



TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE CONTINENTAL ASSOCIADA AOS EVENTOS METEOROLÓGICOS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, RJ

Allan Werner dos Anjos¹, Rafael Coll Delgado², José Francisco de Oliveira Júnior³, Givanildo de Gois⁴, Nilton Oliveira Moraes⁵

1. Estudante de Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica/RJ – Brasil (allanwerner28@hotmail.com).
2. Professor Doutor da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Ciências Ambientais (DCA), Seropédica/RJ – Brasil.
3. Professor Doutor da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Ciências Ambientais (DCA), Seropédica/RJ – Brasil.
4. Estudante de Doutorado da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCAF), Seropédica/RJ
5. Estudante de Doutorado da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (COPPE-PEM), Rio de Janeiro/RJ – Brasil.

Recebido em: 30/09/2013 – Aprovado em: 08/11/2013 – Publicado em: 01/12/2013

RESUMO

O crescimento urbano em todo o mundo tem sido visto como uma das causas do aquecimento global, pois esse fator leva à mudança da paisagem de cada região ao longo do tempo. A estimativa da temperatura da superfície continental obtida por meio do algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) foi comparada com a temperatura do ar extraída de Estações Meteorológicas de Superfície (EMS) e associada com os eventos meteorológicos que ocorreram no período de 2003-2011 na Cidade do Rio de Janeiro (CRJ), RJ. A série de dados diários da temperatura do ar foram obtidas do código METAR (Meteorological Aerodrome Report) por meio de um pré-processador em linguagem FORTRAN nos horários das 12 e 13 horas TMG (Time Mean Greenwich), a fim de se obter um valor mais representativo com o horário médio da passagem do satélite LANDSAT-5 na CRJ às 12:40 TMG. As imagens do sensor TM (Thematic Mapper) do LANDSAT-5 foram adquiridas através do catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Foram utilizados os coeficientes de determinação e correlação e Erro Padrão de Estimativa (EPE) na avaliação do desempenho do algoritmo SEBAL. Os principais sistemas meteorológicos de escala sinótica que interferem no campo térmico da CRJ no período de estudo foram os Sistemas Frontais (SF) associados aos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN) no outono e inverno. As regiões norte e oeste da CRJ foram as mais afetadas pela variação do campo térmico no período de estudo e, se intensificam com atuação de SF seguido da ocorrência de eventos de La Niña forte. Os valores estatísticos encontrados no estudo mostrou uma boa correlação entre o estimado e observado. O algoritmo SEBAL é aplicável para CRJ e pode ser utilizado para outros estudos, particularmente para estudos de Ilha de Calor e Qualidade do Ar.

PALAVRAS- CHAVE: Campo térmico, região sudeste, sistemas sinóticos

CONTINENTAL SURFACE TEMPERATURE ASSOCIATED WITH WEATHER EVENTS IN RIO DE JANEIRO, RJ

ABSTRACT

Urban growth around the world has been seen as one of global warming causes, because this factor leads to landscape changes on each region over time. Land surface temperature estimation obtained by SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) algorithm was compared with air temperature extracted from Surface Weather Stations (SWS) and associated with weather events that occurred in 2003 – 2011 period in Rio de Janeiro City (RJC), RJ. Daily air temperature were obtained from METAR code (Aerodrome Meteorological Report) by FORTRAN language preprocessor in 12 and 13 hours GMT (Greenwich Mean Time) in order to obtain a more representative value with the hourly average of LANDSAT-5 passage in RJC at 12:40 GMT. TM sensor images (Thematic Mapper) LANDSAT-5 were acquired through images catalog of National Institute for Space Research (INPE). Determination and correlation coefficients and estimate standard error (SEE) were used to evaluate SEBAL algorithm performance. The main meteorological systems of synoptic scale that affect RJC thermal field in study period were Frontal Systems (FS) associated with high-level cyclonic vortices (HLCV) in autumn and winter. Northern and western RJC regions were most affected by thermal field variation in study period, and intensify with SF activity followed by strong La Niña events occurrence. Statistical values found in study showed a good correlation between estimated and observed. The SEBAL algorithm is applicable for RJC and can be used for further studies, particularly for studies of Island Heat and Air Quality.

KEYWORDS: Southeast region, synoptic systems, thermal field

INTRODUÇÃO

O aumento do grau de urbanização e o crescimento populacional em todo o mundo têm sido visto como grandes componentes antrópicas nas causas do Aquecimento Global juntamente com emissão dos Gases de Efeito Estufa (GEE), pois esses fatores levam à mudança da paisagem de uma região ao longo do tempo. Mudanças na superfície terrestre, como por exemplo, a urbanização, tem como efeito a substituição da vegetação natural por edificações, ruas e avenidas, e assim o aumento significativo da impermeabilização dos solos e, conseqüentemente a ocorrência de enchentes e, por fim a irradiação de calor para a atmosfera. Problemas desta natureza acontecem na Cidade do Rio de Janeiro (CRJ) e em outras megacidades existentes no mundo. O forte calor concentrado em áreas urbanizadas tem aumentado nos últimos anos, seguido de um aumento significativo de eventos severos de chuvas, sendo uma preocupação para a população e os gestores de políticas públicas (DELGADO et al., 2012).

A urbanização ocasiona a alteração nas componentes do Balanço Superficial de Energia (BSE), tanto na faixa de ondas curtas, quanto na de emissão de radiação de ondas longas. Devido às construções e ao aumento na absorção de radiação, altera a Camada Limite Atmosférica (CLA) no ambiente urbano, que varia de acordo com as regiões de baixa e alta pressão, que por sua vez influenciam as condições meteorológicas locais (CORRÊA, 2008).

De acordo com COSTA et al. (2010) as propriedades radiativas e térmicas dos materiais urbanos, em particular, albedo, emissividade e condutividade térmica, também apresentam forte influência no desenvolvimento do fenômeno ilha de calor,

visto que elas determinam como a radiação de ondas curta e longa é refletida, absorvida, emitida e armazenada.

De acordo com BARROS & LOMBARDO (2012) a presença de ilha de calor em uma única parte de uma determinada região, pode estar atrelada a ocupação desordenada e irregular de um determinado território, o que constitui, o predomínio de áreas residenciais fortemente adensadas com materiais de construção de baixa qualidade, pouca presença de vegetação e grandes áreas cobertas por concretos.

MONTEIRO (1976) notou que embora tenha ocorrido uma grande evolução nos métodos de análise e na epistemologia da ciência, até meados do século XX, os estudos sobre clima urbano apenas investigavam os aspectos meteorológicos dando pouco destaque a degradação ambiental proveniente de atividade antrópica. Porém até o momento, o uso de imagens de satélite no estudo do clima urbano é, entretanto, um recurso ainda muito pouco utilizado quando se observam os estudos desenvolvidos na literatura nacional (DELGADO et al., 2012).

