

UM ALGORITMO PARA DETERMINAR OS VALORES HORÁRIOS DAS TEMPERATURAS DO AR EM FUNÇÃO DAS NORMAIS CLIMATOLÓGICAS

Maurício Roriz

Programa de Pós-Graduação em Construção Civil - Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
Rodovia Washington Luís, km 235 - CEP 13565-905 - São Carlos - São Paulo - Brasil
e-mail: m.roriz@terra.com.br

RESUMO: Normais Climatológicas são médias estatísticas e valores extremos de dados obtidos ao longo de 30 anos de observação em determinada estação e constituem a única informação climática disponível para inúmeras localidades da América Latina. Entretanto, análises detalhadas dos desempenhos térmico e energético de edificações exigem o conhecimento de valores horários de alguns elementos do clima. Apresenta-se, neste artigo, o desenvolvimento de um algoritmo para estimar a oscilação horária das temperaturas do ar, como função das Normais Climatológicas.

Palavras chave: temperatura do ar, umidade do ar, modelagem climática.

INTRODUÇÃO

As oscilações horárias típicas da temperatura do ar derivam do ciclo diário de luz solar e escuridão, decorrente dos movimentos relativos entre a Terra e o Sol. A Terra absorve radiação solar desde o nascer até o pôr do Sol (Fig. 1) e, por outro lado, emite constantemente radiações para as camadas altas da atmosfera. Em cada momento, a temperatura superficial do solo é função de seu calor específico e do balanço térmico entre a energia recebida e a emitida. Quanto mais alta for a temperatura superficial, maiores serão as taxas de perdas de calor. Sob condições normais, a radiação solar recebida é máxima ao meio-dia, mas a superfície do planeta continua se aquecendo até o momento do pôr do Sol. Sendo o ar atmosférico praticamente transparente para as radiações solares, seu principal processo de trocas de calor é por convecção com o solo. Assim, as temperaturas mínimas do ar acontecem aproximadamente no momento em que o Sol nasce, enquanto as máximas ocorrem no meio da tarde, entre 14 e 15 horas, quando a radiação emitida pela Terra ultrapassa a absorvida.

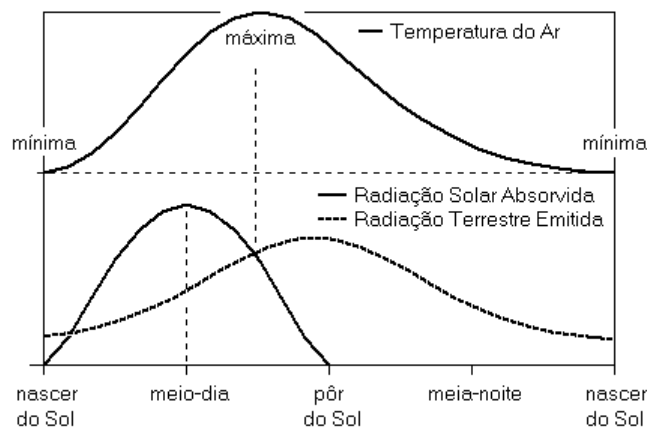


Figura 1. Temperatura do Ar, uma função do Balanço Térmico entre a Terra e o Sol

ANTECEDENTES

Diversos autores já propuseram métodos para estimar-se a evolução típica da temperatura do ar ao longo de um dia. Os primeiros destes métodos, ainda muito simplificados, resumiam-se em valores tabelados de um fator horário a ser aplicado sobre as temperaturas máximas e mínimas, obtidas nas normais climatológicas. Já há mais de quarenta anos, por exemplo, Berthier e Anquez (1964) mencionaram o “Método de Deplanches”, assim descrito:

$$T_h = T_{max} - F_h (T_{max} - T_{min}) \quad [1]$$

Sendo:

T_h = Temperatura do ar na hora “h”

F_h = Fator de cálculo das temperaturas na hora “h”, conforme a Figura 2.

T_{min} e T_{max} = Médias mensais das temperaturas mínimas e máximas do ar, respectivamente.

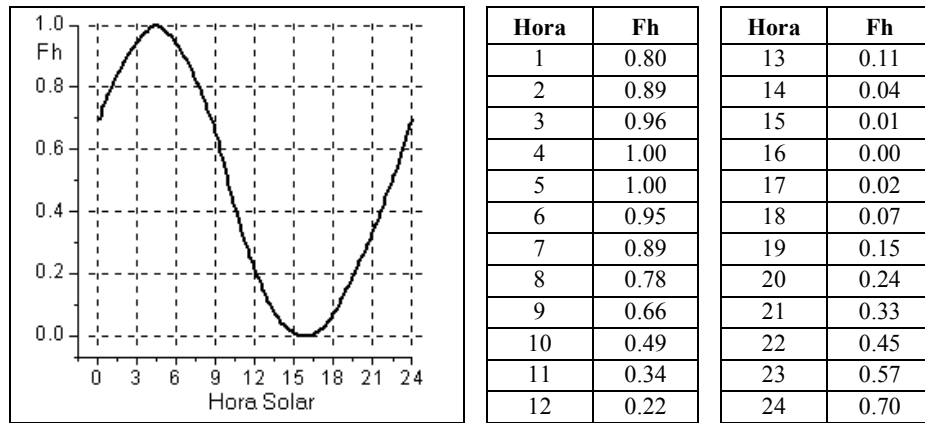


Figura 2. Fator Fh proposto por Deplanches, apud Berthier e Anquez (1964)

Posteriormente, Serra (1975) adaptou a tabela de Deplanches para horários compatíveis com os horários de temperaturas máximas e mínimas observados em algumas cidades brasileiras. A curva sugerida por Serra foi adotada por Roriz e Basso (1989) no programa computacional Arquitrop.

