

ISSN 0104-1347

Ajuste do ciclo médio mensal horário da temperatura do solo em função da temperatura do ar

Adjustment of the hourly monthly average cycle on soil temperature as a function of air temperature

Tarik Rezende de Azevedo¹ e Emerson Galvani¹

Resumo - No presente trabalho, apresenta-se um aperfeiçoamento no método de estimativa da temperatura do solo em função da temperatura do ar determinada em abrigo meteorológico, aplicando modelo de regressão linear. A proposta baseia-se na hipótese de que a média horária da temperatura do solo em determinada profundidade, num mês específico, é função da média horária da temperatura do ar com algumas horas de atraso. O trabalho baseou-se num segmento de dez anos (1993 a 2002) da série de dados de temperatura do solo e do ar registradas na Estação Meteorológica da Água Funda, em São Paulo, SP (23°39'S; 46°37'W; 800m). A bateria de geotermômetros está instalada em um latossolo desnudo, plano, nas profundidades de 0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 m. Os resultados mostram melhora de até 69% nos coeficientes de determinação obtidos da relação entre a temperatura do ar e temperatura do solo nas diferentes profundidades se considerado o atraso da propagação da onda de calor. O método proposto pode ser aplicado a outros tipos de solo e condição climática até a escala horária média mensal.

Palavras-chave: temperatura do solo, condutividade térmica do solo, temperatura do ar.

Abstract - This paper presents a method for estimating soil temperature as a function of air temperature measured under meteorological shelter conditions. The methodology is based on the hypothesis that the hourly average of soil temperature at a given depth throughout a month is a function of air temperature with some lagging hours. To achieve the ultimate goal of the current study, a ten-year series (1993-2002) of data of soil and air temperature was collected from the weather station of Água Funda, São Paulo, SP, Brazil (23°39'S; 46°37'W; 800m). The geothermometers were installed in a bare plain oxisoil at 0; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4 m-depth. The results obtained showed an improvement up to 69 per cent on the determination coefficients faced with the relationship between air and soil temperatures within different depths taking into account the lagging over heat wave propagation. The proposed method, however, might be applied to other types of soils and climatic conditions based in hourly monthly average basis.

Key words: soil temperature, soil thermal conductivity, air temperature.

Introdução

O solo funciona como um *reservatório* de calor que libera/armazena energia em escala diária, sazonal e anual. O solo aquece e resfria a partir do balanço de energia na interface superfície do solo-atmosfera, o que resulta na propagação de uma onda

de calor, por condução, para as camadas inferiores do solo. Da mesma forma é transferido calor para a atmosfera por condução e principalmente por convecção.

Para quantificar este trânsito de energia no solo, faz-se o uso de fluxímetros. Contudo, em função do custo de aquisição e dispêndio operacional,

¹Prof. Dr. do Laboratório de Climatologia e Biogeografia, Departamento de Geografia, FFLCH, USP. Av. Prof. Lineu Prestes, 338, São Paulo, SP, CEP 05508-900. E-mail: xtarikx@usp.br; egalvani@usp.br

essas medidas somente são efetuadas em estudos específicos e de curta duração, não existindo até o momento séries longas de observação direta desta grandeza. Uma maneira indireta de conhecer este fluxo de energia consiste em medir a temperatura do solo, com uso de geotermômetros, em diferentes profundidades.

O conhecimento da variação horária, diária, estacional e anual da temperatura do solo é fundamental para regiões e épocas do ano nas quais sua variação possa inibir ou prejudicar o desenvolvimento do sistema radicular das culturas. A temperatura do solo é um dos fatores determinantes da velocidade de germinação das sementes e de desenvolvimento das plântulas, sendo sua influência maior nos subperíodos de semeadura-emergência e crescimento inicial. Nestes períodos, tendem a ocorrer acentuadas amplitudes térmicas diárias, principalmente próximas à superfície do solo, justamente pela falta de cobertura (SCHNEIDER et al, 1993). Algumas hortaliças como beringela, pimentão, tomateiro e melão, por exemplo, encontram temperaturas do solo adequadas de desenvolvimento entre 15 e 20 °C (CASTILLO, 1983).