Os estudos envolvendo a distribuição do campo térmico no espaço urbano são baseados em dados de abrigos meteorológicos, estações semifixas e por sensoriamento remoto (HOLZ et al., 2012). Dados pontuais possuem a vantagem de alta resolução temporal, mas por outro lado baixa resolução espacial. Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto aplicado em estudos de clima urbano vem se destacando (WENG, 2009), pois além de possuir alta resolução espacial e abranger diferentes escalas, permite a utilização de dados espectrais localizados na região do infravermelho termal dentro da janela atmosférica. Isto faz com que os sensores que operem nesta região possam ter seus dados convertidos após sofrerem correção dos efeitos atmosféricos e da superfície (emissividade) em temperatura da superfície continental (DELGADO et al., 2012).

Estudos acerca do fenômeno Ilha de Calor Urbano (ICU), utilizando estimativas de temperatura da superfície continental, com base em dados de satélites, foram conduzidos originalmente empregando-se os dados do Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (MOD11A2) no Noroeste da Argentina (PAOLINI, 2012). A resolução espacial de 1 km destes dados é adequada somente para o mapeamento da temperatura urbana em escala regional.

Recentemente, na região Amazônica foram utilizados dados térmicos dos satélites da série LANDSAT (Land Remote Sensing Satellite), tendo-se destacado por muitos anos o LANDSAT-5, com resolução espacial de 120 m, para estudos de ICU local (DELGADO et al., 2012).

O levantamento de informações relacionadas ao uso e cobertura do solo é essencial, no sentido de manter o controle dos recursos naturais, evitando a degradação e assegurando a manutenção dos recursos e demais sistemas presentes em sua extensão. A evolução e a utilização da ferramenta sensoriamento remoto permite, através de uma análise da distribuição espacial das áreas, caracterizar o uso da terra, e assim, fornecer informações importantes de épocas passadas, as quais podem subsidiar metodologias que utilizavam apenas dados temporais de estações meteorológicas de superfície. Os dados provenientes de imagens de satélites como a temperatura da superfície continental constituem excelentes ferramentas para a elaboração de mapas de áreas de ilhas de calor urbano, como também no auxílio a tomadas de decisões por parte dos órgãos gestores (SOUSA JÚNIOR et al., 2006).

O conhecimento da temperatura da superfície constitui-se num parâmetro influenciado diretamente pelas variações no clima, e cuja estimativa é de grande utilidade em estudo de monitoramento de dinâmicas espaciais como os processos

de urbanização, catástrofes naturais e outras alterações na paisagem. As diminuições das áreas verdes criam mudanças na atmosfera local, modificando os padrões de temperatura e das chuvas da região, bem como a direção e a velocidade dos ventos (KATO & YAMAGUCHI, 2005).

Baseado no exposto, o estudo se baseia na estimativa da temperatura da superfície continental por meio do algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land), e na comparação da temperatura do ar extraída das estações meteorológicas de superfície existentes nos aeroportos e aeródromos e, por fim associar aos eventos meteorológicos que ocorreram na Cidade do Rio de Janeiro, RJ no período de 2003-2011.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo é a CRJ, localizada entre as latitudes 22° 45' e 23° 50' S, e entre longitudes 43° 05' e 43° 50' W (Figura 1). A CRJ encontra-se inserida em parte na área compreendida pela Mata Atlântica, bioma fortemente ameaçado devido à expansão urbana nas últimas décadas, porém com fragmentos remanescentes significativos na região. Por ser um refúgio de muitas espécies, abrigando alta diversidade, este bioma ainda requer muitos estudos em diversos aspectos ecológicos e ambientais, principalmente envolvendo os efeitos da temperatura da superfície continental.

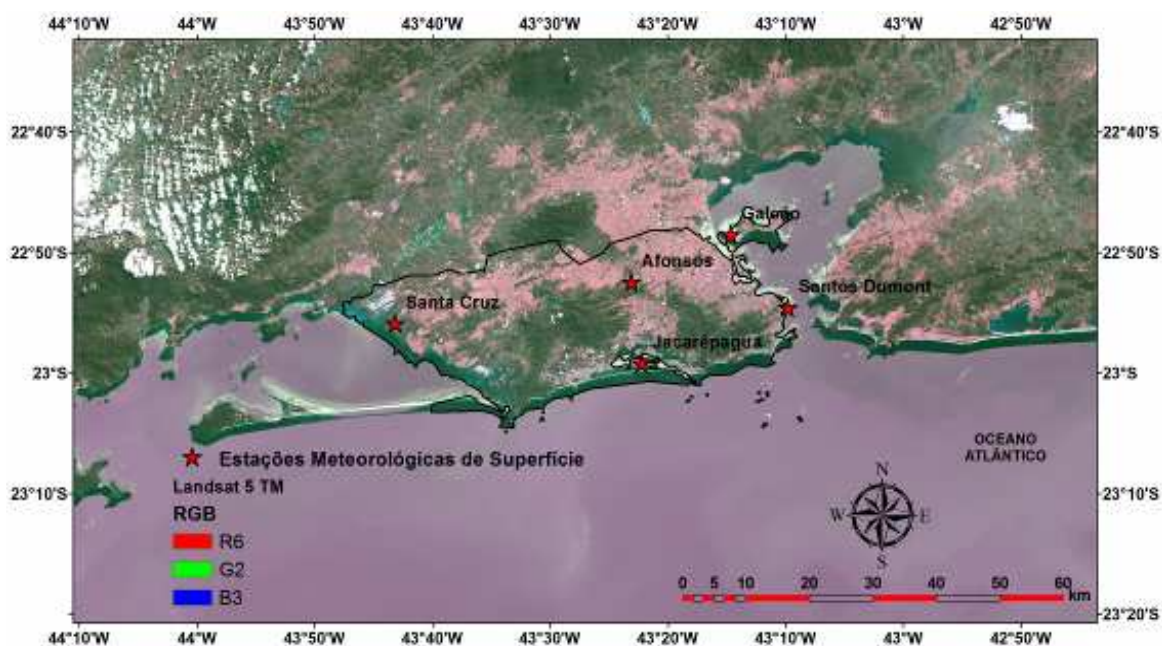


FIGURA 1. Mapa da localização geográfica da área de estudo, com o limite municipal da CRJ com a composição RGB (6, 2 e 3).

A CRJ está localizada na região sudeste do Brasil. A sua classificação climática segundo Köppen, consiste no tipo "Aw", caracterizado por invernos secos e frios e verões úmidos e chuvosos. A temperatura mínima do ar média varia de 21,1°C (inverno) e a temperatura máxima média de 27,3°C (verão). A temperatura média anual é de 23,9°C, a precipitação é cerca de 1.258 mm.ano⁻¹ e o número médio de dias com precipitação é de 124 (ZERI et al., 2011). A topografia da CRJ é acidentada e bastante complexa, com os maciços de Gericinó-Mendanha ao norte,

da Pedra Branca a oeste e o maciço da Tijuca, todos contribuem para a grande variabilidade espacial das variáveis meteorológicas (LYRA et al., 2011), assim como a proximidade do Oceano Atlântico, Baía de Sepetiba e da Baía de Guanabara (Figura 1).