Outros estudos foram desenvolvidos na busca de curvas diárias típicas de cidades específicas. Com base na análise de dados horários medidos ao longo de 20 anos, por exemplo, Roriz (1996) formulou uma curva (Figura 3) para as oscilações típicas da temperatura do ar na cidade de São Paulo. Esta curva foi dividida em duas partes, uma para as primeiras doze horas após a ocorrência da temperatura mínima (Equação 3) e outra para o período restante do dia (Equação 4):

$$T_h = T_{min} + F_{Th} (T_{max} - T_{min}) \quad [2]$$

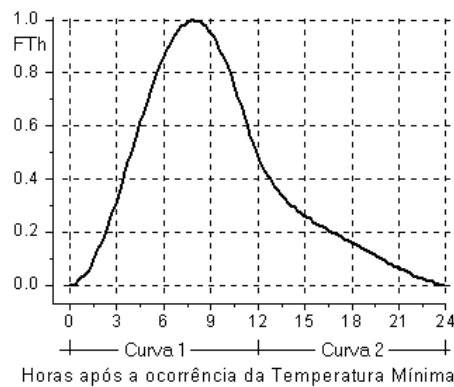


Figura 3. Equações de regressão do fator FTh (Roriz, 1996)

Curva 1:
$$F_{Th} = [1 + \text{sen}(\frac{-\pi}{2} + \frac{\pi \cdot h}{8})] / 2 \quad [3]$$

Curva 2:
$$F_{Th} = B_0 + B_1 \cdot h + B_2 \cdot h^2 + B_3 \cdot h^3 + B_4 \cdot h^4 + B_5 \cdot h^5 \quad [4]$$

Sendo:

FTh = Fator de cálculo da temperatura do ar no momento h

h = Horas após a ocorrência da temperatura mínima

π = Número "Pi" ($\pi = 3.1416$)

B0=20.52074

B1=-5.021

B2=0.4984

B3=-0.02462

B4=0.0006

B5=-0.000006

Sem restringir-se a uma cidade específica, Tejeda-Martínez (1991) sugere o seguinte procedimento para o cálculo dos valores horários da temperatura do ar:

$$T_h = T_{min} + F_h (T_{max} - T_{min}) \quad [5]$$

$$F_h = A \cdot T^B \cdot \text{Exp}(C \cdot T) \quad [6]$$

Sendo:

T_h = Temperatura do ar na hora "h"

T = h-HNS (para h ≥ HNS)

F_h = Fator de cálculo das temperaturas na hora "h"

T = h+24-HNS (para h < HNS)

T_{min} = Média mensal das temperaturas mínimas do ar

HNS = hora do nascer do Sol

T_{max} = Média mensal das temperaturas máximas do ar

A, B e C = parâmetros, função do clima do lugar (Tabela 1)

Meses	Latitude	A	B	C
Março a Outubro	Maior ou igual a 23.5	0.026	3.190	-0.375
Novembro a Fevereiro		0.023	3.436	-0.421
Todos	Menor que 23.5	0.096	2.422	-0.339

Tabela 1. Parâmetros da equação 6, propostos para cidades mexicanas (Tejeda-Martinez, 1991)

Observa-se que todos estes métodos de cálculo apresentam restrições, não podendo ser aplicados a qualquer localidade. A equação de Tejeda-Martinez, por exemplo, embora mais ampla, também depende de parâmetros específicos para cada lugar.

FORMULAÇÃO DE UM NOVO ALGORITMO PARA A OSCILAÇÃO DIÁRIA DA TEMPERATURA DO AR

Procurou-se, então, desenvolver um modelo de cálculo para os valores horários típicos da temperatura do ar, que fosse aplicável a diferentes latitudes e épocas do ano. Com este objetivo, foram analisados os arquivos climáticos de 64 cidades (Figura 4 e Tabela 2), sendo 38 americanas e 26 de outros continentes.