Por meio de diferentes técnicas procura-se relacionar a temperatura do solo em diferentes profundidades com aquela obtida para o ar, no abrigo meteorológico padrão (1,5 m acima do solo): OLIVEIRA et al. (1979), STATHERS et al. (1985), TENGE et al. (1998) e KANG et al. (2000) utilizaram séries finitas de Fourier; GEORGE (2001) trabalhou com redes neurais; DECICO et al. (1977) e BRUNINI et al. (1976) trabalharam com equações diferenciais e; BERGAMASCHI & GUADAGNIN (1993) e ALFONSI & SENTELHAS (1996) aplicaram modelos de regressão linear.

O uso do modelo de regressão linear apresenta grande praticidade à aplicabilidade. Contudo, nem sempre o valor da temperatura do ar de um determinado instante guarda relação direta com a temperatura no interior do solo. A onda de calor, ao percorrer o solo, tem sua amplitude progressivamente atenuada em função da profundidade. Além disto, as temperaturas extremas em determinada profundidade ocorrem em atraso em relação à temperatura da superfície (REICHARDT, 1993). Assim, o uso de modelos de regressão linear a partir da relação direta entre temperatura do solo e do ar a 1,5 m de altura pode não descrever fidedignamente a variação da onda de calor, principalmente quando se trabalha em escalas

de tempo da ordem de horas e dias. Como a temperatura do solo e a temperatura do ar são condicionadas, em parte, pelos mesmos elementos climáticos, em certas condições de contorno obtém-se uma boa relação entre esses elementos. Quando se trabalha com médias mensais, por exemplo, esse atraso na propagação da onda de calor no interior do solo na escala horária acaba sendo diluído e suplantado pela variação sazonal dos níveis de energia no local.

Até recentemente, a maior parte dos registros agrometeorológicos era oriunda de postos convencionais baseados em observação humana direta de instrumentos em horários padronizados e/ou redução de diagramas de instrumentos registradores.

Assim, os métodos propostos por ALFONSI & SENTELHAS (1996), por exemplo, basearam-se nas observações às 7, 14 e 21 horas e BERGAMASCHI & GUADAGNIN (1993) em observações das 9, 15 e 21 horas para as quais há dezenas de anos de registros em centenas de postos meteorológicos pelo Brasil.

Estudos comparativos entre observações de temperatura do ar efetuada em EMA e estações meteorológicas convencionais tem constatado boa concordância (SENTELHAS et al., 1997; FISCH & SANTOS, 1997; SOUZA et al., 2000 e 2002).

No presente trabalho, o objetivo é propor-se um método de estimativa da média mensal da temperatura horária do solo em diferentes profundidades a partir da média mensal da temperatura horária do ar obtida em abrigo padrão no qual se considerou o atraso da propagação da onda do calor no solo, pela aplicação do modelo de regressão linear.

Material e métodos

O trabalho foi baseado nos dados de um período de dez anos (1993 a 2002) da série de temperaturas do solo e do ar registradas na Estação Meteorológica da Água Funda, em São Paulo, SP (23°39'S; 46°37'W; 800m). A bateria de geotermômetros está instalada em um latossolo plano, solo desnudo, nas profundidades de 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 m. Além disso, desde "janeiro de 1962 foi instalado um termômetro de mercúrio em contato com o nível da superfície" da marca Fuess, modelo 52 a (IAG, 2002). Neste trabalho, trataremos os dados deste instrumento como temperatura a 0,0 m.

Sejam t a temperatura do ar e $t(z)$ a temperatura do solo na profundidade z (em m). Nesta estação meteorológica, t é obtida por leitura direta do psicrômetro de aspiração instalado no abrigo meteorológico, a 1,5 m do solo, nos horários de 7 às 24 h. Para os horários de 1h às 6 h, os valores são obtidos do ajuste da temperatura lida no diagrama do termógrafo de rotação diária. O ajuste consiste na distribuição linear das diferenças entre as leituras dos dois instrumentos às 24 e às 7 h. Obtém-se $t(z)$ por leitura direta dos geotermômetros nas horas inteiras de 7 às 24 h.

Embora seja possível, sobretudo para profundidades maiores que 0,20 m, interpolar os dados horários que faltam na série de $t(z)$, evitou-se usar este expediente para não contaminar os dados. Desta feita, o modelo aqui apresentado foi testado para a temperatura do solo nos horários em que há leitura direta. Testou-se a consistência dos dados graficamente e foram realizadas 89 correções.