Na CRJ a complexidade orográfica interfere nas circulações de mesoescala (brisa marítima-terrestre, brisa de vale-montanha e brisa lacustre) e, ainda influenciam nos regimes de precipitações orográficas e, por fim na formação da ICU. Outros sistemas de característica sinótica que atuam na CRJ são o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), os Sistemas Frontais (SF), atuação de Bloqueios Atmosféricos (BA) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) na região (CORRÊA, 2008 e MORAES, 2008). Segundo ZERI et al., 2011) a passagem de SF na CRJ é mais frequente durante as estações de inverno e primavera, enquanto a ZCAS tem maior ocorrência nas estações de verão e primavera. O posicionamento e a intensidade da ASAS varia sazonalmente. No verão, este sistema se localiza preferencialmente sobre o Oceano Atlântico, originando uma massa de ar quente e úmida que interage com os SF, sendo a principal causa das chuvas na região. Enquanto no inverno, seu deslocamento para o continente induz a subsidência do ar, que resulta numa massa de ar seco, e assim, na ausência de chuvas (ZERI et al., 2011).

Os dados de temperatura do ar (°C) foram obtidos das Estações Meteorológicas Superfícies (EMS) provenientes da REDEMETS (Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica) no seguinte endereço eletrônico: <http://www.redemet.aer.mil.br/>. A série de dados diários da temperatura do ar foi extraída do código METAR (Meteorological Aerodrome Report) por meio de um pré-processador em linguagem FORTRAN e compreende o período de 2003 a 2011 (9 anos) das 12 e 13 horas TMG (Time Mean Greenwich), a fim de se obter um valor mais representativo com o horário médio da passagem do satélite LANDSAT-5 na CRJ às 12:40 TMG. Esses dados foram obtidos de três aeródromos (SBSC – Santa Cruz, SBAF – Campo dos Afonsus, SBJR – Jacarepaguá) e de dois aeroportos (SBGL – Galeão e SBRJ – Santos Dumont – Figura 1). As imagens do sensor TM do LANDSAT-5 foram adquiridas para o mesmo período, através do catálogo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), no seguinte endereço eletrônico: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/> (Tabela 1).

TABELA 1. Ano, data, sensor e órbita/ponto da passagem do satélite Landsat-5 na CRJ, RJ.

Ano	Satélite	Sensor	Data	Órbita/Ponto
2003	LANDSAT-5	TM	23/08/2003	217/076
2004	LANDSAT-5	TM	03/04/2004	217/076
2005	LANDSAT-5	TM	09/06/2005	217/076
2006	LANDSAT-5	TM	14/07/2006	217/076
2007	LANDSAT-5	TM	12/04/2007	217/076
2008	LANDSAT-5	TM	23/10/2008	217/076
2009	LANDSAT-5	TM	04/06/2009	217/076
2010	LANDSAT-5	TM	15/02/2010	217/076
2011	LANDSAT-5	TM	12/07/2011	217/076

O processamento dos dados (Figura 2) foi baseado no algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) proposto por BASTIAANSEN et al. (1998), sendo utilizados os softwares ArcGIS 10.1 e ERDAS IMAGINE 2011. O

ArcGIS versão 10.1 foi utilizado para o tratamento dos dados vetoriais, banco de dados e construção dos mapas. O ERDAS IMAGINE 2011 foi utilizado para o processamento de imagem obtendo-se os seguintes parâmetros: cálculo da calibração radiométrica (CHANDER et al., 2009), reflectância das bandas (ALLEN et al., 2002), índices de vegetação (ROUSE et al., 1973 e ALLEN et al., 2002), emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal (ALLEN et al., 2002), emissividade da banda larga (ALLEN et al., 2002) e temperatura da superfície continental (ALLEN et al., 2002).

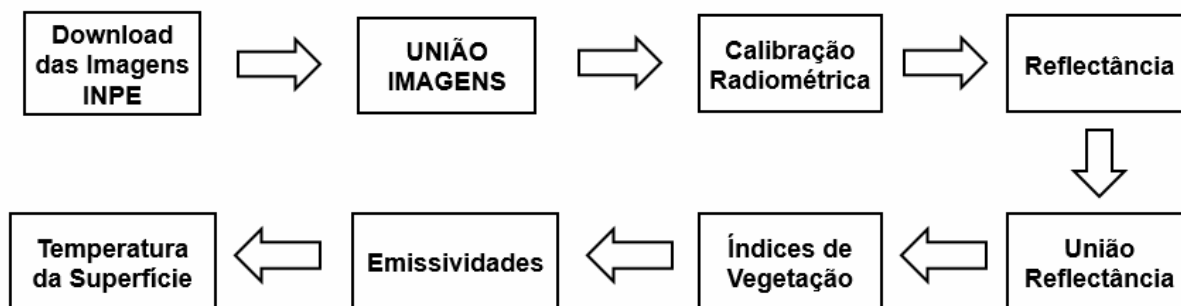


FIGURA 2. Fluxograma das etapas desenvolvidas para obtenção da temperatura da superfície.

Na avaliação do desempenho do método foram utilizadas ferramentas estatísticas baseadas em análises comparativas entre a metodologia proposta e observado nas EMS. Foram adotados os coeficientes de determinação e correlação (r^2 e r), seguido do Erro Padrão de Estimativa (EPE, °C) (ALLEN et al., 1989). As equações utilizadas seguem abaixo:

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

$$r = \frac{\sum O_i P_i}{\sqrt{\sum O_i^2} \sqrt{\sum P_i^2}} \quad (2)$$

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{N - 1}} \quad (3)$$

em que, P_i é o i ésimo valor estimado de temperatura da superfície continental (°C), O_i é o i ésimo valor observado de temperatura da superfície (°C), \bar{O} é o valor médio observado de temperatura da superfície (°C), N é o número de dados.

Para avaliar os efeitos dos sistemas meteorológicos no campo da temperatura da superfície continental foram colhidos dados dos boletins da CLIMANÁLISE (CPTEC, 2013), a partir do levantamento dos principais sistemas meteorológicos que atuam na CRJ no período de estudo. Os sistemas foram restringidos apenas na

escala sinótica, Sistema Frontal (SF), Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN) e Bloqueio Atmosférico (BA).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3, o algoritmo SEBAL aplicado na determinação da temperatura da superfície continental na CRJ por meio das imagens TM do satélite Landsat-5, apresentou os seguintes índices estatísticos, $r = 0,83$, $r^2 = 0,7$ e um EPE = $2,93^{\circ}\text{C}$, quando comparado com os dados observados nas EMS. O coeficiente r^2 para o ajuste entre os valores medidos e estimados pelo algoritmo foi elevado, seguido de boa correlação entre os valores observados e estimados de temperatura, isto é, demonstram que o algoritmo foi capaz de estimar a temperatura da superfície com precisão, explicando que 80% das variações do estimado são explicadas pela variação da temperatura obtidas pelas EMS existentes na CRJ.

