

Mapeamento de temperaturas absolutas usado regressão múltipla e dados orbitais

Pabrcio Marcos Oliveira Lopes ¹
Marcos Adami ¹
Enio Bueno Pereira ¹
Maurício Alves Moreira ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{pabrcio, adami, mauricio}@dsr.inpe.br
{pabrcio.lope, enio.pereira}@cptec.inpe.br

Abstract: This work aims at the determination of the climatological of absolute the maximum and minimum air temperatures for the implementation in the quality control of data gathered from the SONDA network over the Brazilian territory. This approach employs orbital data and multiple regression techniques. The data of absolute maximum and minimum temperatures were observed between the years of 1961 and 1990 in 204 meteorological stations. Information on the topography was obtained from the program *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). The outputs from the multiple regression models were validated with observation values of a subset of 30 meteorological sites that were not included in the original dataset used in the multiple regression. The statistical analysis was carried out using bootstrap techniques. The results show that the multiple regression for absolute minimum temperatures presented good agreement with the observed data ($R^2 = 0.86$) not presenting trends to overestimation. For the absolute maximum temperatures the results were not as satisfactory. The absolute minimum varied between -12 to 25°C and the absolute maximum between 31 and 42°C . In a first approach, the limits of the absolute minimum can be used for data quality control.

Palavras-chave: maximum and minimum air temperatures, SRTM, bootstrap techniques, SONDA network.

1. Introdução

A atmosfera desempenha um papel termo-regulador do clima terrestre. Os gases atmosféricos absorvem parte da radiação emitida pela superfície terrestre, aquecendo a atmosfera. No entanto, imensas quantidades de gases de efeito estufa estão aumentando a temperatura do planeta. Os principais responsáveis pelas emissões dos gases dióxido de carbono, metano, óxido de nitrogênio e monóxido de carbono são os combustíveis fósseis (petróleo emite 50%), as aplicações das indústrias químicas (20%), a mudança do uso de terra (15%) e o desmatamento (15%) (Hamburg et al., 2000). As conseqüências do aquecimento global vêm sendo assistidas em diversos locais no mundo. O derretimento das geleiras no pólo Norte, a seca severa na Amazônia, o ciclone extratropical no Sul do Brasil exemplificam algumas das respostas da natureza à degradação ambiental imposta pelo homem ao longo de décadas.

O monitoramento do clima passou a ser uma preocupação mundial. A simulação de cenários futuristas climáticos confiável será possível se medirmos precisamente os elementos do tempo meteorológico presente. Neste contexto, o Projeto Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais – SONDA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE vem realizando medições meteorológicas em vários sítios experimentais espalhados pelo território brasileiro (www.cptec.inpe/sonda). Os sensores instalados nas plataformas da rede SONDA medem os elementos climáticos em escala de tempo variável. No entanto, é preciso garantir a qualidade da informação coletada nesses sítios para que sejam usadas na validação de modelos de previsão do tempo e do clima e de radiação solar (Mcarthur, 2004). Para isso, no projeto SONDA, programas computacionais específicos foram desenvolvidos para sinalizarem dados meteorológicos suspeitos ou não de acordo com os limites estabelecidos para cada variável (Martins et al., 2005).

Os limites de validação da temperatura do ar são escolhidos segundo as observações das temperaturas máximas e mínimas absolutas nos locais de instalações das estações da rede SONDA. Essas temperaturas representam a maior máxima e a menor mínima observadas em um determinado período. As temperaturas máximas e mínimas absolutas observadas em abrigos meteorológicos em um dado local, estão associadas aos elementos e fatores climáticos tais como: radiação solar incidente, cobertura de nuvem, teor de umidade do ar e do solo, velocidade e direção do vento, topografia, altitude e latitude do local, além da cobertura e tipo de solo e o efeito da continentalidade (Taylor, 1971; Linacre, 1982; Oke, 1987). Vários estudos têm utilizado a latitude, a longitude e a elevação para espacializar as temperaturas mínima e máxima do ar (Yoshino, 1975; Pinto e Afonsi, 1974; Valeriano e Picini, 2000; Astolpho et al., 2005). Contudo, nem sempre essas informações existem para localidades específicas do território nacional. Neste sentido, torna-se necessária a interpolação espacial de cada variável observada separadamente para produzir estimativas para locais não amostrados. Desse modo, este trabalho tem como objetivo utilizar técnicas de regressão múltipla e geoprocessamento para estimar as temperaturas máximas e mínimas absolutas do ar sobre o território Brasileiro, determinando os limites dessas variáveis para serem utilizadas nos programas de qualificação da rede SONDA.