Sejam T e $T(z)$, respectivamente, as médias de t e $t(z)$ por horário para os dez anos. Considere-se u como o atraso em horas do pico de $T(z)$, em relação ao pico de T . Como u normalmente é fracionário em relação aos momentos de amostragem da temperatura, aproxima-se u para o número inteiro de horas mais próximo. A Figura 1 ilustra que a média da temperatura do ar adequada para comparação com $T(0,1)$ de 15 h de determinado mês, por exemplo, seria a média da temperatura do ar registrada u horas antes das 15 h dos mesmos dias considerados no cálculo de $T(0,1)$.

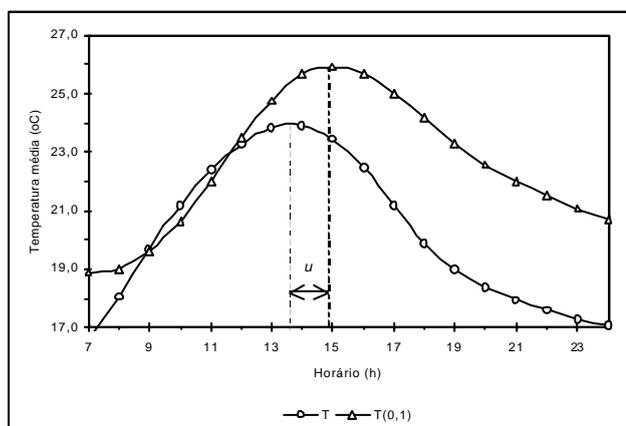


Figura 1. Determinação do atraso em horas, u . Neste exemplo, u é a diferença entre o horário do pico da temperatura do solo a 0,1 m de profundidade, $T(0,1)$, e o horário do pico da temperatura média do ar, T , arredondada para o inteiro mais próximo. Ou seja, $u = 1$ h.

Calculou-se para cada mês, a média horária de t adequada para cada profundidade, $M(u)$, considerando o atraso em horas (u) do pico de $T(z)$ em relação ao pico de T . Perceba-se que não bastaria fazer o rodízio das colunas horário de uma tabela com $M(0)$ calculada mês a mês em suas linhas. Os dias considerados nas duas médias a comparar não seriam os mesmos em função da mudança dos dias abrangidos no cálculo dos valores médios nas passagens de mês.

Investigou-se a possível dependência entre $M(u)$ e $M(0)$ para $0 < u < 12$ horas, que corresponde ao intervalo de profundidades das quais havia amostragem. Calculou-se o coeficiente de determinação de $M(u) = f(M(0))$, como função linear pelo método dos mínimos quadrados, para cada u inteiro.

Para cada série de $T(z)$ e $M(u)$ correspondentes, determinou-se $T(z) = f(M(u))$, como função linear e o respectivo coeficiente de determinação pelo método dos mínimos quadrados. Finalmente compararam-se com os mesmos resultados obtidos da aplicação de $M(0)$ para todas as profundidades.

Resultados e discussão

A Figura 2 representa a média horária da temperatura do solo dos dez anos de registro em função da profundidade. A partir de 0,3 m, a variação da temperatura do solo, em função do horário do dia, é muito pequena (menor que 2,0 °C). Esse acentuado decréscimo da amplitude da temperatura, em apenas alguns decímetros de profundidade, evidencia a reduzida capacidade do solo em conduzir energia (VIANELLO & ALVES, 2000).

Quanto mais próximo da superfície, maior é a amplitude térmica e mais imediata é a resposta da temperatura do solo à incidência da radiação solar. A sobreposição das duas figuras, que foram separadas para uma melhor interpretação, permite visualizar um deslocamento à direita dos valores máximos de temperatura do solo à medida que aumenta a profundidade. Esse atraso na propagação da onda de calor justifica, em grande parte, a proposta deste trabalho.