O coeficiente angular do modelo foi próximo de 1 ($b = 0,73$), sendo que o modelo apresentou interceptação ($a = 7$), no entanto, o modelo apresentou uma tendência de sempre superestimar os valores medidos, no intervalo entre 20°C e 30°C . O EPE para o modelo foi abaixo de 3°C para o ciclo anual. Apesar de o modelo ter sido desenvolvido considerando a variação diária típica da temperatura do ar, o mesmo apresentou boas estimativas nas escalas sazonal e anual. Assim, o algoritmo SEBAL adotado no estudo é indicado para estimativa da temperatura da superfície na CRJ.

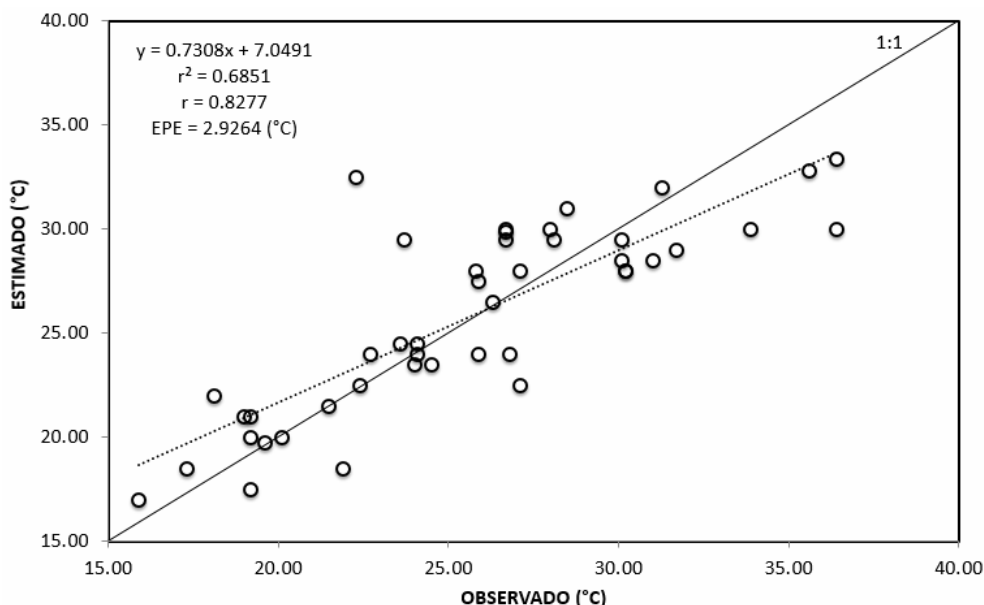


FIGURA 3. Análise de regressão, coeficientes de determinação e correlação (r^2 e r) e EPE ($^{\circ}\text{C}$) entre temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) obtida dos dados da REDEMET *versus* a temperatura da superfície continental ($^{\circ}\text{C}$) obtida do algoritmo SEBAL.

Na Figura 4 observa-se que a zona W apresentou maior temperatura da superfície continental obtida pelo algoritmo SEBAL em comparação a zona N, apesar da mesma zona ter maior área urbanizada. Nota-se a formação de um gradiente horizontal de temperatura no corredor entre os maciços Mendanha e Gericinó. O campo térmico obtido para este dia, corresponde ao inverno e, variou

entre 32°C a 34°C em ambas as zonas citadas anteriormente, a exceção foi à zona S da CRJ com temperatura abaixo de 27°C, essa diminuição da amplitude térmica entre as regiões da CRJ se deve a proximidade do Oceano Atlântico, seguido da influência dos maciços em relação aos padrões de escoamento (sotavento/barlavento) que interferem no regime da temperatura da CRJ (MORAES, 2003). Climatologicamente, agosto é um mês de estiagem na Região Sudeste. Neste ano, a temperatura do ar foi extremamente baixa devido à atuação de intensas zonas de altas pressões que resultou em temperaturas do ar abaixo da média em parte da Região Sudeste. Em decorrência da presença de um SF, neste dia foram registradas chuvas de pequena magnitude na Região Sudeste, principalmente no litoral (CPTEC, 2013).

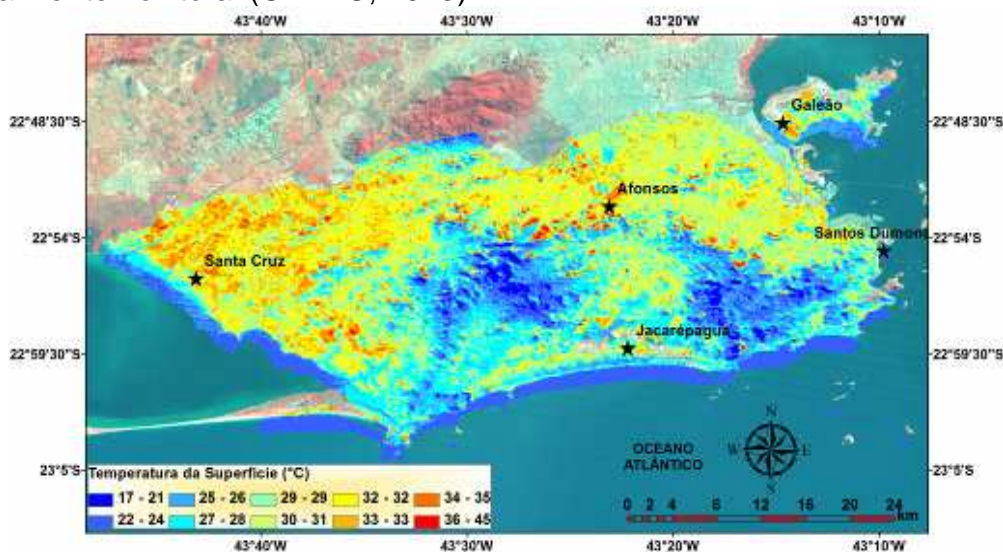


FIGURA 4. Mapa da temperatura da superfície continental (°C) obtida pelo sensor TM do satélite LANDSAT-5 para o dia 23/08/2003 (inverno) na CRJ.

Na Figura 5 observa-se a inversão do campo térmico entre as zonas W e N da CRJ. A zona N apresentou maior campo térmico em comparação às demais regiões da CRJ, com temperatura acima de 32°C. Atribui-se essa diferença entre as zonas devido a maior malha urbana na zona N, seguido de poucas áreas vegetadas (solo exposto) nesta região, que por sua vez contribuem para o aumento da temperatura da superfície (MORAES, 2008). Além disso, o mês de abril de 2004 (outono) foi um mês com altas temperaturas em praticamente todo o Brasil, com o registro de temperaturas máxima e mínima que excederam a média histórica, principalmente na Região Sudeste. Nos dias que antecederam o dia 03/04/2004 ocorreram de forma conjunta atuação da ASAS e do VCAN que contribuíram para o aumento da temperatura em algumas regiões da CRJ (CPTEC, 2013).

