtidas para realizar uma análise integrada dos aspectos atmosféricos dominantes aos resultados gerados.

Resultados e discussões

As condições atmosféricas do dia 15/02/2010 podem ser visualizadas nas Figuras 5 e 6. Na carta sinótica de superfície das 9h, a costa do Rio de Janeiro está entre duas isóbaras, uma de 1012 e outra de 1016 mb, proporcionando tempo bom, sem nuvens e com ventos leves de nordeste. A imagem GOES de vapor de água das 9h30m confirma o estado atmosférico da carta sinótica de superfície, isto é, atmosfera limpa sem nebulosidade. Essas características atmosféricas contribuem para a entrada de radiação, que livre de nebulosidade, favorece o maior aquecimento, combustível para formação da ilha de calor urbana.

A imagem termal de 15/02/2010 apresenta uma grande área avermelhada com temperaturas acima de 30°C por praticamente toda região metropolitana. Núcleos na cor vermelha mais escura com temperatura superior a 33°C , estão localizados na parte mais central da imagem e se alonga em filetes em direção a oeste e ao leste (Figura 7). A imagem de temperatura do MM5 para as 9h define uma extensa área em tom alaranjado por toda região metropolitana, com valores entre 28 e 30°C . Valores mais elevados, acima de 30°C , visualizados por manchas em cor laranja mais escuro, representam a ilha de calor simulada pelo modelo, estando situadas em locais bem específicos, a nordeste e na seção central da imagem (Figura 8).

A Figura 9 compara a temperatura em superfície entre o modelo, a imagem Landsat e as estações meteorológicas convencionais. Três locais foram selecionados, com disponibilidade de dados para a data (Copacabana, Vila Militar e Marambaia). A imagem Landsat apresenta as temperaturas mais elevadas, seguida pelo modelo e depois pelas estações. Os resultados obtidos confirmam comportamento previamente esperado, justamente porque as duas primeiras metodologias estimam a temperatura de superfície, enquanto a estação meteorológica convencional registra a temperatura a 1,5m da superfície. Dos

três locais, é encontrada, em Marambaia, a temperatura mais baixa. Quanto às outras duas localidades, a Vila Militar é a que apresenta temperatura mais elevada na resposta do modelo e no registro da estação meteorológica, enquanto Copacabana mostra-se como a mais quente segundo a estimativa gerada pelo Landsat.

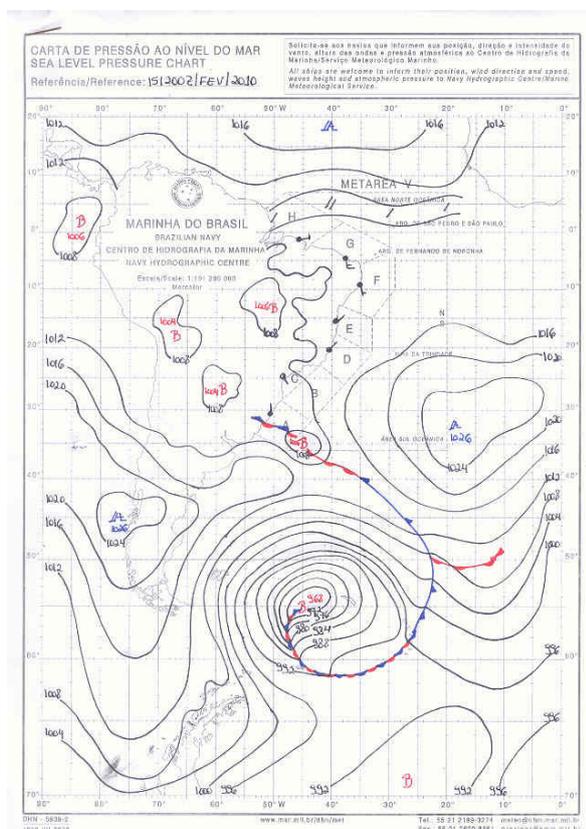


Figura 5: Carta sinótica de superfície às 9h para a América do Sul em 15/02/2010.

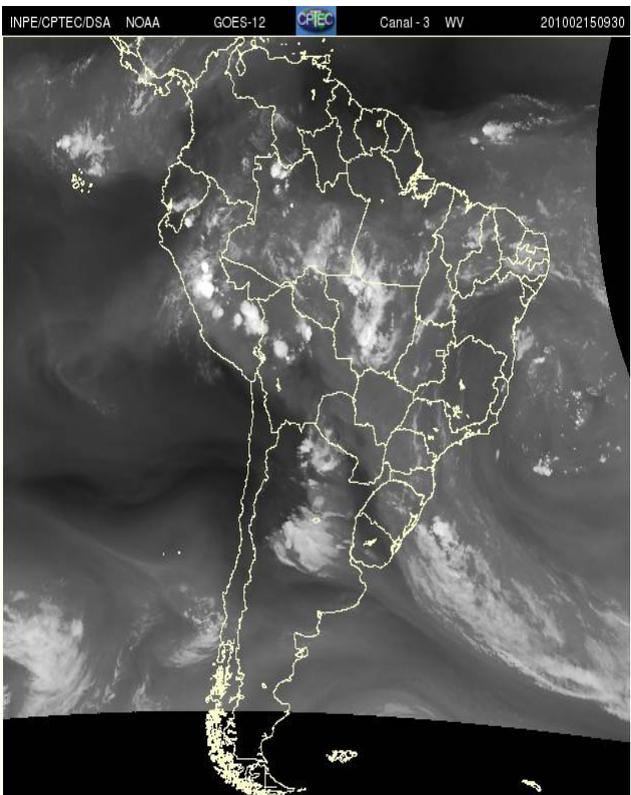


Figura 6: Imagem de satélite GOES (vapor de água) às 9h30m para a América do Sul em 15/02/2010

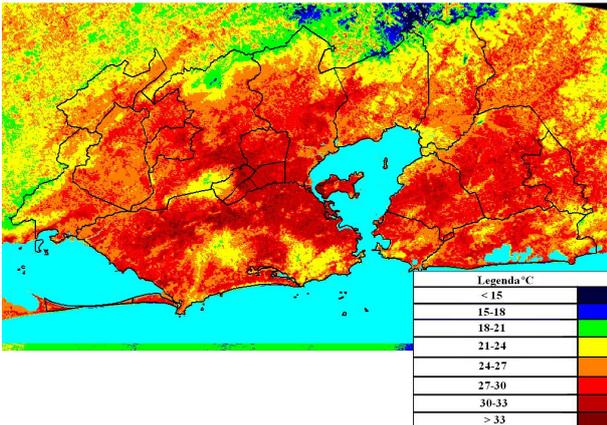


Figura 7: Temperatura da superfície para a RMRJ em 15/02/2010 às 9h42m obtida pelo Landsat-5.