Estes arquivos fazem parte da base de dados do software Energy-Plus (www.energyplus.gov) e apresentam dados horários de anos climáticos típicos (TMY, ou "Typical Meteorological Year") de cada localidade. Na Tabela 2, os nomes dos países são indicados pelas siglas adotadas pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

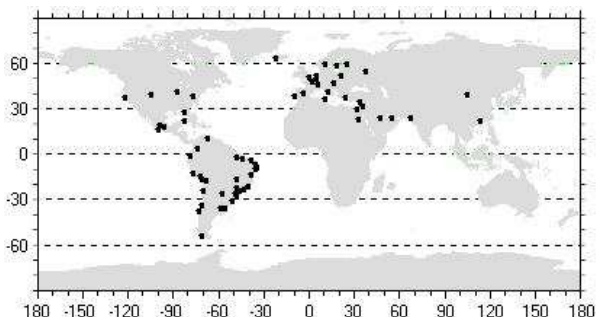


Figura 4. Localização das 64 cidades considerados

Lugar	Lat.	Lon.	Alt.
Abu Dhabi (ER)	24.4	54.7	27
Acapulco (MX)	16.8	-99.8	5
Amsterdã (NL)	52.3	4.8	-2
Antofagasta (CL)	-23.4	-70.4	120
Arequipa (PE)	-16.3	-71.6	2520
Asunción (PY)	-25.3	-57.6	101
Aswan (EG)	24.0	32.8	194
Athens (GR)	37.9	23.7	15
Belém (BR)	-1.4	-48.5	16
Bogotá (CO)	4.7	-74.1	2548
Boulder (US)	40.0	105.3	1634
Brasília (BR)	-15.9	-47.9	1060
Brussels (BX)	50.9	4.5	58
Buenos Aires (AR)	-34.8	-58.5	20
Cairo (EG)	30.1	31.4	74
Caracas (VE)	10.6	-67.0	48
Chicago (US)	41.8	-87.8	190
Concepción (CL)	-36.8	-73.1	16
Curitiba (BR)	-25.5	-49.2	910
Cuzco (PE)	-13.6	-72.0	3249
Denver (US)	39.8	-104.9	1611
Florianópolis (BR)	-27.7	-48.6	7
Fortaleza (BR)	-3.8	-38.5	25
Geneva (SW)	46.3	6.1	416
Havana (CU)	23.0	-82.4	59
Helsinki (FI)	60.3	25.0	56
Jerusalem (IS)	31.8	35.2	782
Karachi (PK)	24.9	67.1	22
La Paz (BO)	-16.5	-68.2	4042
Larnaca (CY)	34.9	33.6	2
Lima (PE)	-12.0	-77.1	13
Lisboa (PO)	38.7	-9.2	71

Lugar	Lat.	Lon.	Alt.
London (UK)	51.2	-0.2	62
Macau (UM)	22.2	113.5	86
Maceió (BR)	-9.5	-35.8	115
Madrid (SP)	40.5	-3.6	582
México (MX)	19.4	-99.1	2234
Montevideo (UY)	-34.8	-56.0	32
Moscow (RA)	55.8	37.6	156
Natal (BR)	-5.9	-35.3	49
Oslo (NO)	59.9	10.6	17
Paris (FR)	48.7	2.4	96
Porto Alegre (BR)	-30.0	-51.2	4
Punta Arenas (CL)	-53.0	-70.9	37
Quito (EC)	-0.2	-78.5	2812
Recife (BR)	-8.1	-34.9	11
Reykjavik (IL)	64.1	-21.9	61
Rio de Janeiro (BR)	-22.8	-43.3	5
Riyadh (SD)	24.7	46.8	612
Roma (IY)	41.8	12.2	3
Salvador (BR)	-12.9	-38.3	13
San Francisco (US)	37.6	-122.4	5
Santiago (CL)	-33.4	-70.8	476
São Carlos (BR)	-22.0	-47.9	854
São Luis (BR)	-2.6	-44.2	53
São Paulo (BR)	-23.6	-46.7	802
Sterling (US)	39.0	-77.5	82
Stockholm (SN)	59.7	18.0	61
Tampa (US)	28.0	-82.5	3
Tunis (TS)	36.8	10.2	4
Veracruz (MX)	19.2	-96.1	14
Vienna (OS)	48.1	16.6	190
Vitória (BR)	-20.3	-40.3	5
Warsaw (PL)	52.2	21.0	107

Tabela 2. Relação de 64 localidades consideradas na análise dos valores horários da Temperatura do Ar

Englobando latitudes desde 64° norte até 55° sul e altitudes desde o nível do mar a mais de 4000 m., esta base de dados pode ser considerada representativa de ampla diversidade climática. Por meio da análise estatística destes dados, obteve-se as seguintes equações para os valores horários típicos da temperatura do ar:

$$T_h = T_{min} + F_h (T_{max} - T_{min}) \quad [7]$$

$$F_{Th} = B_0 [1 + \text{Sen}(Z)] \quad [8]$$

$$Z = (1.5 \cdot \pi) + [(A - HNS - B_1) \cdot (\pi / B_2)] \quad [9]$$

Sendo:

T_h = Temperatura do ar na hora “h” (°C)

T_{min} = Média mensal das temperaturas mínimas do ar, disponível nas Tabelas de Normais Climatológicas

T_{max} = Média mensal das temperaturas máximas do ar, disponível nas Tabelas de Normais Climatológicas

F_{Th} = Fator de cálculo das temperaturas na hora “h” (adimensional)

Hns = Hora do nascer do Sol no dia considerado (ver Equação 10)

π = Número “Pi” ($\pi = 3.1416$)