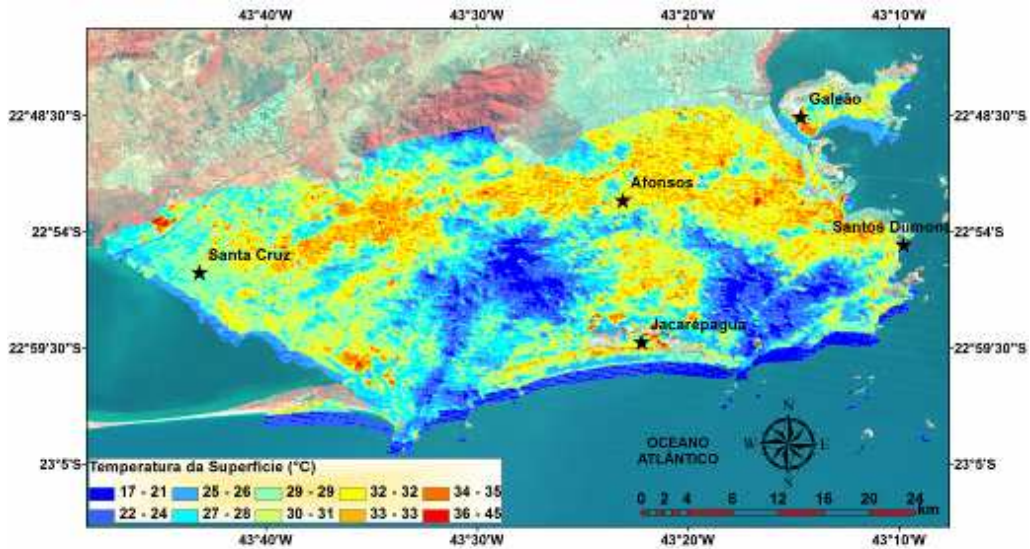


FIGURA 5. Mapa da temperatura da superfície continental (°C) obtida pelo sensor TM do satélite LANDSAT-5 para o dia 03/04/2004 (outono) na CRJ.

Ao contrário da situação de inverno de 2008 (Figura 4), neste dia correspondente ao inverno de 2005 não se formou o gradiente horizontal de temperatura no corredor entre os maciços nas zonas W e N. Conseqüentemente, teve impacto no campo térmico estimado pelo algoritmo SEBAL, onde as zonas W e N tiveram comportamento similar, sendo as temperaturas da superfície da ordem de 33°C (Figura 6). A fraca atuação dos SF's contribuíram para a ocorrência de chuvas abaixo da média histórica em grande parte da Região Sudeste. No mês de junho de 2005, as temperaturas do ar estiveram acima da média histórica na maior parte do País. A temperatura máxima variou entre 22°C e 30°C no Sudeste. No restante do mês, os SF's atuaram pelo interior e litoral da Região Sudeste. Nos primeiros vinte dias, a presença de um BA próximo ao litoral sul e sudeste do Brasil não favoreceu ao aumento da nebulosidade e ocorrência de chuva (CPTEC, 2013).

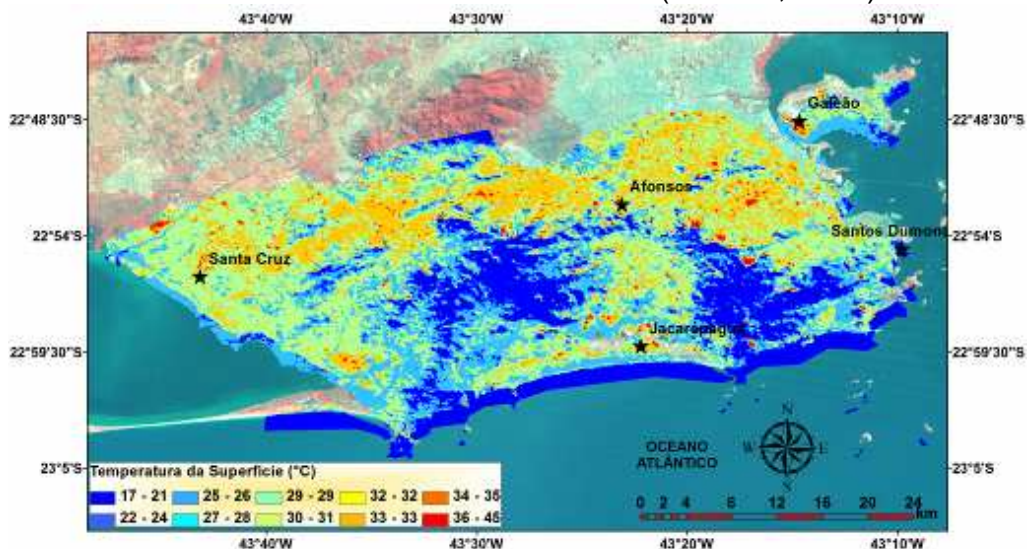


FIGURA 6. Mapa da temperatura da superfície continental (°C) obtida pelo sensor TM do satélite LANDSAT-5 para o dia 09/06/2005 (inverno) na CRJ.

Nota-se que as zonas N e W da CRJ as temperaturas da superfície continental foram acima de 33°C, similares as estações anteriores (Figura 7). Na zona S da CRJ, apesar de apresentar lugares com valores acima de 33°C estes foram poucos e isolados, quando comparados com as estações anteriores. A condicionante para o aumento significativo em ambas as regiões na CRJ refere-se que o mês de julho de 2006 foi marcado pela permanência de uma massa de ar quente e seco sobre as regiões central e sudeste do Brasil. Em julho, as chuvas foram escassas em grande parte do Brasil, com o avanço de apenas cinco SF's pelo interior e litoral do País. Em julho de 2006, houve a configuração de sete episódios VCAN sobre a América do Sul (AS) - (CPTEC, 2013). Com destaque ao episódio que ocorreu na Região Sudeste, no período de 13/07/2006 a 15/07/2006, associado à bifurcação do escoamento em 200 hPa. O VCAN tem como característica em sua periferia provoca movimento subsidente (trazendo ar seco e quente para superfície) – (KOUSKY & GAN, 1981) ou seja, o VCAN juntamente com pouca entrada de SF's contribuíram para alteração no campo térmico na CRJ no período.