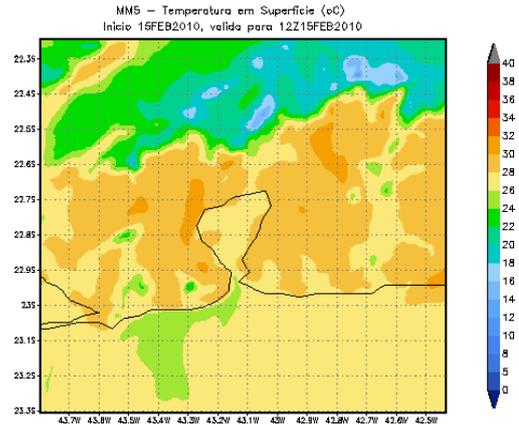


Figura 8: Temperatura da superfície para a RMRJ em 15/02/2010 às 9h obtida pelo MM5.

Para os outros resultados do modelo, em toda a região metropolitana, os menores valores de calor latente encontram-se na área mais urbanizada, que mostraram temperaturas da superfície mais elevadas. Em contrapartida, o calor sensível apresentou um comportamento oposto, com seus valores mais elevados concentrados nas áreas mais aquecidas, embora, na porção norte da RMRJ, verifiquem-se valores semelhantes (Figuras 10 e 11). A advecção de temperatura é pouco significativa, oscilando positivamente em torno de 0,01°C (Figura 12), que se explica pelo horário da manhã (9h) de baixo aquecimento. Ainda assim, esse baixo valor sobressai um pouco mais na área de maiores valores da temperatura da superfície.

Para a umidade relativa (Figura 13), ocorre muito pouca ou nenhuma variação na área que cobre a RMRJ. Apenas no extremo norte, onde há extrapolação dos limites da RMRJ, são identificados núcleos vermelhos bem próximos da saturação, isto é, 100%.

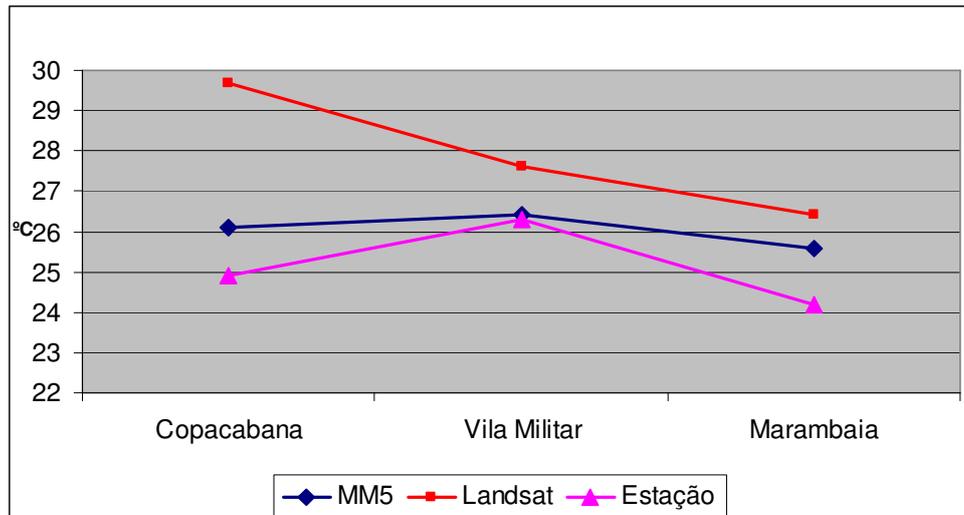


Figura 9: Temperatura obtida pelo Landsat, pelo MM5 e pela estação meteorológica para três localidades da RMRJ em 15/02/2010