2. Materiais

2.1. Área de estudo e dados utilizados

A área de estudo é mostrada na Figura 1. As estrelas indicam a localização das estações meteorológicas distribuídas sobre o mapa de elevação do terreno. Observa-se que as regiões de menores altitudes (0 a 200m) encontram-se localizadas no litoral, Amazônia, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, aumentando ligeiramente (200 a 3000m) na direção das serras gaúchas, catarinenses, paranaenses, paulistas e mineiras localizadas no Sul e Sudeste do Brasil.

Os dados de elevação do terreno foram obtidos de uma resolução espacial de 90m pertencente ao programa *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (Rabus et al., 2003).

As temperaturas máximas e mínimas absolutas em abrigo meteorológicos (1,5m de altura) foram observadas no período de 1961 a 1990 em 204 estações meteorológicas (DNMET, 1992). A maior parte dessas estações tem mais de 30 anos de observações da maior máxima e da menor mínima temperatura do ar em abrigos meteorológicos.

Os limites da América do Sul foram obtidos na página da Divisão de Processamento de Imagem – DPI do INPE (www.dpi.inpe.br/spring/portugues/banco.html).

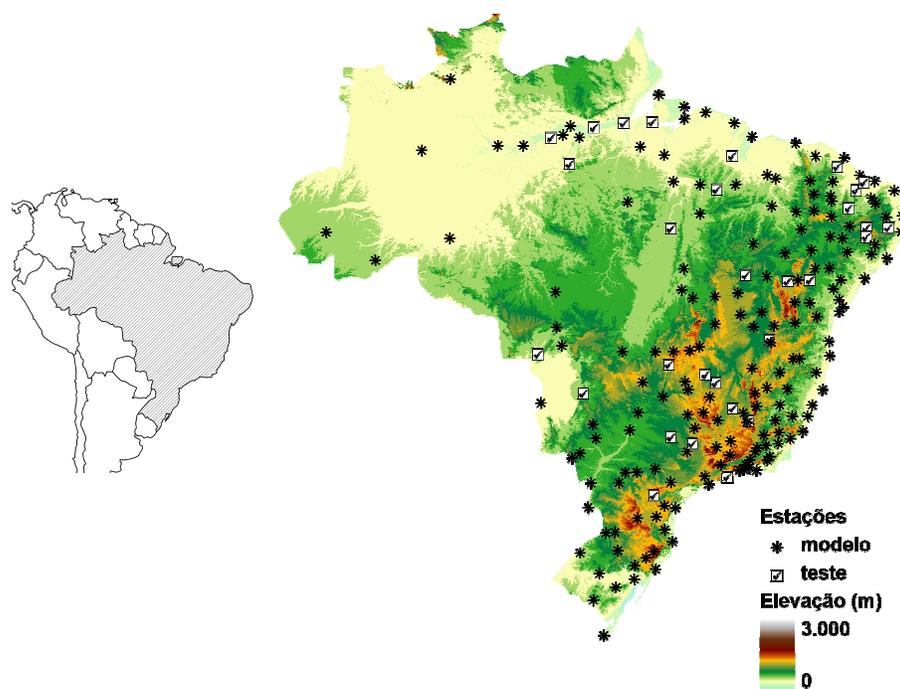


Figura 1. Localização das estações meteorológicas no território brasileiro.