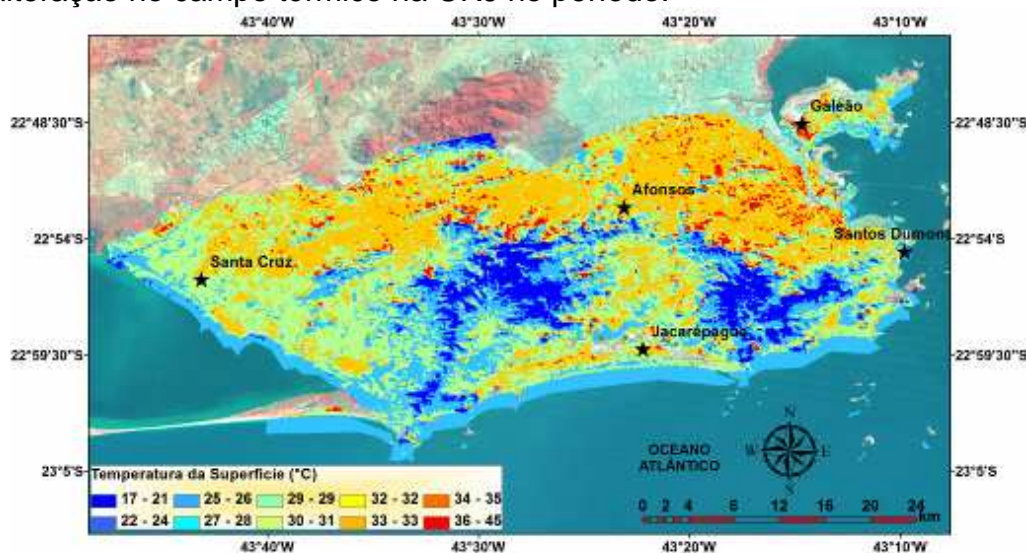


FIGURA 7. Mapa da temperatura da superfície continental (°C) obtida pelo sensor TM do satélite LANDSAT-5 para o dia 14/07/2006 (inverno) na CRJ.

As zonas N e S da CRJ apresentou um campo térmico com temperatura da superfície continental próxima de 36°C, em comparação a zona W que foi abaixo de 32°C (Figura 8). Vale ressaltar que as zonas N e S possuem maiores áreas urbanizadas em comparação a zona W, que por sua vez sofre maior influência da formação de ICU na região (MORAES et al., 2005). Outro aspecto identificado foi a configuração de cavados e vórtices em médios e altos níveis observados sobre a Região Sudeste na maior parte do mês de abril de 2007, que por sua vez contribuíram para esta diferenciação do campo térmico na CRJ. Na Região Sudeste, a temperatura média variou entre 20°C e 24°C, mas na CRJ os valores obtidos pelo algoritmo foram entre 32°C e 36°C nas áreas no entorno dos maciços, enquanto que neles permaneceram entre 17°C e 21°C. Durante o mês de abril, a atividade convectiva foi menor sobre parte da Região Sudeste do Brasil (CPTEC, 2013). Esta inibição da atividade convectiva foi decorrente da atuação destes sistemas citados anteriormente.

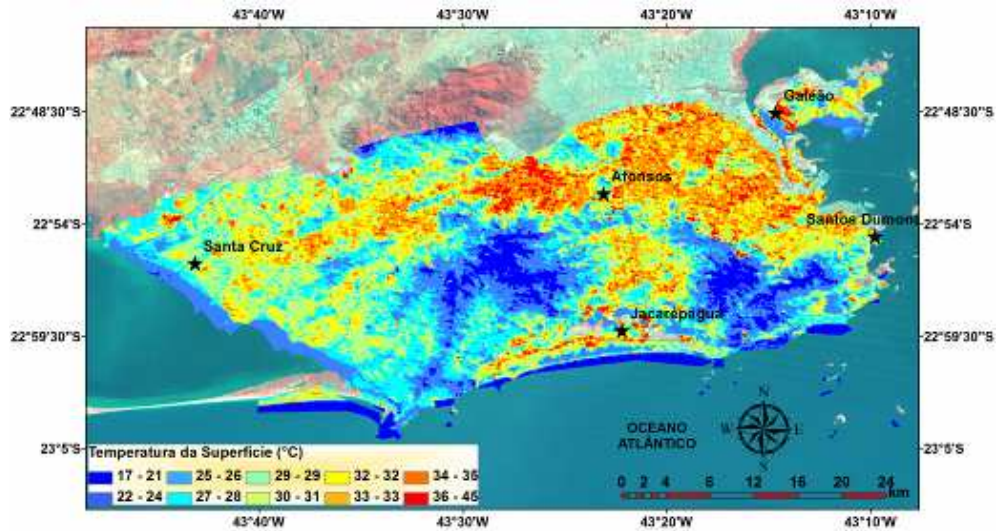


FIGURA 8. Mapa da temperatura da superfície continental (°C) obtida pelo sensor TM do satélite LANDSAT-5 para o dia 12/04/2007 (outono) na CRJ.

Foi observada na Figura 9 a ocorrência de um forte gradiente horizontal de temperatura entre as zonas N e W, principalmente no corredor entre o maciços a sotavento do escoamento. A região N mostrou um campo térmico com temperaturas da superfície continental próxima de 36°C, enquanto na região W foi abaixo de 32°C (Figura 9). Esse aumento no campo térmico na CRJ se deve a situação pré-frontal e, possivelmente associado ao evento de La Niña forte (2007/2008) - (MARENGO, 2007). A situação pré-frontal na CRJ é recorrente e aumenta significativamente a temperatura do ar na CRJ, que por sua vez interfere drasticamente na dispersão de poluentes (ZERI et al., 2011). No mês de Outubro foi marcado pelo atraso do período chuvoso no Sudeste do Brasil. Embora cinco SF's tenham conseguido avançar até o litoral da Região Sudeste, os totais mensais de precipitação apresentaram-se abaixo da climatologia na maior parte da Região. Outubro foi um mês com temperaturas máximas elevadas na maior parte das Regiões, principalmente no Sudeste do Brasil (CPTEC, 2013).

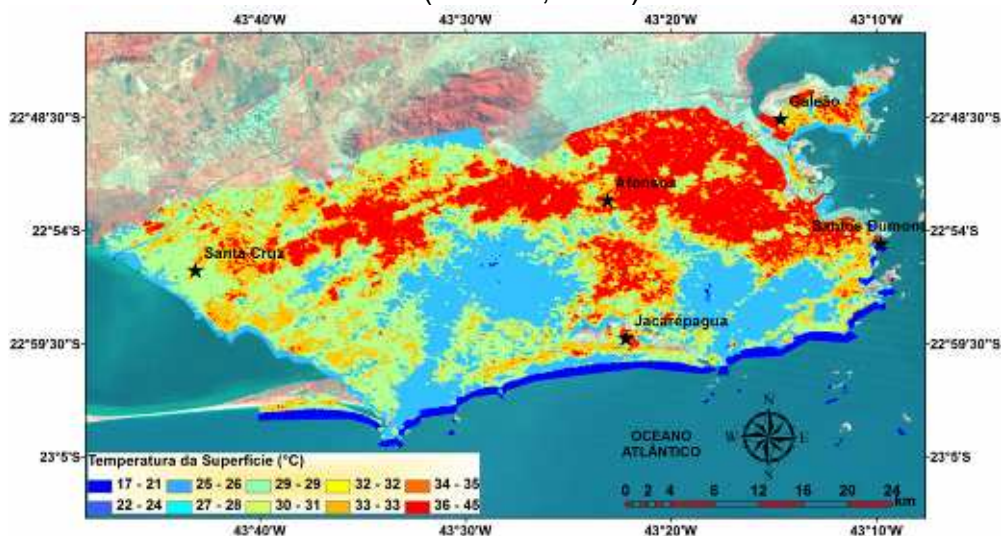


FIGURA 9. Mapa da temperatura da superfície continental (°C) obtida pelo sensor TM do satélite LANDSAT-5 para o dia 23/10/2008 (primavera) na CRJ.