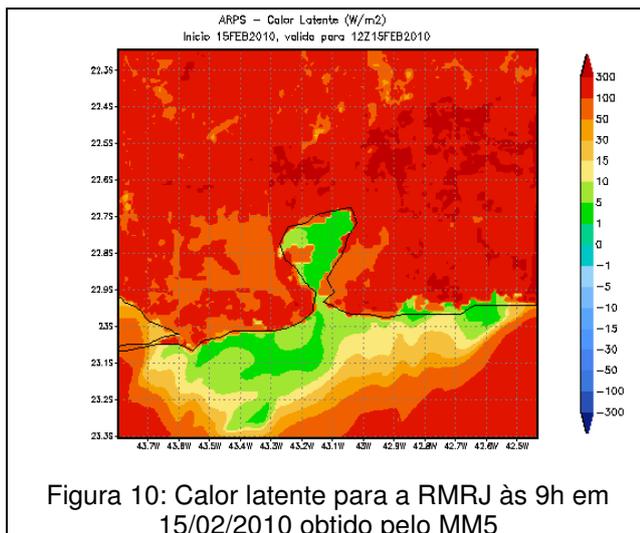


Figura 10: Calor latente para a RMRJ às 9h em 15/02/2010 obtido pelo MM5

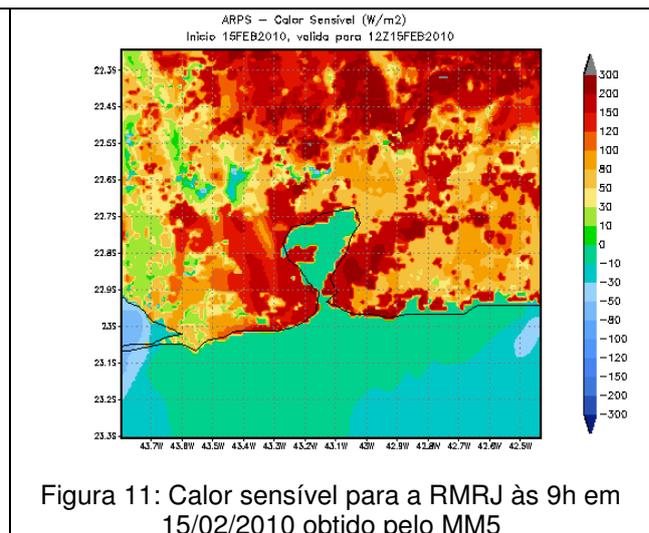


Figura 11: Calor sensível para a RMRJ às 9h em 15/02/2010 obtido pelo MM5

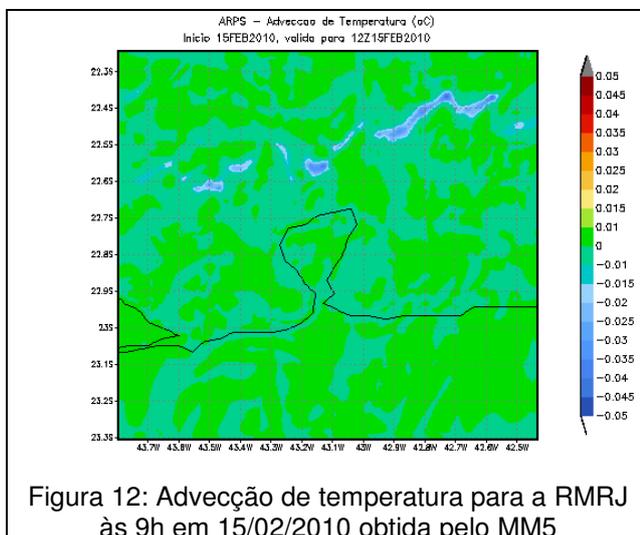


Figura 12: Advecção de temperatura para a RMRJ às 9h em 15/02/2010 obtida pelo MM5

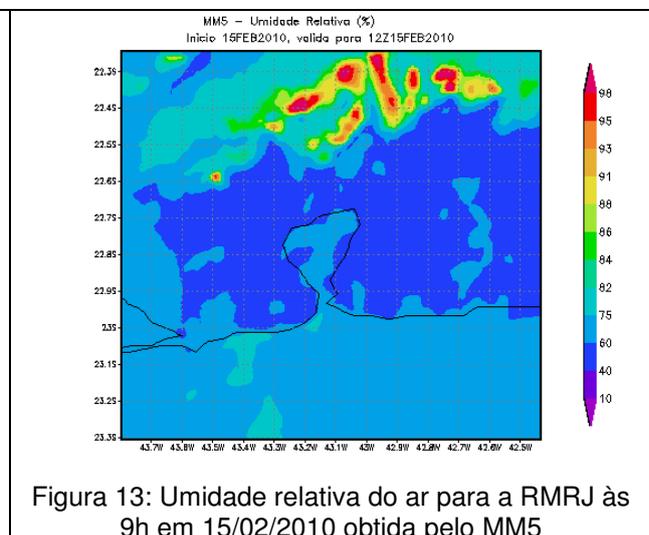
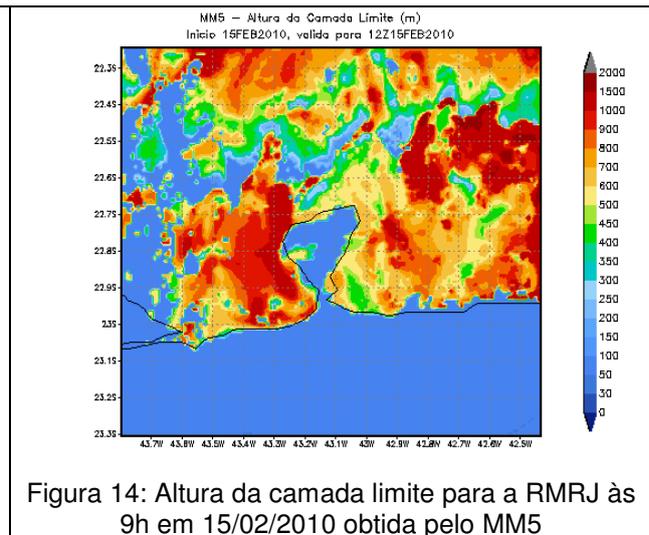
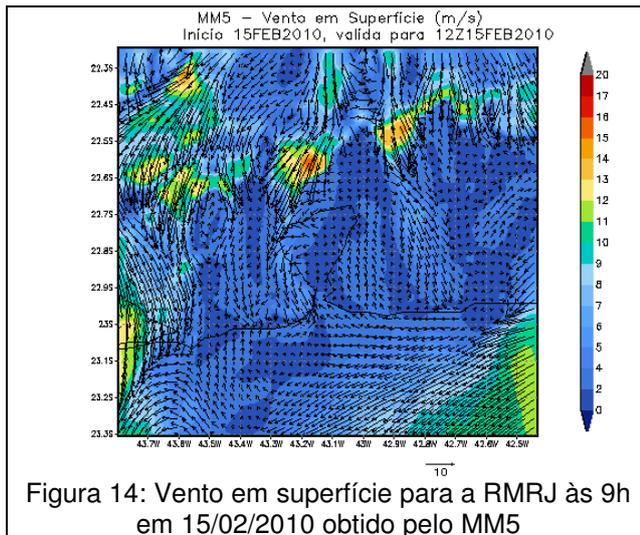


Figura 13: Umidade relativa do ar para a RMRJ às 9h em 15/02/2010 obtida pelo MM5

O vento tomou diversas direções e intensidades, mostrando a complexidade geográfica da RMRJ (Figura 14). A intensidade do vento, em grande parte da região, é fraca, não ultrapassando 10 m/s, com exceção da porção norte, já fora da área que compõe a RMRJ, com intensidade superior a 13 m/s. A brisa marítima influencia grande parte do litoral da RMRJ, mas ventos de montanha, mais intensos, provenientes dos maciços costeiros e das serras ao norte varrem a parte mais interiorana da RMRJ. Nota-se, também, que, no extremo oeste, a brisa marítima choca-se com uma suposta brisa continental, com ventos relativamente mais intensos, próximo a 10 m/s, que pode ser uma ação mais efetiva da serra, bem rente ao mar, nesta localidade, e que influenciou com temperaturas um pouco mais elevadas nessa faixa do litoral.