A, B_0 , B_1 e B_2 = parâmetros calculados conforme a Tabela 3

Valores de A e H1	Para A menor ou igual a H1	Para A maior que H1
$A = h$ (para $h \geq Hns$)	$B_0 = 0.5$	$B_0 = 1.57865$
$A = h + 24$ (para $h < Hns$)	$B_1 = 0$	$B_1 = 24$
$H1 = 18 - (HNS / 4)$	$B_2 = 13 - 0.75 \cdot Hns$	$B_2 = (7.24167 + 0.8225 \cdot Hns) \cdot \pi$

Tabela 3. Parâmetros das equações 8 e 9

As equações 10 e 11 (Szokolay, 1983) fornecem a hora do nascer do Sol (Hns), em função da latitude e do dia:

$$Hns = 12 - \{ \text{ArcCos}[-\text{Tan}(\text{Lat}) \cdot \text{Tan}(\text{Dec})] / 15 \} \quad [10]$$

$$\text{Dec} = 23.45 \cdot \text{sen} [(360/365) \cdot (284 + Nda)] \quad [11]$$

Lat = Latitude do lugar (ângulo em graus), negativa para o hemisfério sul

Dec = Declinação média do Sol no dia considerado (ângulo em graus)

Nda = número do dia do ano, contado seqüencialmente desde 1 (1 de janeiro) até 365 (31 de dezembro)

A equação 10 permite também obter-se a hora do pôr do Sol ($Hps = 24 - Hns$) e a duração da insolação ($\text{Insol} = Hps - Hns$).

A Figura 5 apresenta os valores horários do fator F_{Th} , obtidos pela aplicação da Equação 8 para três diferentes momentos do nascer do Sol, respectivamente às 4, 6 e 8 horas. As influências da data e da latitude sobre o horário do nascer do Sol (Equação 10) são indicadas na figura 6.

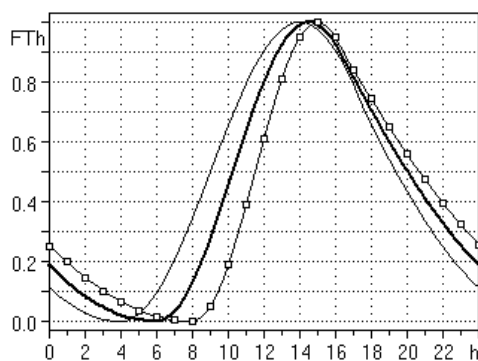


Figura 5. Variação do fator F_h para três horários do nascer do Sol: 4, 6 e 8 horas, conforme a equação 4.

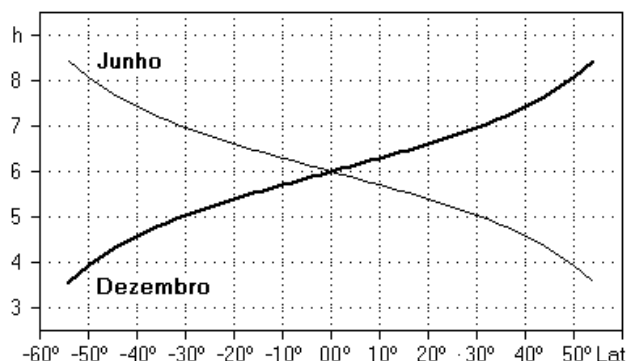


Figura 6. Horários do nascer do Sol, em 15 de junho e 15 de dezembro, para latitudes entre 50° Sul e 50° Norte

Na falta de informação mais precisa, costuma-se considerar a temperatura média diária (T_{med}) como média aritmética entre os valores extremos da temperatura do ar (T_{min} e T_{max}). Tal procedimento, entretanto, agrega um erro aos resultados dos cálculos, pois esta média deveria ser calculada com base nos 24 valores horários da temperatura do ar. Uma análise de regressão dos dados das 64 cidades indicou a seguinte relação entre os dois modos de cálculo:

$$T_{med} = (1.0037 \cdot T_{med1}) - 0.33935 \quad [12]$$

$$\text{Coeficiente de correlação} = 0.999 \quad \text{Desvio padrão} = 0.33$$

Sendo:

T_{med} = Média diária da temperatura do ar, calculada como média aritmética entre os 24 valores horários

T_{med1} = Média diária da temperatura do ar, calculada como média aritmética entre T_{max} e T_{min}

RESULTADOS OBTIDOS

Para avaliar a precisão do modelo aqui apresentado, valores horários estimados para as temperaturas do ar foram comparados com dados de dias médios mensais obtidos para cada uma das 64 localidades. As temperaturas de cada hora destes dias médios mensais foram consideradas como médias aritméticas entre os valores registrados na mesma hora em todos os dias do mês do ano climático típico (TMY).

A figura 7 mostra os resultados. Percebe-se, nessa figura, que a aplicação do modelo proporcionou forte correlação entre valores estimados e as médias horárias dos valores medidos, para os 17856 dados considerados. Observe-se, no entanto, que, como é normal em qualquer algoritmo de estimativa, este alto desempenho ocorre em relação a dias teóricos médios, não devendo ser esperado quando da aplicação do método para dias reais de algum lugar específico.