A temperatura da superfície continental estimada pelo algoritmo SEBAL na CRJ neste dia foi próximo a 32°C (Figura 10). A passagem de SF contribuiu para a ocorrência de chuvas acima da climatologia e, conseqüentemente implicaram na diminuição significativa do campo de temperatura da superfície continental na estação inverno. O mês de junho foi frio em parte da Região Sudeste, isso se deve à atuação de cinco massas de ar frio (CPTEC, 2013).

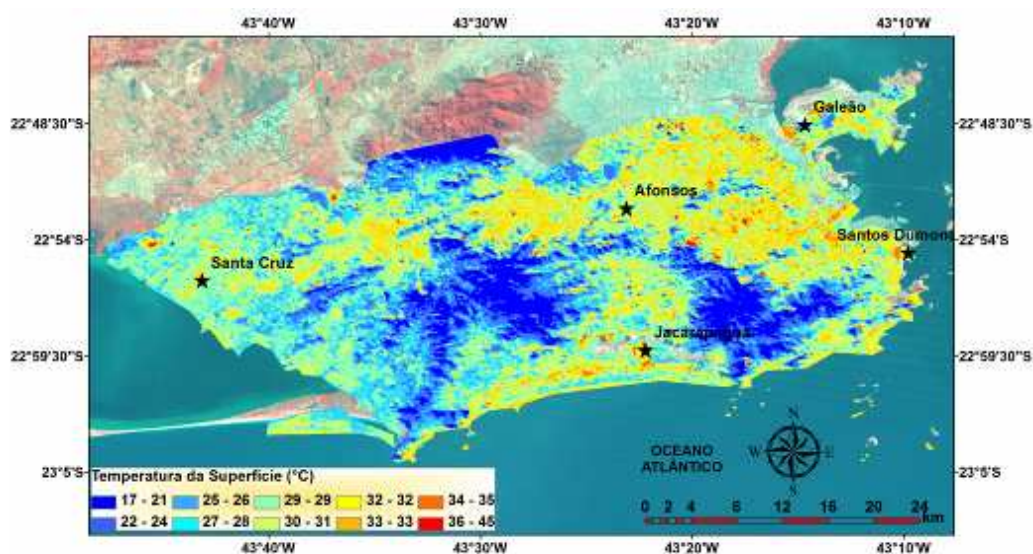


FIGURA 10. Mapa da Temperatura da superfície continental (°C) obtida pelo sensor TM do satélite LANDSAT-5 para o dia 04/06/2009 (inverno) na CRJ.

Na Figura 11 nota-se que a zona N apresentou maior temperatura da superfície continental obtida pelo algoritmo SEBAL em comparação a zona W, isso se deve a zona N ter maior área urbanizada. Forma-se um gradiente horizontal de temperatura marcante no corredor entre os maciços Mendanha e Gericinó similar à situação ocorrida no dia 23/08/2008 (Figura 4). A influência dos maciços em relação aos padrões de escoamento (sotavento/barlavento) que interferem no regime da temperatura da CRJ (ZERI et al., 2011). O campo térmico obtido para este dia, corresponde ao inverno, variou entre 32°C a 34°C na CRJ. Apenas um SF deslocou-se até o litoral da Região Sudeste, com uma massa de ar frio associado que causou declínio acentuado de temperatura, mas que de uma forma geral, não interferiu no campo de temperatura na CRJ (CPTEC, 2013).

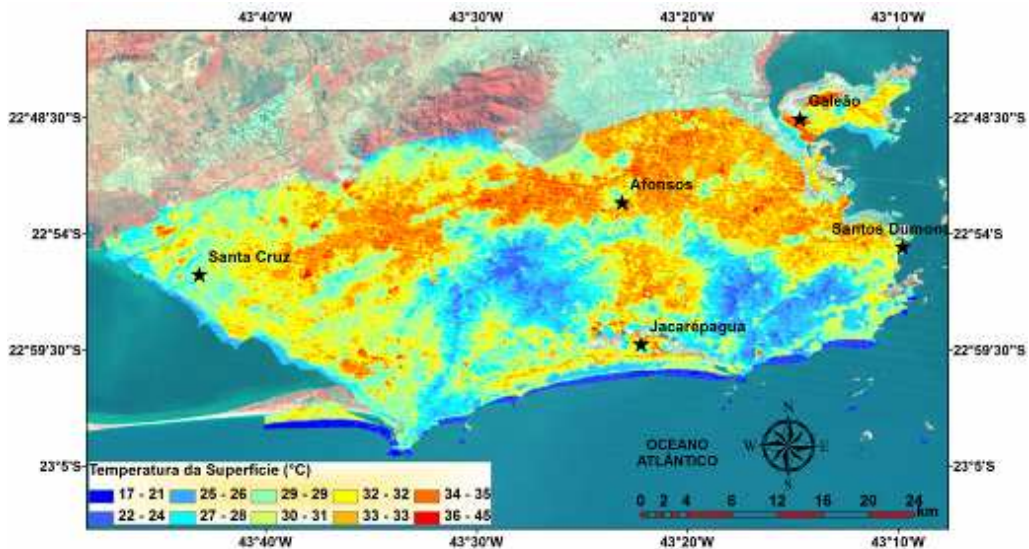


FIGURA 11. Mapa da Temperatura da superfície continental (°C) obtida pelo sensor TM do satélite LANDSAT-5 para o dia 15/02/2010 (verão) na CRJ.

Novamente foi identificado um forte gradiente de temperatura entre as regiões W e N acima dos maciços com valores máximos de 36°C a 45°C. Esse resultado mostra que há um aumento no campo térmico na CRJ, em situação pré-frontal. De acordo com CPTEC, 2013, a intensificação do campo térmico está associada ao evento de La Niña forte (2010/2011) que ocorreu no período de estudo (Figura 12).