3. Método

Para simplificar o mapeamento das temperaturas máximas e mínimas absolutas, T_x e T_n , foram utilizadas as informações de elevação, latitude, longitude e distância do oceano Atlântico até o local de interesse. As etapas de processamentos são descritas como segue.

Inicialmente foram obtidas as temperaturas T_n e T_x absolutas observadas em cada uma das 204 estações meteorológicas do INMET. Esses dados foram checados para o caso em que $T_n > T_x$. Nenhum caso foi verificado.

Posteriormente foram obtidos os valores de altimetria (ALT), utilizando os dados do SRTM.

Dada a dimensão da área de estudo, estes valores foram reamostrados de 90m para 1km de resolução espacial.

Em seguida, obteve-se a linha de costa, para toda a América do Sul, sendo que a mesma foi separada em duas, uma referente ao oceano atlântico e outra referente ao oceano pacífico. A partir destas linhas, foram criados dois mapas de distância, um referente à distância do atlântico (D_ATL) e outro referente à do pacífico (D_PAC), com a mesma resolução espacial dos dados de elevação.

Para cada estação foram obtidos os valores de ALT, D_ATL, D_PAC, bem como a posição geográfica, em metros (X, Y).

Realizada esta operação, foram selecionadas aleatoriamente 30 estações para servirem de teste para o modelo (Figura 1). Estas 30 estações não participaram da estimativa de regressão multivariada.

Após a análise dos resíduos, obtenção dos coeficientes de regressão e verificação da significância dos mesmos foi aplicada à função para estimar T_n e T_x .

Os dados estimados para 30 estações foram comparados com os dados observados por meio de regressão linear, cujas hipóteses testadas foram que o intercepto (β_0) fosse igual a zero e que a inclinação da reta (β_1) fosse igual a um, pois dessa forma tem-se que as estimativas não apresentam deslocamentos constantes e nem tendências. Os valores de β_0 e

β_1 foram estimados por meio da técnica de *bootstrap* (Efron, 1982) utilizando 10.000 repetições.

4. Resultados e discussão

A regressão múltipla aplicada aos valores diários de temperaturas mínimas absolutas T_n medidos por termômetro de mínima às 08GMT (*Greenwich Mean Time*) é estimada de acordo com a Equação 1:

$$T_n = -16,52 + 1,35 \cdot 10^{-6} \cdot D_ATL + 1,30 \cdot 10^{-5} \cdot ALT - 8,26 \cdot 10^{-6} \cdot X + 1,84 \cdot 10^{-6} \cdot Y \quad (1)$$

Nota-se que a distância do pacífico (D_PAC) foi retirada do modelo de T_n devido a relação que a mesma possui com a latitude, evitando assim problemas de multicolinearidade.

O modelo de regressão múltipla de T_n apresentado foi validado com valores observados em locais diferentes daqueles que o geraram. Verificou-se que o erro médio quadrático (RMS) desta estimativa foi de 2,46 °C. A Figura 2 apresenta a equação de ajuste entre os dados estimados e os observados, bem como os resultados de correlação (r), intercepto (b_0) e inclinação da reta (b_1) estimados por meio da técnica de *bootstrap*. Por esta Figura pode-se observar que há probabilidade da equação passar pela origem, o que garante que não ocorra deslocamento da medida, e a inclinação da reta ser igual a um, o que indica não haver tendência de superestimar ou subestimar a T_n . Astolpho et al. (2005) utilizaram o modelo de regressão múltipla para caracterizar a variabilidade espacial T_n anual entre as coordenadas geográficas das estações meteorológicas de São Paulo e a altitude. Os autores encontraram equações finais geradas pela regressão múltipla com R^2 entre 0,87 e 0,90.