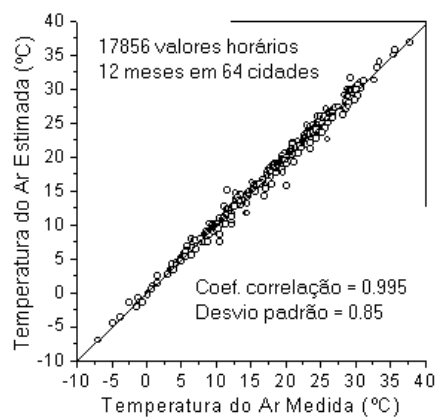


Figura 7. Temperaturas medidas e estimadas

As próximas figuras permitem comparar, para os dias médios de junho e dezembro das diversas cidades, as temperaturas obtidas pelas médias horárias dos valores medidos (indicadas por pontos na figura), com as curvas resultantes do algoritmo de cálculo (linhas contínuas). Apresenta-se, inicialmente, algumas situações em que o modelo de cálculo não proporcionou bons resultados. Entre estas, as mais evidentes, exemplificadas nas figuras 8 e 9, ocorrem durante o inverno em altas latitudes, em ambos os hemisférios. Para tais situações, é explicável a baixa concordância entre valores medidos e estimados. Por um lado, em latitudes muito altas, durante o inverno o sol nunca se eleva significativamente sobre o horizonte, reduzindo extremamente as cargas térmicas devidas à radiação e, por conseqüência, estabelecendo um comportamento climático diferente do padrão obtido estatisticamente para o conjunto das localidades e que foi adotado nos cálculos. Por outro lado, as violentas ventanias e tempestades de neve, típicas do inverno destes lugares, provocam instabilidades de difícil previsão.

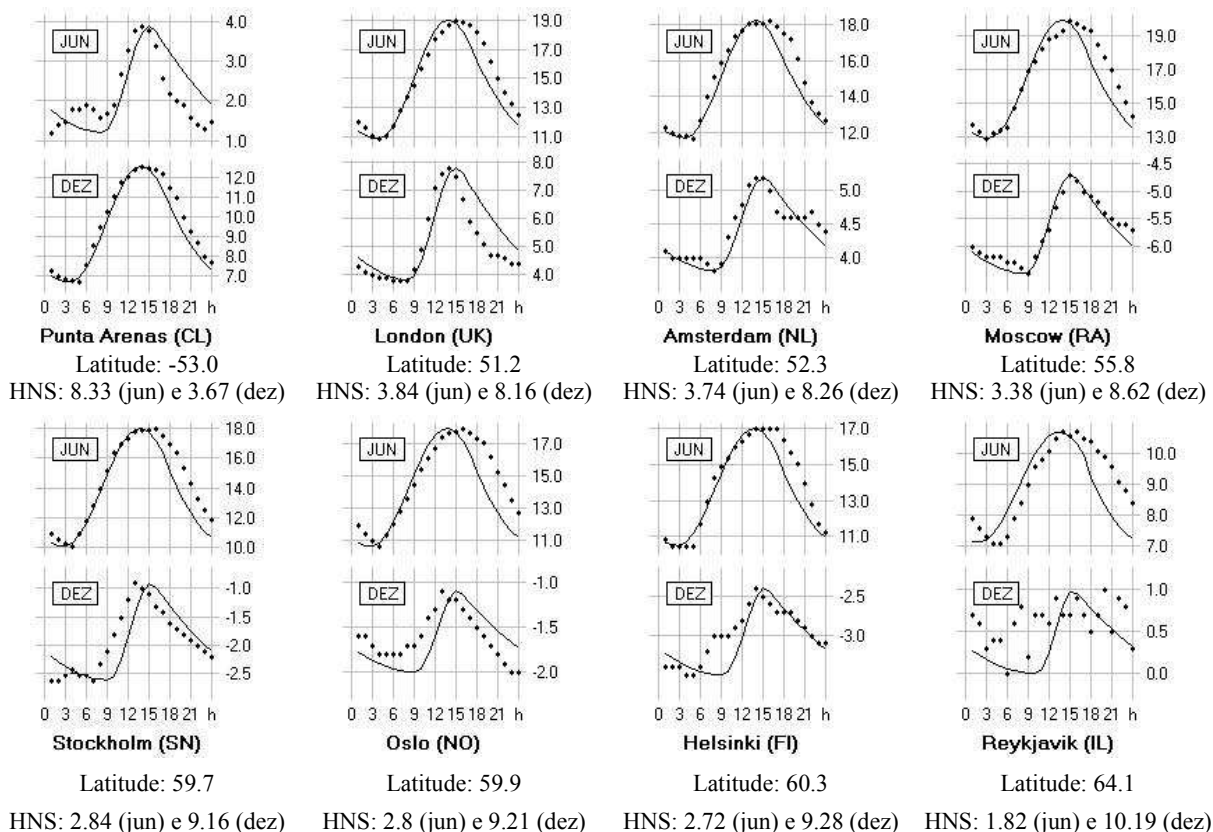


Figura 8. Exemplos de instabilidades climáticas durante o inverno em latitudes extremas, indicando os horários do nascer do Sol (HNS) calculados para os dias médios de junho e de dezembro.