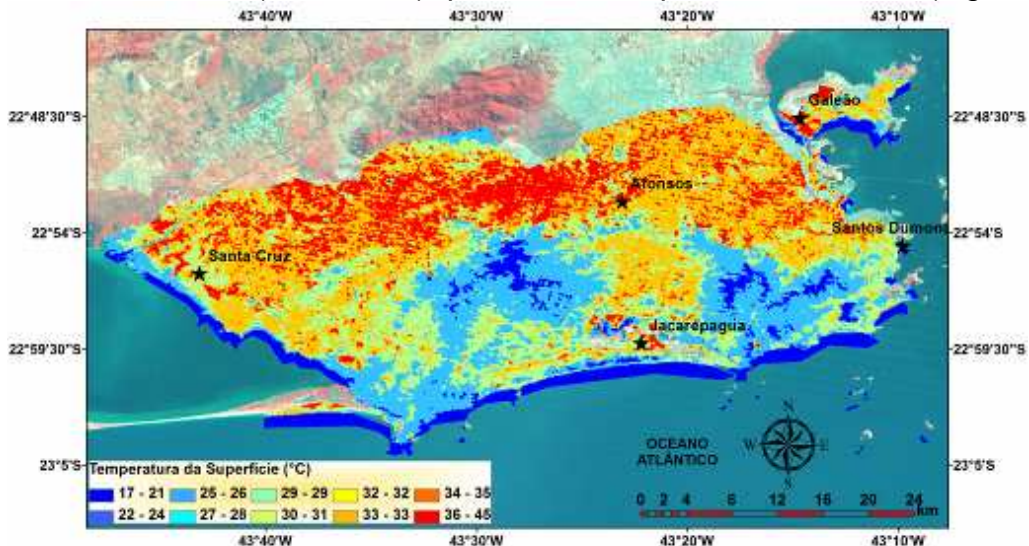


FIGURA 12. Mapa da temperatura da superfície continental (°C) obtida pelo sensor TM do satélite LANDSAT-5 para o dia 12/07/2011 (inverno) na CRJ.

CONCLUSÕES

Os principais sistemas meteorológicos sinóticos que interferem na temperatura da superfície continental estimada pelo algoritmo SEBAL da Cidade do Rio de Janeiro no período de estudo são os Sistemas Frontais, os Vórtices Ciclônicos em

Altos Níveis, Alta Subtropical do Atlântico Sul e Bloqueio Atmosférico nas estações de outono e inverno.

As zonas norte e oeste da Cidade do Rio de Janeiro são as mais afetadas pela variação na temperatura da superfície continental estimada pelo algoritmo SEBAL no período de estudo e, se intensificam em situação pré-frontal.

O algoritmo SEBAL para obtenção para temperatura da superfície continental é aplicável para Cidade do Rio de Janeiro visto que há boa correlação entre os dados estimados e observados nas escalas sazonal e anual. O algoritmo SEBAL pode ser utilizado para outros fins, particularmente para estudos de Ilha de Calor Urbano e Qualidade do Ar.

Vale ressaltar que um período maior de dados de temperatura do ar da Cidade do Rio de Janeiro e uma ferramenta estatística multivariada se faz necessário para identificação do padrão entre situação pré-frontal associada a ocorrência de La Niña.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Previsão e Estudos Climáticos (CPTEC) / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por ceder gentilmente os dados climáticos do boletim CLIMANÁLISE e imagens para a realização deste estudo. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo dos alunos de Doutorado do PPGCAF e PEM/COPPE.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; BORNAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v.81, n. 4, p.650-662, 1989.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). **Advance Training and Users Manual – Idaho Implementation**, version 1.0. 2002.

BARROS, H. R. de.; LOMBARDO, M. A. A relação entre ilhas de calor urbana, ocupação do solo e morfologia urbana na cidade do Recife. **Revista Geonorte**, Edição Especial 2, v. 2, n. 5, p. 65 – 76, 2012.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212-213, p. 198-212, 1998.

CHANDER, G.; MARKHAM, B.; HELDER, D. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 5, p. 893 - 903, 2009.

CPTEC – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. **Boletim Climanálise**. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/>. Acesso em: 14 Ago 2013.

CORRÊA, E. B. **Avaliação do Sistema Combinado de Modelagem MM5/CALMET na Representação da Circulação Atmosférica da Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. M.Sc. (Dissertation) – COPPE/UFRJ, 2008, 208p.

COSTA, D. F.; SILVA, H. R.; PERES, L. F. Identificação de ilhas de calor na área urbana de Ilha Solteira - SP através da utilização de geotecnologias. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 30, n.5, p.974-985. 2010.

DELGADO, R. C.; RODRIGUES, R. A.; FARIA, A. L. L.; PESSÔA, C. S.; DAHEER, M. Uso do sensoriamento remoto na estimativa dos efeitos de ilhas de calor. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n.25, p. 69-80, 2012.

DELGADO, R. C.; SOUZA, P. L.; SILVA, I. W. R.; PESSÔA, C. S.; GOMES, F. A. Influência da mudança da paisagem amazônica no aumento da precipitação em Cruzeiro do Sul, AC. **Revista Enciclopédia Biosfera**, v.8, n.14, p. 665-674, 2012.

HOLZ, S.; LORENA, R. B.; MARCHIORO, E. O uso do sensoriamento remoto para análise do campo térmico da superfície urbana completa do município de Vitória (es). **Revista Geonorte**, Edição Especial, v.2, n.4, p.1674-1682, 2012.

HONORATO, A. F. A.; ANDRADE, V. S. A.; Ilhas de calor e frescor na área urbana da cidade de Aquidauana-MS. **Revista Geonorte**, Edição Especial, v. 2, n.4, p.878 – 886, 2012.

KATO, S.; YAMAGUCHI, Y. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, n. 1, p. 44-54, 2005.

KOUSKY, V.E.; GAN, M.A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, v. 36, n. 6, p. 538-551, 1981.

LYRA, G. B.; ODA-SOUZA, M.; VIOLA, D. N. Modelos Lineares Aplicados À Estimativa da Concentração do Material Particulado (PM10) na Cidade do Rio de Janeiro, RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.26, n. 3, p. 392 - 400, 2011.

MARENGO, J. A. **Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade – caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI**. 2 ed. Brasília, Ministério do Meio Ambiente/ Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 2007.

MONTEIRO, C. A. F. **O clima e a organização do espaço no estado de São Paulo**. Série Teses e Monografias, n. 28, São Paulo: USP/Igeog, 1976. 54p.

MORAES, N. O.;PIMENTEL, L. C. G.; MARTON, E. Simulações Numéricas da Formação de Ilha de Calor na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências (Rio de Janeiro)**, Universidade Federal do RJ, v. 28 2, p. 116-138, 2005.

MORAES, N. O.; CORREA, E. B.; MARTON, E.; PIMENTEL, L. C. G. Formação de Ilha de Calor Urbana e suas Relações com os Efeitos Sinóticos. **Ciência e Natura**, v. 2, p. 227-231, 2003.

PAOLINI, L. Análisis de la respuesta de la temperatura de superficie al crecimiento urbano utilizando series temporales MODIS. **Revista de Teledetección**, v. 38, p. 28-35, 2012.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; Deering, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, 1973. v.1, p.309-317.

SOUSA JÚNIOR, M. A.; LACRUZ, M. S. P. Monitoramento de desastres naturais utilizando imagens MODIS – estudo de caso: Pantanal. In: **I Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, Campo Grande, Brasil, 11-15 novembro 2006, Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2006. v.1. p.739-748.

WENG, Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 4, p. 335-344, 2009.

ZERI, M.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F.; LYRA, G. B. Spatiotemporal analysis of particulate matter, sulfur dioxide and carbon monoxide concentrations over the city of Rio de Janeiro, Brazil. **Meteorology and Atmospheric Physics** v. 113, n. 1, 1-14, 2011.