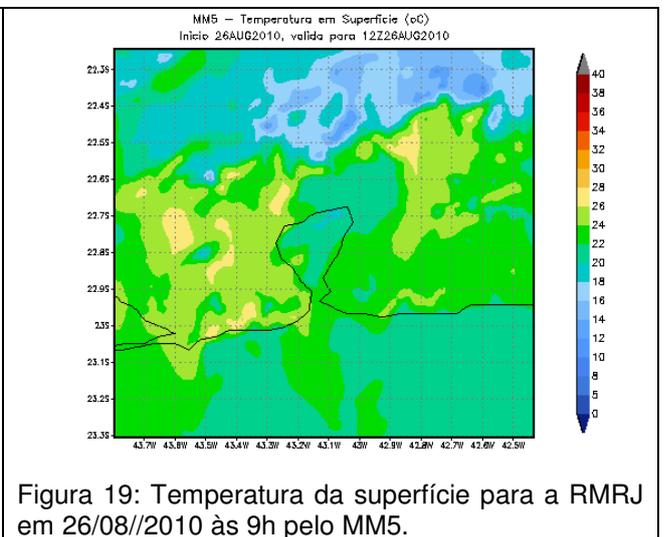
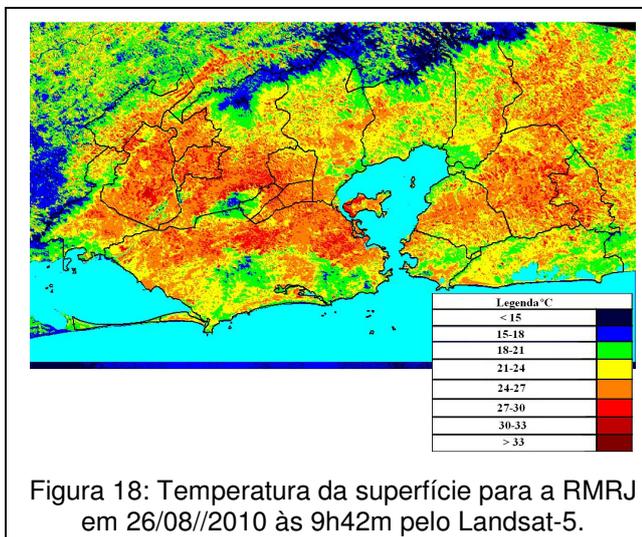
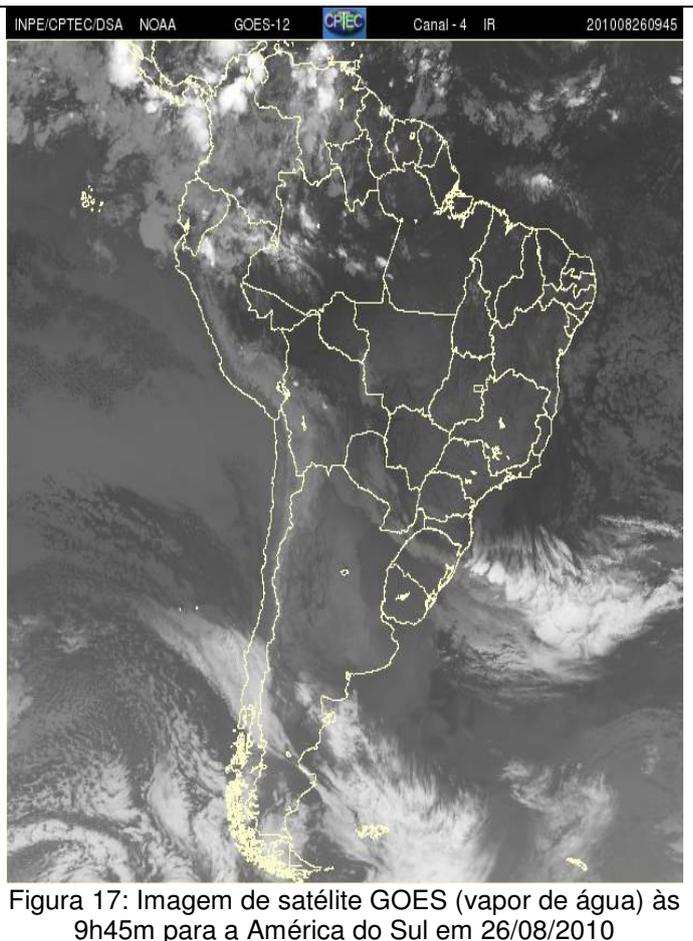
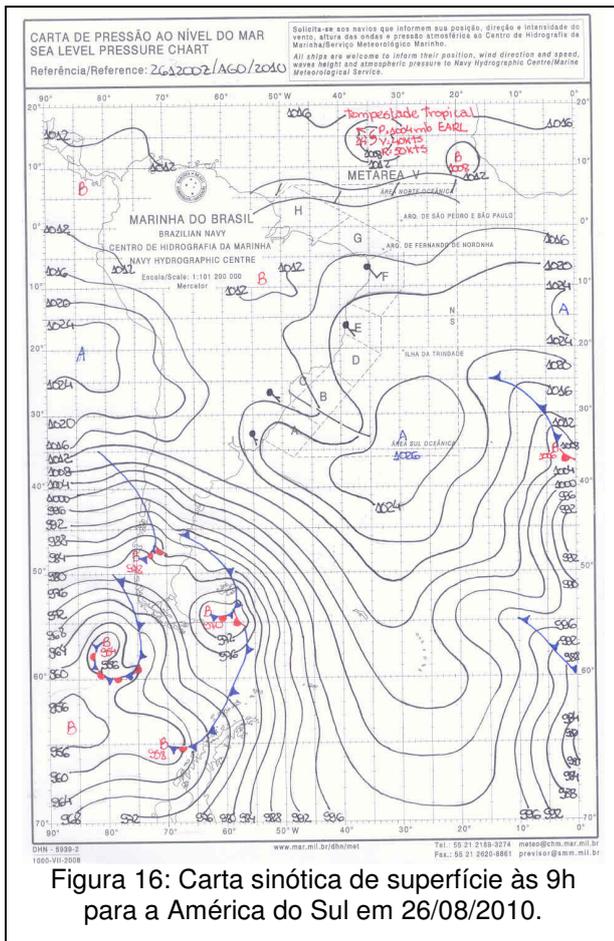
Finalmente, quanto à simulação da altura da camada limite, a Figura 15 mostra três grandes manchas vermelhas com altura máxima, próximas a 2 km, localizadas na borda oeste e leste da baía, e bem a norte. Justamente a oeste e a leste da baía concentram-se as áreas mais quentes de toda a região, simuladas pelo modelo e estimadas pela imagem termal do Landsat.