Um segundo grupo de climas (Figura 9), apresentou valores inesperados nas médias horárias da temperatura do ar, sem que fossem identificadas as causas. Estes casos ocorrem em dezembro nas cidades de Atenas, Caracas, Geneva e Salvador, ou em junho, nas cidades de Arequipa e Madrid e não acompanham os padrões identificados no conjunto das outras localidades. Parte destas situações poderia originar-se de entradas de massas de ar frio, ou instabilidades provocadas por chuvas, nos períodos que constituem os respectivos anos climáticos (TMY) da base de dados. Nos casos de Arequipa (junho) e Caracas (dezembro), entretanto, desperta atenção a rapidez com que as temperaturas se elevam após o nascer do Sol, estabelecendo no gráfico uma linha quase vertical.

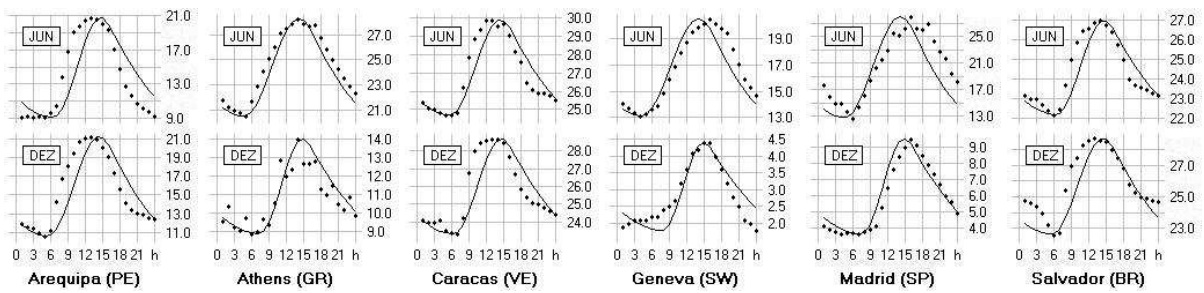


Figura 9. Casos de valores inesperados nas médias horárias, cujas causas não foram identificadas.

Os exemplos das outras 50 cidades estão apresentados a seguir (Figuras 10, 11 e 12) e demonstram as melhores correlações obtidas entre valores estimados e dados medidos.