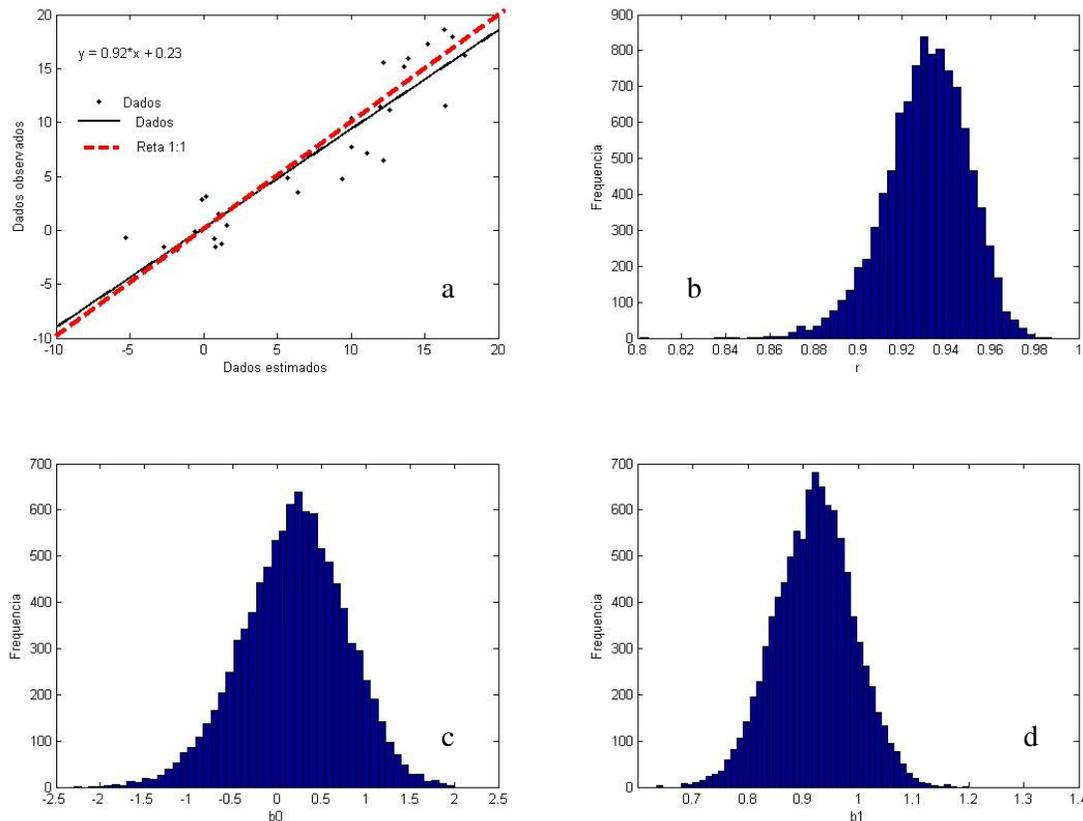


Figura 2. Resultados da validação da estimativa de temperatura mínima absoluta do ar. a) Gráfico de dispersão entre os dados observados e os dados estimados; b) coeficiente de correlação (r); c) intercepto; e d) inclinação da reta.

O resultado da aplicação do modelo de regressão múltipla para estimar a T_n em abrigos meteorológicos (1,5m de altura do solo) é apresentado na Figura 3. Nesta Figura, pode-se observar o efeito da topografia local na T_n . O intervalo da T_n oscilou entre -12 a 25°C, ressaltando-se como as regiões mais frias do Brasil as serras gaúchas, catarinenses, paranaenses, paulistas e mineiras e como as mais quentes o litoral do Nordeste e as regiões no entorno do rio Amazonas. Estes resultados estão em concordância com Larcher (1986) que mostrou a distribuição global de baixas temperaturas, destacando episódios de geadas para T_n até -10°C no Sul e Sudeste do Brasil.