Na Figura 3, está representado o tempo de atraso do pico da média da temperatura do solo nas profundidades para as quais há registros disponíveis. A generalização para $u = f(z)$ assumindo que u seja função quadrática da profundidade ($R^2 = 0,999$) é mostrada na mesma figura. De fato, estes resultados

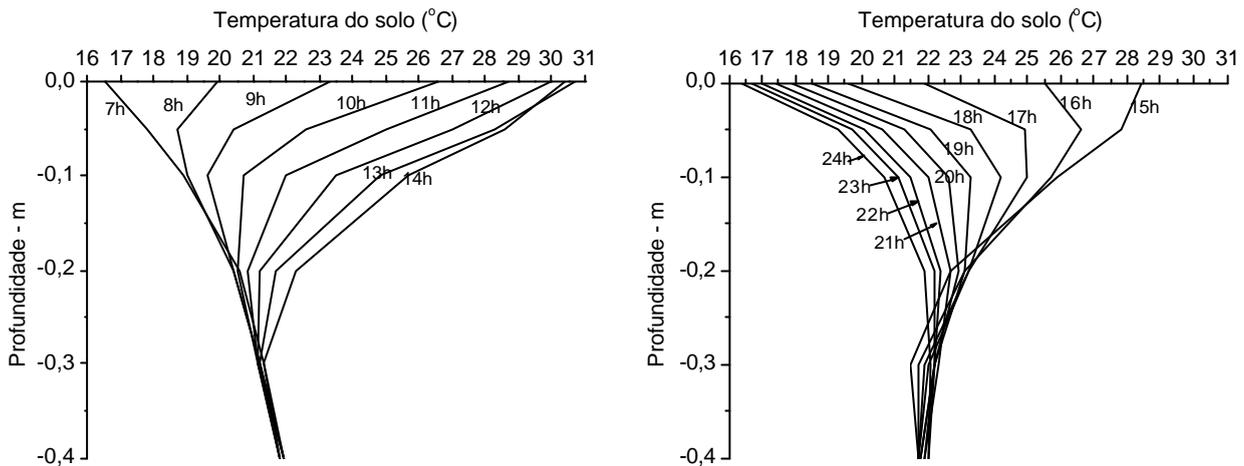


Figura 2 - Tautócronos da média da temperatura horária do solo em função da profundidade (0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 m) no intervalo das 07h às 14h (gráfico da esquerda) e das 15h às 24h (gráfico da direita). Latossolo plano e solo desnudo. Estação da Água Funda, São Paulo, SP. 1993 a 2002.

são seguros apenas para os primeiros decímetros do tipo de solo em questão. Para outros tipos de solo e cobertura, assim como para profundidades maiores, seria necessária a determinação empírica da relação caso a caso.

Os coeficientes de determinação para $M(u)=f(M(0))$ diminuem acentuadamente com a profundidade. Para $u=2$, o coeficiente é alto; 0,822. Ou seja, para um dado mês, é possível estabelecer

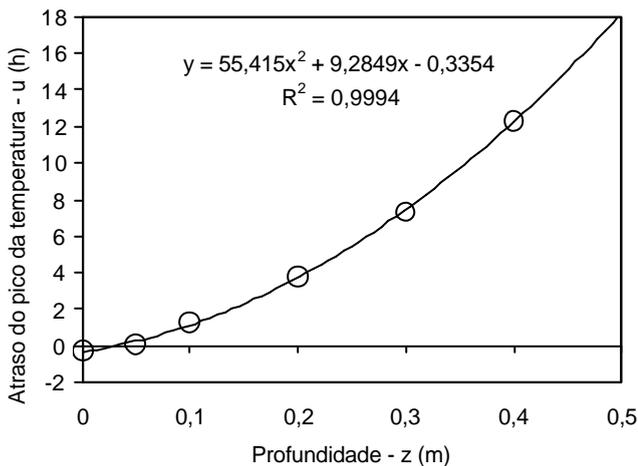


Figura 3. Tempo de atraso em horas do pico da média da temperatura do solo em relação ao pico da média da temperatura do ar, u , em função da profundidade em metros, z . Válido para os primeiros decímetros de profundidade de Latossolo plano e desnudo. Estação da Água Funda, São Paulo, SP. 1993 a 2002.

relação direta entre a média da temperatura do ar de duas horas antes e a média da temperatura de determinado horário. No entanto, pela simples análise visual da Figura 4, pode ser verificado que o limite aceitável para $M(u)=f(M(0))$ situa-se no intervalo entre 3 e 4 horas que, neste caso corresponde ao intervalo de profundidade entre 0,1 e 0,2 m.

Da comparação entre $T(z)=f(M(u))$ e $T(z)=f(M(0))$ para $z=\{0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 \text{ e } 0,4\}$ das 7 às 24 h, profundidades e horários para as quais há o registro da temperatura do solo na estação meteorológica em questão, obtiveram-se os resultados representados na Tabela 1.