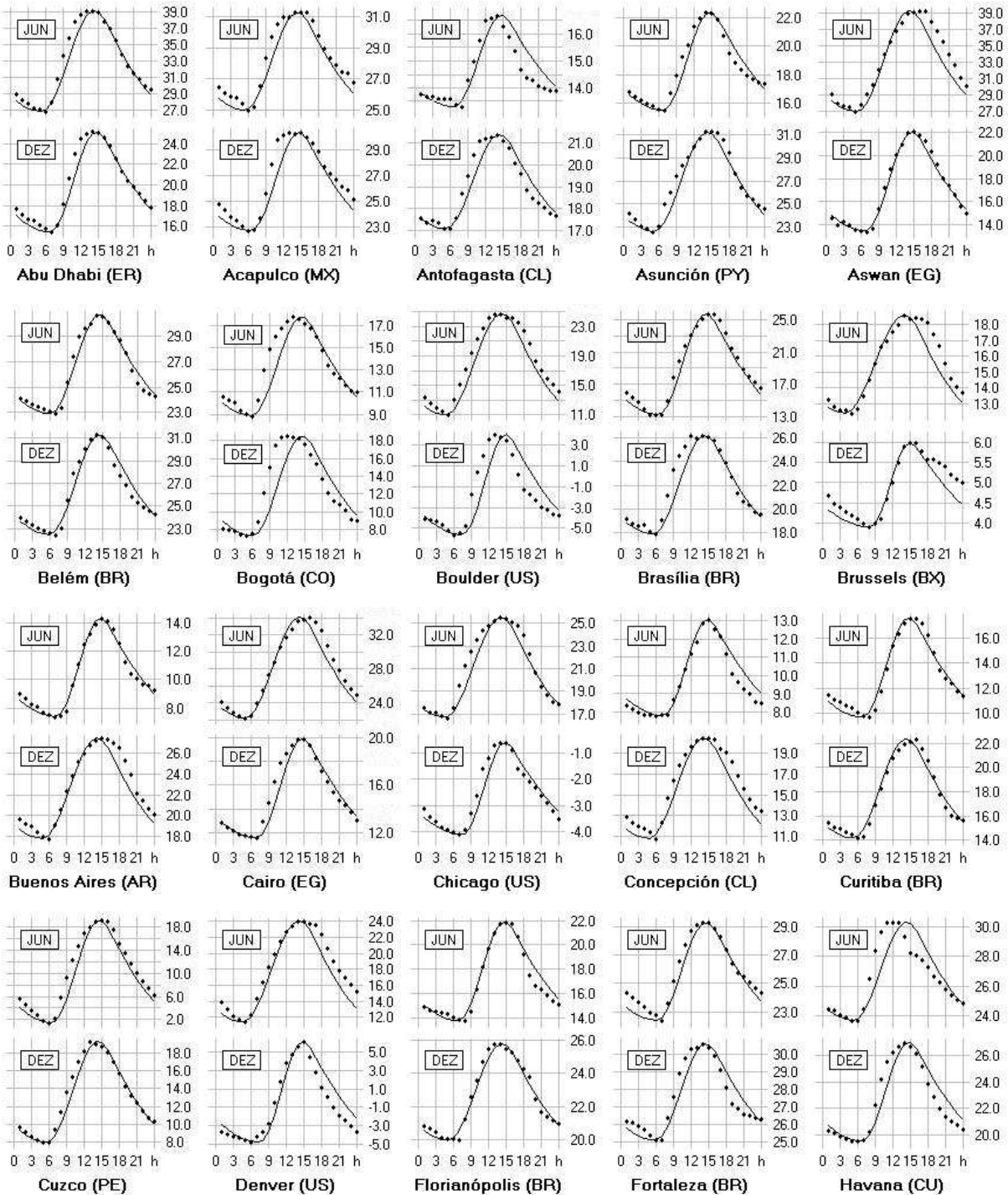


Figura 10. Correlações entre temperaturas horárias medidas e estimadas, para os dias médios de junho e de dezembro.

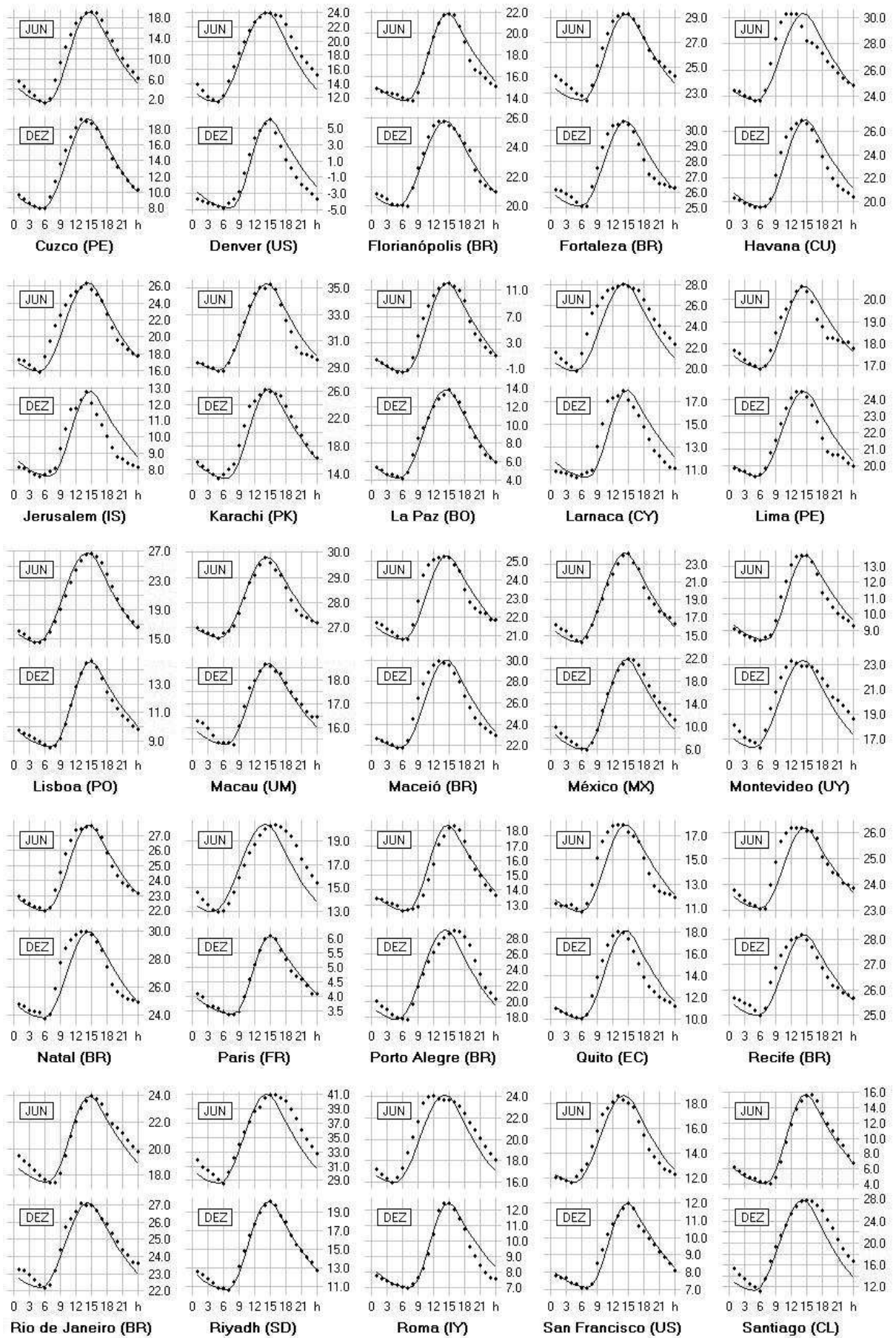


Figura 11. Correlações entre temperaturas horárias medidas e estimadas, para os dias médios de junho e de dezembro.