Para o dia 26/08/2010, episódio de inverno, o estado do Rio de Janeiro está situado entre uma isóbara de 1016 e 1020 mb no horário das 9h (Figura 16). A imagem de satélite GOES de vapor de água para o horário das 9h45m (Figura 17) concorda com a carta sinótica de superfície, não mostrando qualquer presença de nebulosidade na costa do estado do Rio de Janeiro.

A temperatura da superfície estimada pelo Landsat é bem mais heterogênea que no episódio de verão, isto é, os núcleos mais elevados da ilha de calor estão mais espalhados por toda região metropolitana, contudo valores semelhantes de temperatura encontradas no verão são identificados nesse episódio de inverno (Figura 18). As temperaturas mais elevadas, acima de 30°C, estão situadas na parte centro-oeste e leste da baía. Os núcleos mais quentes da temperatura da superfície, com destaque para a mancha verde e amarelo com valores entre 24 e 28°C, simulados pelo modelo, obedecem a distribuição geográfica da imagem termal do Landsat (Figura 19). Essas áreas têm maior expressão espacial no setor centro-oeste da baía, mas também são bem identificadas a nordeste pelo modelo.

Uma comparação entre temperaturas também foi efetuada e foi notável a maior heterogeneidade espacial da temperatura, observando temperaturas acima dos 30°C e abaixo dos 15°C (Figura 20). Duas estações foram inseridas nessa comparação, mais especificamente Jacarepaguá e Xerém, não presentes na comparação de verão, o que também contribuiu para a maior heterogeneidade espacial. O comportamento entre os dados foi semelhante ao verão, ou seja, as temperaturas da imagem termal do Landsat são as mais elevadas, seguidas pelos dados do modelo e, em seqüência, pelas estações meteorológicas. Dos três locais mantidos, Copacabana, Vila Militar e Marambaia, este último mantém-se com a temperatura mais baixa para a resposta do modelo e da estimativa do Landsat. A temperatura mais elevada desloca-se de Copacabana para a Vila Militar na imagem Landsat; situação inversa ocorre para a simulação do modelo e para a estação meteorológica, quando a temperatura mais elevada desloca-se da Vila Militar para Marambaia. Na Vila Militar, está localizada a temperatura mais baixa, tanto para a resposta do modelo, quanto para o registro na estação meteorológica.



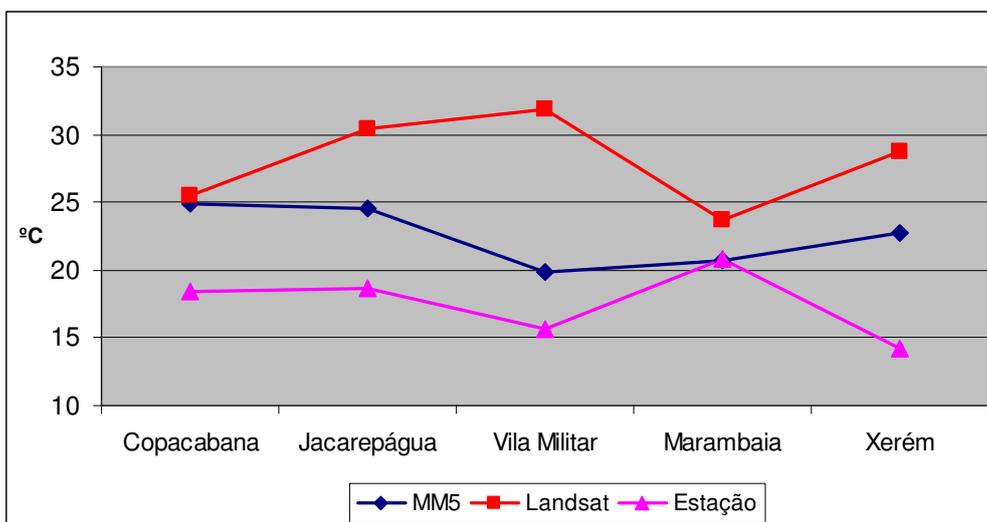


Figura 20: Comparação das temperaturas para três localidades da RMRJ obtidas pelo Landsat, pelo MM5 e pela estação meteorológica em 26/08/2010

Quanto às outras saídas do modelo, o mapa de calor latente (Figura 21) mostra que os valores mais baixos situam-se na área em que comumente têm sido verificadas as temperaturas mais elevadas, isto é, nas porções leste e oeste da baía, sendo, a oeste, uma mancha bem mais extensa. Os valores mais elevados, por outro lado, estão concentrados na porção norte e extremo leste e nos maciços costeiros situados a oeste. Em contrapartida, para o calor sensível (Figura 22), os valores mais elevados circundam a orla da baía, como também são visualizados no extremo oeste da região, além da elevada concentração no extremo norte.