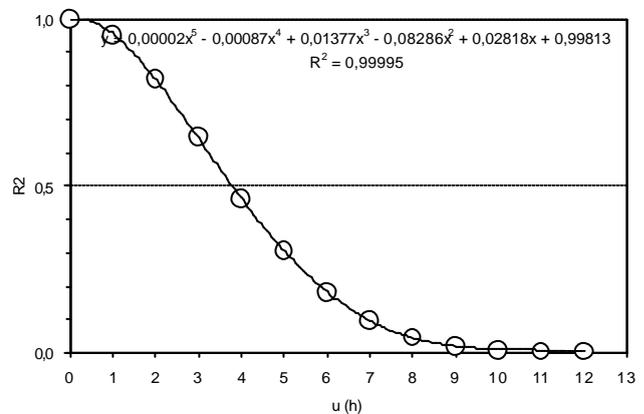


Figura 4. Variação do coeficiente de determinação de $M(u)=f(M(0))$ em função de u (h). Estação da Água Funda, São Paulo, SP. 1993 a 2002.

Os coeficientes de determinação obtidos são semelhantes até 0,05 m de profundidade. Até 0,4 m, o procedimento aqui apresentado conduz a estimativas melhores da temperatura horária mensal (Figura 5).

Uma possibilidade de melhorar ainda mais o procedimento de estimativa mensal da temperatura horária do solo seria determinar a temperatura do ar de u horas antes do horário por interpolação linear, ou mesmo polinomial, sem arredondar u para o inteiro mais próximo.

A Figura 6 mostra a relação linear entre a temperatura do ar e a temperatura do solo nas profundidades de 0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 m não considerando o atraso da propagação da onda de calor no solo. Percebe-se nas camadas mais superficiais do solo (0, 0,05 e 0,1 m) que há boa relação entre essas variáveis. Com o aumento da profundidade, os coeficientes de correlação tendem a valores baixos. Isto indica não haver uma relação direta entre temperatura média mensal horária do ar e a média da temperatura do solo naquele mesmo horário, fato discutido por REICHARDT (1993).

A Figura 7 apresenta a relação linear entre a temperatura do ar e a temperatura do solo nas profundidades de 0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 m considerando o atraso da propagação da onda de calor no solo. O atraso na propagação da onda de calor (u) pode ser obtido pelo modelo apresentado na Figura 2 ou obtido com aproximação para inteiros na Tabela 1. Observa-se que, para a estimativa da temperatura a 0,05 m de profundidade, a relação pode ser considerada como direta, ou seja, a temperatura do ar pode ser utilizada para estimar a temperatura do solo do mesmo horário. A proposta deste trabalho implica em tomar a temperatura do ar (Tabela 1) 1 hora antes a 0,1 m, 4 h a 0,2 m, 7h a 0,3 m e 12h a 0,4m na temperatura do ar para estimar a temperatura do solo, ou seja, a temperatura do ar se relaciona com a

temperatura do solo com uma defasagem temporal em função da profundidade. Em relação à proposta ilustrada na Figura 5, percebe-se uma sensível melhora nos coeficientes de correlação.

Conclusões

A estimativa mensal da média horária da temperatura do solo em função da média horária da temperatura do ar considerando o atraso do pico da temperatura do solo com o aumento da profundidade, gera resultados mais confiáveis que os obtidos em função da média da temperatura do ar no mesmo horário da temperatura do solo estimada, para o tipo de solo e clima considerados neste trabalho.

Há que destacar que o método só se aplica aos primeiros decímetros do solo, uma vez que há atenuação da onda de propagação de calor em função da profundidade. Para boa parte das aplicações agronômicas, esta é justamente a porção do solo cuja variação da temperatura é relevante.

Uma vez que haja séries temporais suficientemente longas, a metodologia proposta poderia ser testada em outros tipos de solo e condição climática para verificar se sua aplicabilidade é universal. Caso o resultado venha a ser positivo, haveria uma sensível melhora no prognóstico dos modelos lineares simples, freqüentemente usados quando da ausência de observação instrumental da temperatura do solo.

Referências bibliográficas

ALFONSI, R.R., SENTELHAS, P.C. Estimativa da temperatura do solo através da temperatura do ar em abrigo meteorológico. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 4, n. 2, p. 57-61,

Tabela 1. Coeficiente angular, linear e de determinação para $T(z)=f(M(0))$ e $T(z)=f(M(u))$. Estação da Água Funda, São Paulo, SP. 1993 a 2002.