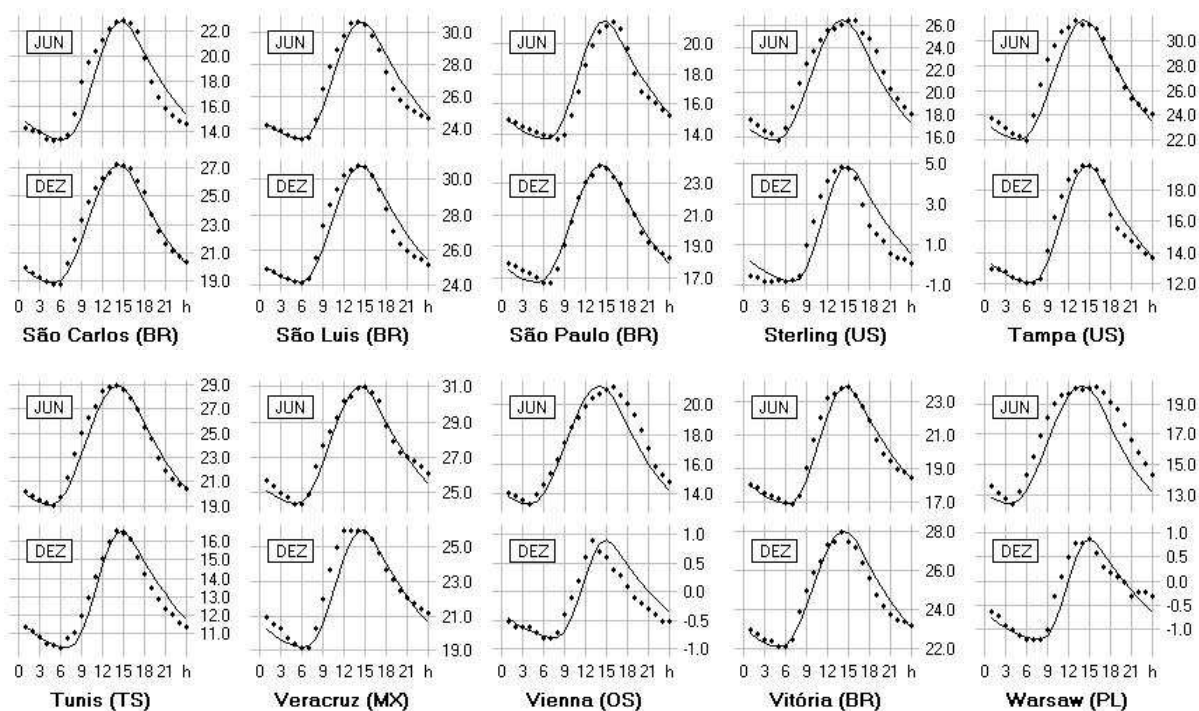


Figura 12. Correlações entre temperaturas horárias medidas e estimadas, para os dias médios de junho e de dezembro.

CONCLUSÕES

Apresentou-se um novo algoritmo de cálculo para os valores horários da temperatura do ar, como função das médias de temperaturas mínimas e máximas, disponíveis nas normais climatológicas. A aplicação deste algoritmo proporcionou resultados bastante satisfatórios para os climas típicos dos meses de junho e dezembro de 64 cidades, localizadas em diversos países e representativas de ampla diversidade climática. Em 114 das 128 curvas exemplificadas, que correspondem a 89% da amostra, o modelo teórico apresentou acentuadas correlações com os dias médios obtidos a partir dos dados medidos. Um método semelhante está sendo elaborado para o cálculo das oscilações diárias da umidade do ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE (2001). Fundamentals Handbook. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA.
- BERTHIER, J. e ANQUEZ, J. C. (1964). Temperatures Maximales Atteintes au Soleil par des Parois des Constructions. Cahier du CSTB. Paris, 66, fev.
- RORIZ, M. (1996). Conforto Térmico em Edificações – Um Modelo Matemático e uma Aplicação. Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo. São Paulo.
- RORIZ, M. e BASSO, A. (1989). Arqutrop – Conforto Térmico e Economia de Energia em Edificações. Programa Computacional. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.
- SERRA, Adalberto. (1975). Climatologia do Brasil. Boletim Geográfico, Rio de Janeiro, 102-3, out/dez.
- SZOKOLAY, S. V. (1983) Arquitectura Solar: Realización y Proyectos a Escala Mundial. Editorial Blume. Barcelona.
- TEJEDA-MARTÍNEZ, A. (1991) An exponential model of the curve of mean monthly air temperature. *Atmósfera* 4, 139–144. Ciudad de México.

RESUMEN: Normales Climatológicas son promedios estadísticos de datos obtenidos a lo largo de 30 años de observación en determinada estación y constituyen la única información climática disponible para muchas ciudades de América Latina. Pero análisis detallados de los desempeños térmico y energético de edificaciones exigen el conocimiento de valores horarios de algunos elementos del clima. Se presenta, en este artículo, el desarrollo de un algoritmo para estimar la oscilación horaria de las temperaturas del aire, como función de las Normales Climatológicas.

ABSTRACT: Climatological Normals are statistical averages computed for long periods comprising at least 30 consecutive years and they constitute the only available climatic information for several cities of Latin America. However, detailed analyses of thermal and energy performance of buildings demand the knowledge of hourly values from some elements of the climate. This paper presents the development of an algorithm to predict the hourly oscillation of the air temperatures as function of Climatological Normals.