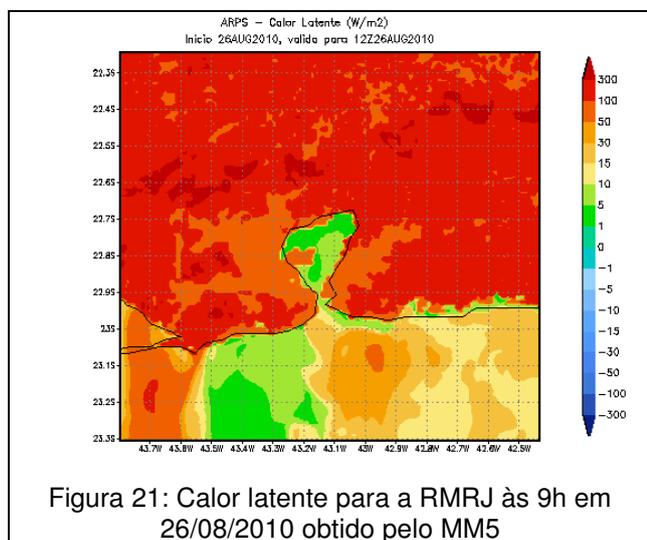


Figura 21: Calor latente para a RMRJ às 9h em 26/08/2010 obtido pelo MM5

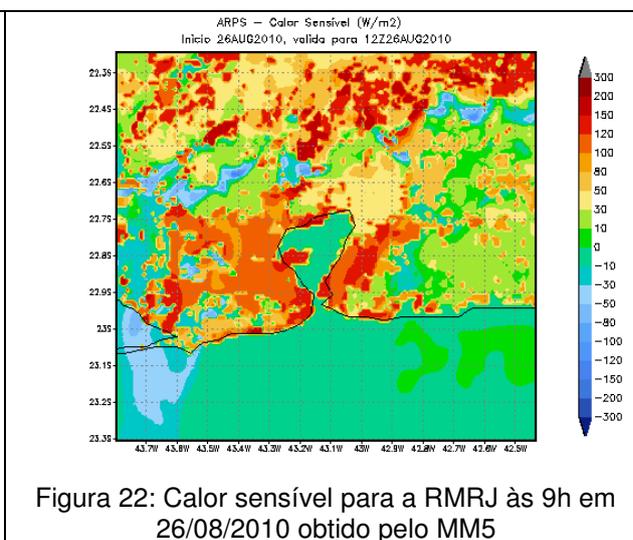


Figura 22: Calor sensível para a RMRJ às 9h em 26/08/2010 obtido pelo MM5

Assim como no verão, a advecção de temperatura mostrou-se insignificante com os mesmos 0,01°C, em média, para grande parte da região metropolitana (Figura 23), apresentando apenas um enclave, de valor negativo, em sua porção mais a oeste, o que caracteriza a situação de inverno com temperaturas mais brandas. A umidade relativa (Figura 24) apresentou o mesmo padrão verificado no verão, de homogeneidade. Os valores mais elevados também estiveram localizados no extremo norte, mas seus valores não alcançaram o ponto de saturação, como no verão, e nem mesmo alcançou 90% de umidade relativa.

O campo de vento (Figura 25) é bastante similar ao encontrado no verão, tanto na intensidade quanto na direção: brisa marítima varrendo o litoral e ventos de montanha, com maior intensidade, atuando mais no interior da RMRJ. No extremo oeste do litoral, assim como no verão, a brisa marítima compete com uma suposta brisa continental e que no inverno tem sua amplitude espacial alongada, chegando a atuar mais próximo da parte central litorânea e com intensidade do vento mais elevada, entre 10 e 12 m/s.

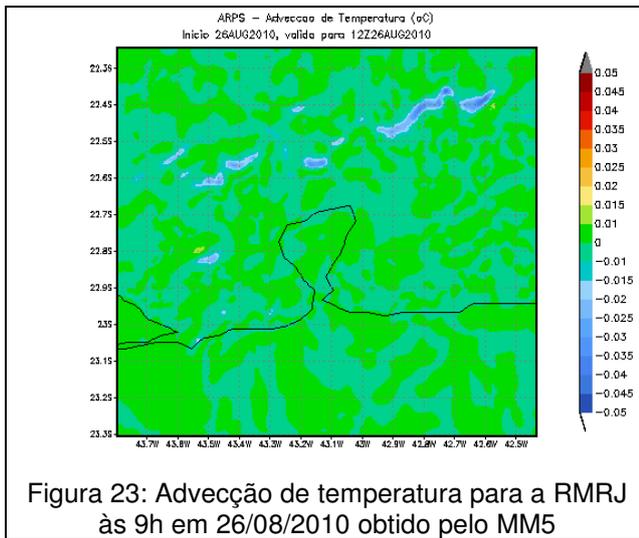


Figura 23: Advecção de temperatura para a RMRJ às 9h em 26/08/2010 obtido pelo MM5

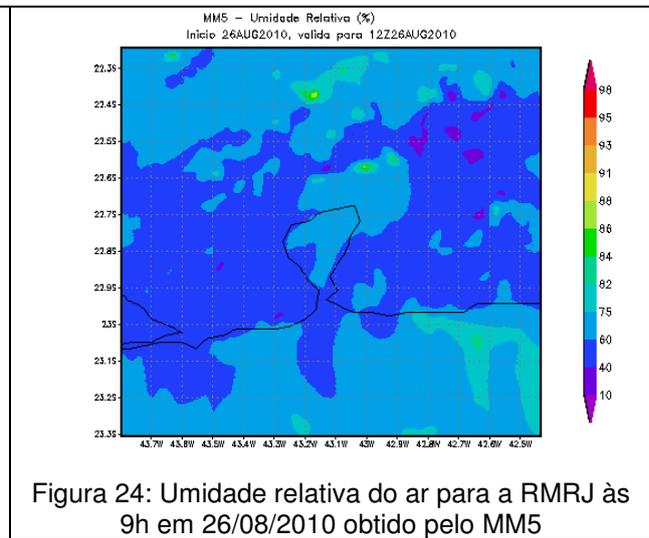


Figura 24: Umidade relativa do ar para a RMRJ às 9h em 26/08/2010 obtido pelo MM5

Diferentemente do verão, a altura da camada limite no inverno não ultrapassou 1 km (Figura 26), evidenciando as temperaturas mais amenas da estação. Entretanto, a altura máxima, ou próxima a máxima (entre 700 e 1000 metros), ocorre nas áreas comuns às temperaturas mais elevadas, na porção oeste e extremo oeste da baía. A área leste da baía, também residente de temperaturas bem elevadas, mostrou alturas modestas que pouco ultrapassaram 300 metros.