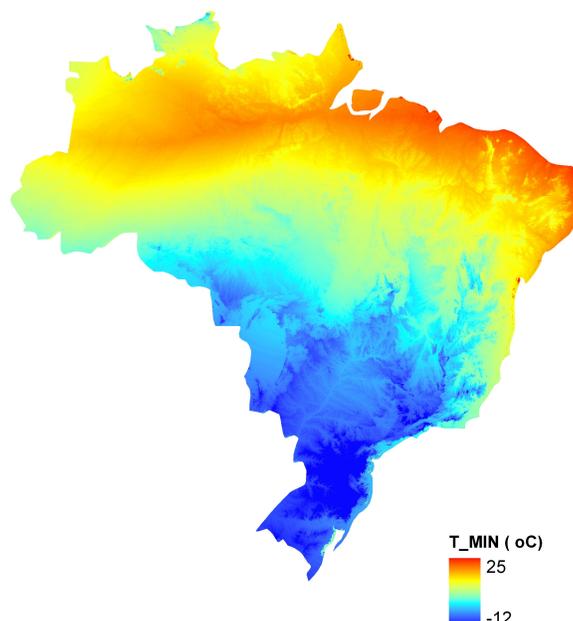


Figura 3. Mapeamento da temperatura mínima absoluta usando o modelo de regressão múltipla, técnica de interpolação e dados orbitais para todo o território brasileiro.

O modelo de regressão múltipla para a estimativa da temperatura máxima absoluta (T_x) foi desenvolvido utilizando as mesmas variáveis usadas para calcular a T_n e é apresentado pela Equação 2.

$$T_x = 49,27 + 1,77 \cdot 10^{-5} \cdot D_{ATL} - 2,93 \cdot 10^{-3} \cdot ALT + 4,76 \cdot 10^{-6} \cdot X + 5,23 \cdot 10^{-7} \cdot Y \quad (2)$$

O modelo de regressão múltipla de T_x apresentado também foi testado com valores observados em locais diferentes daqueles que o geraram. Os resultados da validação do modelo de T_x mostraram que o erro médio quadrático (RMS) da estimativa T_x foi de 0,90 °C. A Figura 4 apresenta a equação de ajuste entre os dados estimados e os observados, bem como os resultados de correlação (r), intercepto (b_0) e inclinação da reta (b_1) estimados por meio da técnica de *bootstrap*. Por esta Figura pode-se observar que não há probabilidade da equação linear passar pela origem e nem da inclinação da reta ser igual a um, o que indica haver tendência de superestimar ou subestimar a temperatura máxima absoluta do ar.

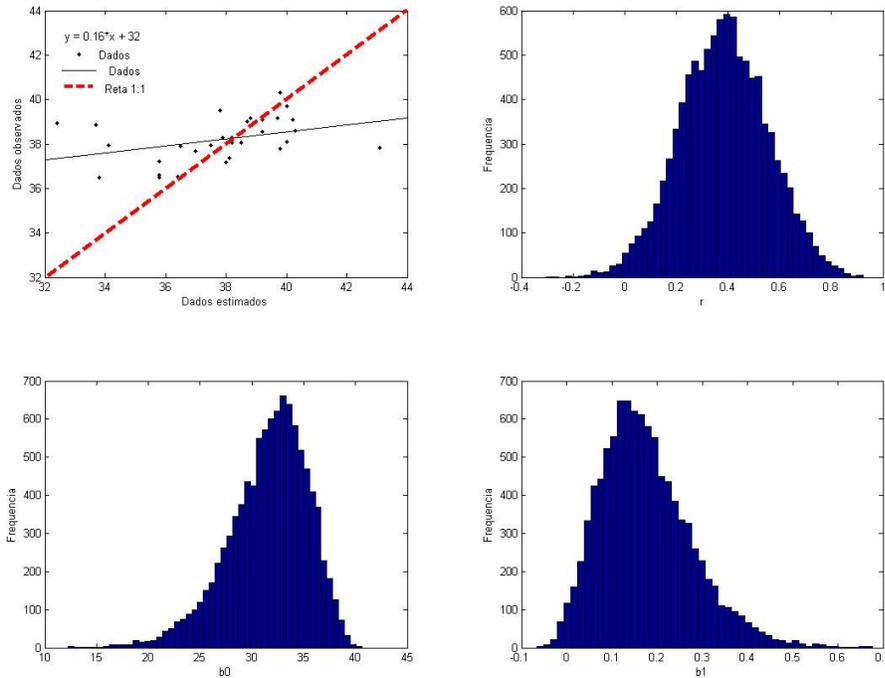


Figura 4. Resultados da validação da estimativa de temperatura máxima. a) Gráfico de dispersão entre os dados observados e os dados estimados; b) coeficiente de correlação (r); c) intercepto; e d) inclinação da reta.