Z (m)	U (h)	T(z)=f(M(0))			T(z)=f(M(u))		
		b	a	r ²	b	a	r ²
0	0	1,56	-8,95	0,84	1,56	-8,95	0,84
0,05	0	1,29	-2,94	0,90	1,29	-2,94	0,90
0,1	1	0,95	3,64	0,72	1,02	2,15	0,85
0,2	4	0,59	10,28	0,43	0,73	7,67	0,73
0,3	7	0,50	11,83	0,38	0,55	11,22	0,56
0,4	12	0,50	12,00	0,45	0,61	10,97	0,61

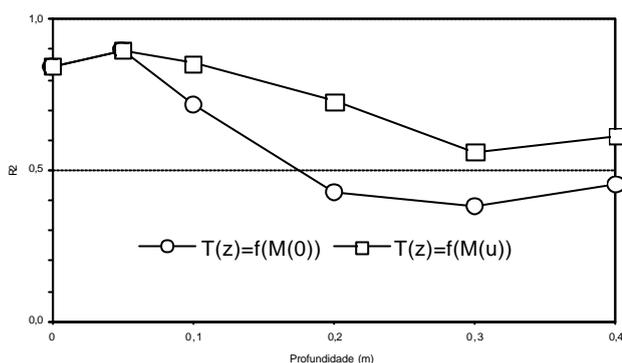


Figura 5. Coeficientes de determinação para $T(z)=f(M(0))$ e $T(z)=f(M(u))$ em função de z . Estação da Água Funda, São Paulo, SP. 1993 a 2002.

1996.

BERGAMASCHI, H., GUADAGNIN, M.R. Modelo de ajuste para médias de temperatura do solo, em diferentes profundidades. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 95-99, 1993.

BRUNINI, O. et al. Estudo micrometeorológico com cenouras (var. Nantes). II – influência da temperatura do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 35, n. 4, p. 49-54, 1976.

CASTILLO, F.B. Problemas de cuajado de frutos en cultivos hortícolas bajo plástico y médio de mejorarlo. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA CON PLÁSTICOS, 9., 1983. México. **Anales...**, Almeria: Estacion Experimental “Las Palmerillas” Almeria, España, 1983.

DECICO, A. et al. Estudos climatológicos da reserva florestal Ducke, Manaus, AM. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 7, n. 4, p. 485-494, 1977.

FISCH, G., SANTOS, J.M. Comparação entre observações meteorológicas convencionais e automáticas na Região do Vale do Paraíba, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Anais...**, Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997. p. 246-248.

GEORGE, R.K. Prediction of soil temperature by using Artificial Neural Networks Algorithms. **Nonlinear Analysis**, Melbourne, v. 47, p. 1737-1748, 2001.

IAG. Observações de superfície efetuadas na Estação meteorológica. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo, v. 6, 2002. 39 p.

KANG, S. et al. Preciction spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature. **Forest Ecology and Management**, Diboll, v. 136, p. 173-184, 2000.

OLIVEIRA, F.D. et al. Temperatura do solo, a 2 cm de profundidade, como resposta a temperatura do ar. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 26, n. 144, p. 205-215, 1979.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: USP/ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1993. 505 p.

SCHNEIDER, F.M. et al. Modificação na temperatura do solo causada por estufas de polietileno transparente de baixa densidade em Santa Maria, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 37-42, 1993.

SENTELHAS, P.C. et al. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 215-221, 1997.

SOUZA, I.F. et al. Comparação de dados meteorológicos obtidos em estações convencional e automática do Distrito de Irrigação do Platô de Neópolis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000. Rio de Janeiro. **Anais...**, Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. CD-ROM.

SOUZA, I.A., GALVANI, E., ASSUNÇÃO, H.F. Avaliação de elementos meteorológicos monitorados por estações convencional e automática. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002. Foz do Iguaçu. **Anais...**, Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002. CD-ROM.

STATHERS, R.J., BLACK, T.A., NOVAK, M.D. Modelling soil temperature in forest clearcuts using climate station data. **Agricultural and Forest Meteorology**, Davis, v. 36, p. 153-164, 1985.

TENGE, A.J. et al. Diurnal soil temperature fluctuations for different erosion classes of an oxisol at Mlingano, Tanzânia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, p. 211-217, 1998.