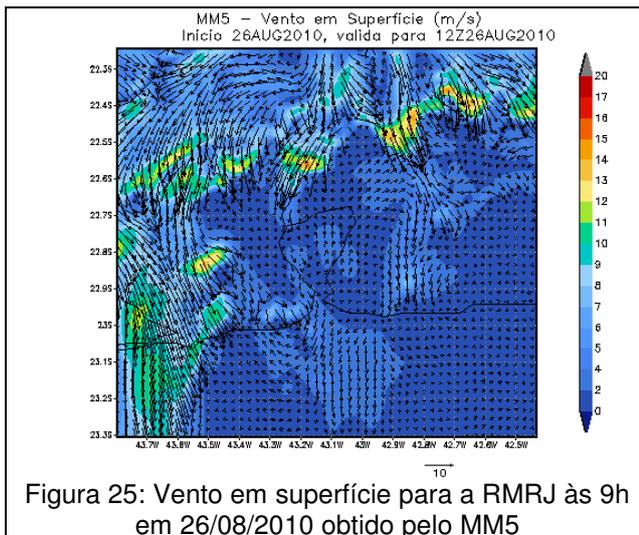


Figura 25: Vento em superfície para a RMRJ às 9h em 26/08/2010 obtido pelo MM5

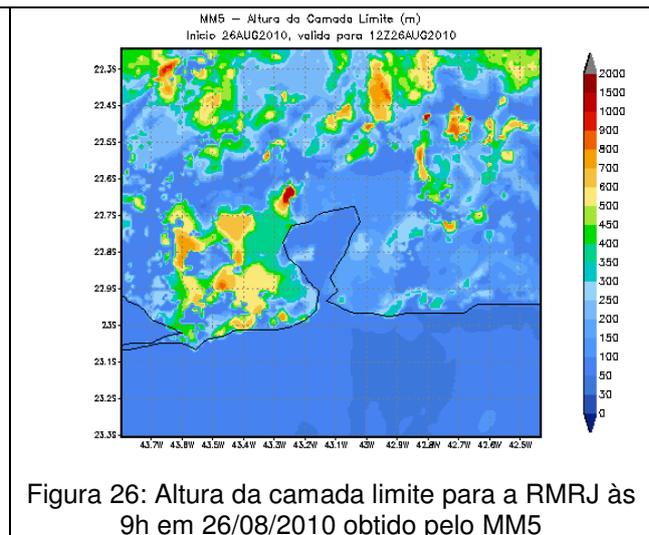


Figura 26: Altura da camada limite para a RMRJ às 9h em 26/08/2010 obtido pelo MM5

Conclusões

Ainda que de forma indireta, a RMRJ apresentou indicativos para o incremento de chuvas estritamente convectivas. A grande massa urbanizada, localizada no setor oeste e leste da baía de Guanabara, associada às elevadas temperaturas de superfície, aos baixos índices de calor latente, aos elevados índices de calor sensível e a maior altura da camada limite, são indicadores em potencial para origem de nuvens de chuva, pois tendem a favorecer os processos formadores de células convectivas. Esse quadro foi mais evidente no verão em virtude de condições mais favoráveis, temperaturas mais elevadas, maior disponibilidade de calor sensível na atmosfera e maior altura da camada limite.

O campo de advecção de temperatura e da umidade relativa do ar apresentou-se pouco relevante para a análise, muito em razão da baixa variação espacial. A umidade relativa, por exemplo, não denota qualquer variação mesmo nas áreas de maior disponibilidade de calor sensível na atmosfera ou baixa disponibilidade de calor latente.

O efeito do vento é outra variável com papel fundamental no processo de formação de nuvens de chuva. As brisas marítimas atuaram por praticamente todo o litoral, com exceção do extremo oeste, e atingiram as áreas próximas dos grandes centros de calor, de maior disponibilidade de calor sensível e de

maior altura da camada limite. As brisas marítimas trazem umidade para o continente favorecendo a formação de nuvens, principalmente quando o ar atinge uma barreira topográfica que induz a sua ascensão.

As áreas mais quentes, com maior disponibilidade de calor sensível e de maior altura da camada limite, são propícias a criação de um campo de baixa pressão, favorecendo a convecção, ao movimento de ascensão do ar e, conseqüentemente, possibilidade de nuvens de chuva.

As brisas de vale e montanha provenientes dos maciços costeiros e das serras, e que atuaram mais para o interior da RMRJ, não apresentaram um papel tão efetivo para a ascensão ou convecção do ar. Esse fato deve-se a outras condições dependentes não favorecerem tanto, como é o caso da temperatura da superfície, relativamente mais baixa, do calor sensível, mais baixo, e da altura da camada limite, também mais baixa.

Pelo número e correlações entre variáveis envolvidas, este trabalho revelou resultados e cenários novos, importantes e estimulantes, requerendo, complementarmente, estudos mais abrangentes nessa temática. Destaca-se, ainda, tratar-se de um trabalho pioneiro nesse campo de investigação para a RMRJ.

Adicionalmente, diga-se que os proeminentes indicativos de chuva foram estabelecidos para o período matutino, isto porque a imagem Landsat tem resolução temporal para cada 16 dias, sempre entre as 9h e 11h, limitando, assim, a análise das simulações da modelagem para o mesmo horário. Deve-se ampliar a análise da série temporal de imagens Landsat para que melhor se conheçam os processos impulsadores da chuva urbana, pelo menos para o período da manhã.