O resultado da aplicação do modelo de regressão múltipla (Equação 2) para estimar a T_x é apresentado na Figura 4. A temperatura máxima absoluta, T_x , variou entre 31 a 42 °C. Nesta Figura, observar-se que a topografia local e o efeito de continentalidade não explicam a distribuição espacial de T_x .

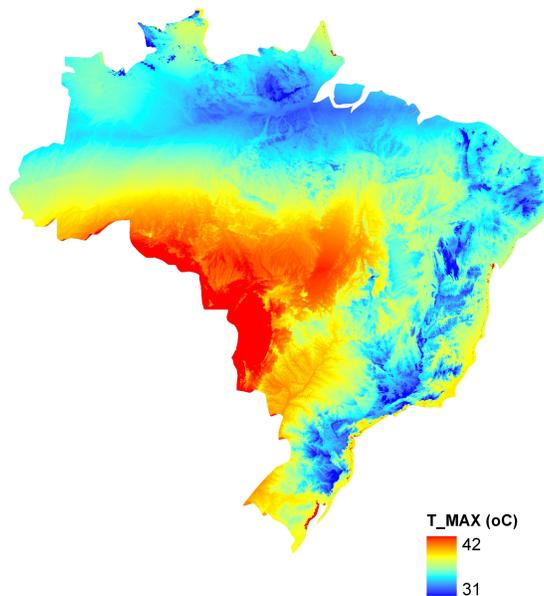


Figura 4. Mapeamento da temperatura máxima absoluta usando o modelo de regressão múltipla, técnica de interpolação e dados orbitais para todo o território brasileiro.

As variações em T_x sobre as encostas de uma montanha estão associadas ao aspecto, inclinação do terreno, cobertura e tipo de vegetação, condutividade térmica do solo, umidade

do ar e do solo, cobertura de nuvem e flutuações diárias de radiação (Taylor, 1976). Linacre (1982) tem analisado os resultados de 16 publicações científicas internacionais sobre os efeitos da altitude na amplitude térmica diária do ar. O autor constatou que a amplitude térmica aumenta entre 0 a 200m e diminui entre 750 e 3.400m.

Os efeitos da variabilidade de T_n e T_x absolutas em baixas altitudes podem ser atribuídos à influência da brisa marítima em locais próximo à costa do oceano Atlântico. A extensão da brisa marítima afeta a amplitude térmica para locais situados até 200 km da costa e elevados até 200m de altura (Linacre, 1982). A brisa marítima produz forte estabilidade térmica sobre o continente, pois ela é mais fria e úmida durante o dia. O ar frio em contato com a superfície terrestre diminui a magnitude das máximas absolutas, enquanto que a umidade reduz o resfriamento radiativo noturno, aumentando às mínimas absolutas.

A variabilidade na T_x e T_n absolutas em altitude superior a 700m pode está relacionada aos fortes ventos experimentados pelas encostas das montanhas, especialmente a barlavento que reduz a amplitude térmica (Barry, 1982). Além disso, a cobertura de nuvens também influencia na estimativa de T_x e T_n absolutas. Os ventos fortes retiram calor da superfície do solo diminuindo as máximas absolutas e elevando as mínimas pelo processo de condução e impedindo a formação de inversão térmica à noite. As nuvens reduzem o resfriamento noturno e aquecimento diurno da superfície, reduzindo a amplitude térmica (Oke, 1982). Em adição, a formação de ventos locais devido a diferenças termais entre vale e montanha e as flutuações diárias da radiação solar incidente em condições de céu claro ou de céu nublado afetam a espacialização da temperatura do ar, principalmente das máximas T_x (Taylor, 1976, Oke, 1987).