É fundamental explicar que o horário matutino é bastante restrito quanto aos processos convectivos, ainda mais para o estado do Rio de Janeiro, pois ainda estão, em início, os processos de radiação e de balanço de energia. Portanto, os indicativos de possibilidade de chuva observados, neste trabalho, configuram um cenário para as horas seguintes.

Ressalta-se a importância e a necessidade de inserção de outros sensores na análise, como o MODIS, de resolução temporal diária com passagens pela manhã e pela noite, bem como de outros modelos de mesoescala, como o ARPS (Xue et al, 2000), de maneira a aperfeiçoar o conhecimento sobre a gênese e formação das chuvas urbanas.

A RMRJ é extremamente complexa, com uma heterogeneidade conspícua de paisagens geourbanas, que se deve a sua situação geográfica, configuração topográfica e aos altos índices de urbanização, que, em conjunto, atuam como diferentes forçantes do clima urbano e, que, portanto, estimula a pesquisa hidroclimática.

AGRADECIMENTOS: O primeiro autor agradece a apoio concedido pela FAPERJ mediante bolsa de doutorado concedida para a realização do presente trabalho. Agradecimentos extensivos são dedicados ao Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ pelo apoio do Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, ao Departamento de Meteorologia – IGEO/UFRJ, e ao INPE, mediante dados e infraestrutura disponibilizadas por essas instituições para a realização desta pesquisa. Reconhece-se o apoio do CNPq, por meio do projeto PROSUL – Processo 490684/2007-6, que trata de técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao monitoramento hidrológico e de mudanças climáticas bem como dos auxílios MEC-SESu – CAPES – AUX-PE-PET-1228/2009 (PET CIVIL UFRJ), Projeto PEC/COPPE - FAPERJ Edital 014/2010 (2010-2012), Projeto IME-PEC/COPPE – CAPES – Aux-PE-PRO-Defesa 1783/2008 (2008–2012) e MCT/FINEP/CT-HIDRO - Bacias representativas 04/2005 (2005-2011).

Referências bibliográficas

Arnfield, A.J., 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.* 23: 1–26;

Changnon, S. A., Jr., 1968. The La Porte weather anomaly – fact or fiction? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 49, 4-11;

Dabberdt, W.F., Hales, J., Zubrick, S., Crook, A., Krajewski, W. et al., 2000. Forecast issues in the urban zone: report of the 10th prospectus development team of the U.S. Weather Research Program, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 2047-2064;

Dettwiller, J. and Changnon Jr., S. A., 1976. Possible urban effects on maximum daily rainfall at Paris, St. Louis and Chicago. *Journal of Applied Meteorology*, 15, 517-519;

Dixon, P. G. and Mote, T. L., 2003. Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation, *J. Appl. Meteor.*, 42, 1273-1284;

FREITAS, E. D., SILVA DIAS, P. L., 2005, "Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor", *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.3, pp. 355-366.

GALLO, K. P., TARPLEY, J. D., MCNAB, A. L. et al., 1995, "Assessment of urban heat islands: a satellite perspective", *Atmospheric Research*, vol. 37, pp. 37-43.

Grell, G. A., Dudhia, J., Stauffer, D. R., 1995. "A description of the Fifth-Generation Penn State/ NCAR Mesoscale Model (MM5)." NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, pp. 117.

Holtzman, B. G. and Thom, H. C. S., 1970. The La Porte precipitation anomaly. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 51, 335-337;

Inoue, T. and F. Kimura, 2004. Urban effects on low-level clouds around the Tokio metropolitan area on clear summer days. *Geophys. Res. Lett.*, 31, No. L05103;

Kanae, S., Oki, T. and Kashida, A., 2004. Changes in hourly heavy precipitation at Tokyo from 1890 to 1999. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 241-247;

Kanda, M., 2007, "Progress in Urban meteorology: a review", *Journal of the Meteorological Society of Japan*, vol. 85B, pp.363-383;

Kinouchi, T. and Yoshitani, J., 2001. Simulation of the urban heat island in Tokyo with future possible increases of anthropogenic heat, vegetation cover and water surface, *Proceedings of the International Symposium on Environmental Hydraulics*;

Lin, W.; Wang, B.; Li, J.; Wang, X.; Zeng, L.; Yang, L.; Lin, H., 2010. The impact of urbanization on the monthly averaged diurnal cycle in October 2004 in the Pearl River Delta region, *Atmósfera*, vol. 23, núm. 1, pp. 37-51;

Lucena, A. J.; Rotunno Filho, O. C.; França, J. R. A.; Peres, L. F., 2010a. Aplicação da correção atmosférica para imagens de satélite Landsat-TM. XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Belém;

Lucena, A. J.; Rotunno Filho, O. C.; França, J. R. A.; Peres, L. F., 2010b The study of the urban heat islands in the metropolitan region of Rio de Janeiro. The Meeting of the Americas (AGU). Foz do Iguaçu/PR;

Moraes, N. O., Marton, E., Pimentel, L. C. G., 2005. "Simulações numéricas da formação de ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro", *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, vol. 28, n.2, pp. 116-138;

Oke TR., 1988. The urban energy balance. *Progress in Physical Geography* 12: 471–508;

Rao, P. K., 1972. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 53, 647– 648;

Roth, M., 2007. Review of urban climate research in (sub) tropical regions. *Int. J. Climatol.* 27: 1859–1873;

Rozoff, C.M, Cotton, W.R. and Adegoke, J.O., 2003. Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms. *J. Appl. Meteor.*, 42, 716-738;

Santamouris, M. Paraponiaris, K. Mihalakakou, G., 2007. Estimating the ecological footprint of the heat island effect over Athens, Greece. *Climatic Change.* 80:265–276;

Voogt, J. A., Oke, T. R., 2003. “Thermal remote sensing of urban climates”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 86, pp. 370–384;

Xue M, Droegemeier KK, Wong V (2000) The Advanced Regional Prediction System (ARPS) – A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part I: Model dynamics and verification. *Meteor Atmos Physics* 75: 161–193

YOSHIKADO, H., 1994, “Interaction of the sea breeze with urban heat islands of different sizes and locations”, *Journal Meteorology Sociedad of Japan*, vol. 72, pp.139-143;