5. Conclusões

1. A temperatura mínima absoluta pode ser modelada por modelo de regressão múltipla com boa concordância ($R^2 = 0,86$). Os resultados da técnica de *bootstrap* não mostraram tendências superestimar ou subestimar T_n . Essa tendência foi verificada nas estimativas de T_x . Outros elementos e fatores climáticos ou ambientais estão afetando a estimativa de T_x .
2. Em uma primeira aproximação, os mapas de T_n e T_x podem ser usados para estabelecer os limites de validação dos dados de temperatura do ar medidos na rede SONDA. Os limites de T_n variaram entre -12 e 25°C, enquanto que T_x entre 31 a 40°C.

6. Referências bibliográficas

Astolpho, F.; Camargo, M.B.P.; Pedro Junior, M.J.; Pallone Filho, W.J.; Bardin, L. Regionalização de riscos de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais para o Estado de São Paulo com base em modelos probabilísticos e digitais de elevação. **Bragantia**, v.64, n.1, p.139-148, 2005, On-line. ISSN 0006-8705, Disponível em < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052005000100015>. Acesso em 11 nov. 2008.

Barry, R. G. **Mountain Weather and Climate** London and New York: Methuen, 1981, 313p.

Departamento Nacional de Meteorologia (DNMET). **Normais Climatológicas (1961-1990)**. Brasília: Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Secretária Nacional de Irrigação, 1992, 84p.

Efron, B. **The Jackknife, the Bootstrap and other resampling plans**. Society for industrial and applied mathematics, 1982. 92p.

Hudson, G.; Wackernagel, H. Mapping temperature using kriging with external drift: Theory and an example from Scotland, **International Journal of Climatology**, v.14, p.77-91, 1994.

Larcher, W. **Ecofisiologia vegetal** (Traduzido do Alemão por Antônio de Pádua Danesi e Hildegard T. Buckup). São Paulo : EPU, 1986, 319p.

- Linacre, E. The effect de altitude on the daily range of temperature. **Journal of Climatology**, v.2, p.375-382, 1982.
- Martins, F.R., Pereira, E.B.; Yamashita, C.; Pereira, S. V.; Neto, S.L.M. Base de dados climático-ambientais aplicados ao setor energético - Projeto SONDA. **Anais: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, 16-21 abril, INPE, p. 3563-3570, 2005.
- Mcarthur, L. J. B. WORLD CLIMATE RESEARCH PROGRAMME, Baseline Surface Radiation Network, **Operations Manual**, version 2.1, 2004.
- Moberg, A.; Jones, P. D. Regional climate model simulations of daily maximum and minimum near-surface temperatures across Europe compared with observed station data 1961–1990, **Climate Dynamics**, v.23, p.695–715, DOI 10.1007/s00382-004-0464-3, 2004.
- Oke, T.R. **Boundary layer climates**, London and New York: Methuen, 1987, 435p.
- Pinto, H.S.; Alfonsi, R.R. Estimativas das temperaturas médias máximas e mínimas mensais do estado do Paraná, em função de altitude e latitude. **Caderno de Ciências da Terra**, São Paulo, n.52, p.8, 1974.
- Rabus, B. M.; Eineder, A. R.; Bamler R. The shuttle radar topography mission- a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar, **Photogramm. Rem. Sens.**, v. 57, p. 241-262. 2003.
- Taylor, J. A. **Upland climates**, in Chandler, T.J.; Gregory, S. (eds.) *The Climate of the British Isles*, Longman, 1976, 264p.
- Valeriano, M. M. ; Picini, A. G. . Uso de sistema de informação geográfica para a geração de mapas de médias mensais de temperatura do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 8, n. 2, p. 255-262, 2000.
- Yoshino, M. **Climate in a Small Area**, Tokyo: Univ. Tokyo Press, 1975, 549p.