VIANELLO, R.L., ALVES, A.R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 449 p.

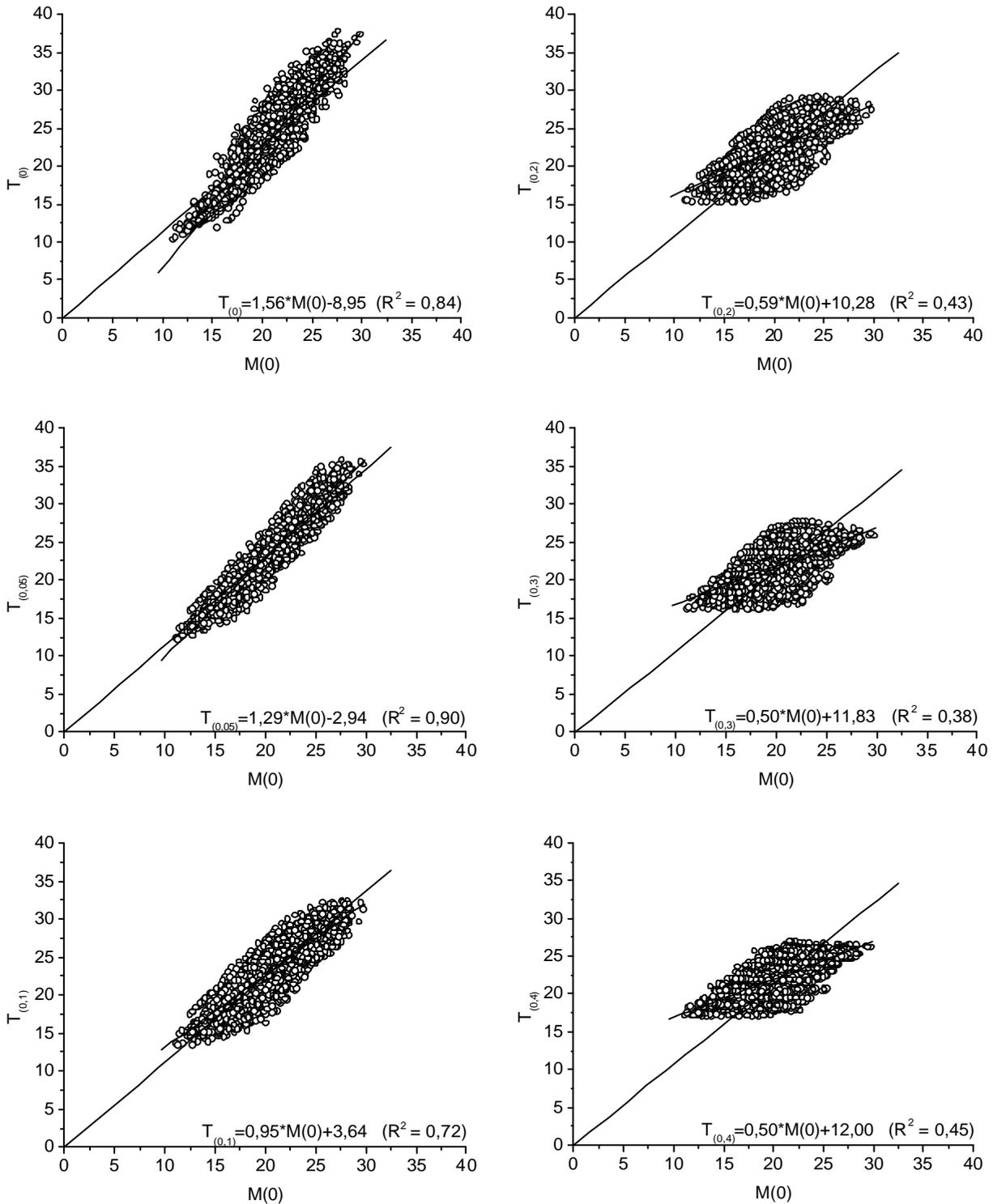


Figura 6. Regressão linear entre a temperatura do ar (1,5 m) e do solo nas profundidades de 0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 m *sem considerar* o atraso da propagação da onda de calor. Onde: $M(0)$ é a temperatura média mensal horária do ar a 1,5 m, enquanto $T_{(0)} \dots T_{(0,4)}$ representa a média da temperatura do solo nas profundidades de 0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 m correspondentes.

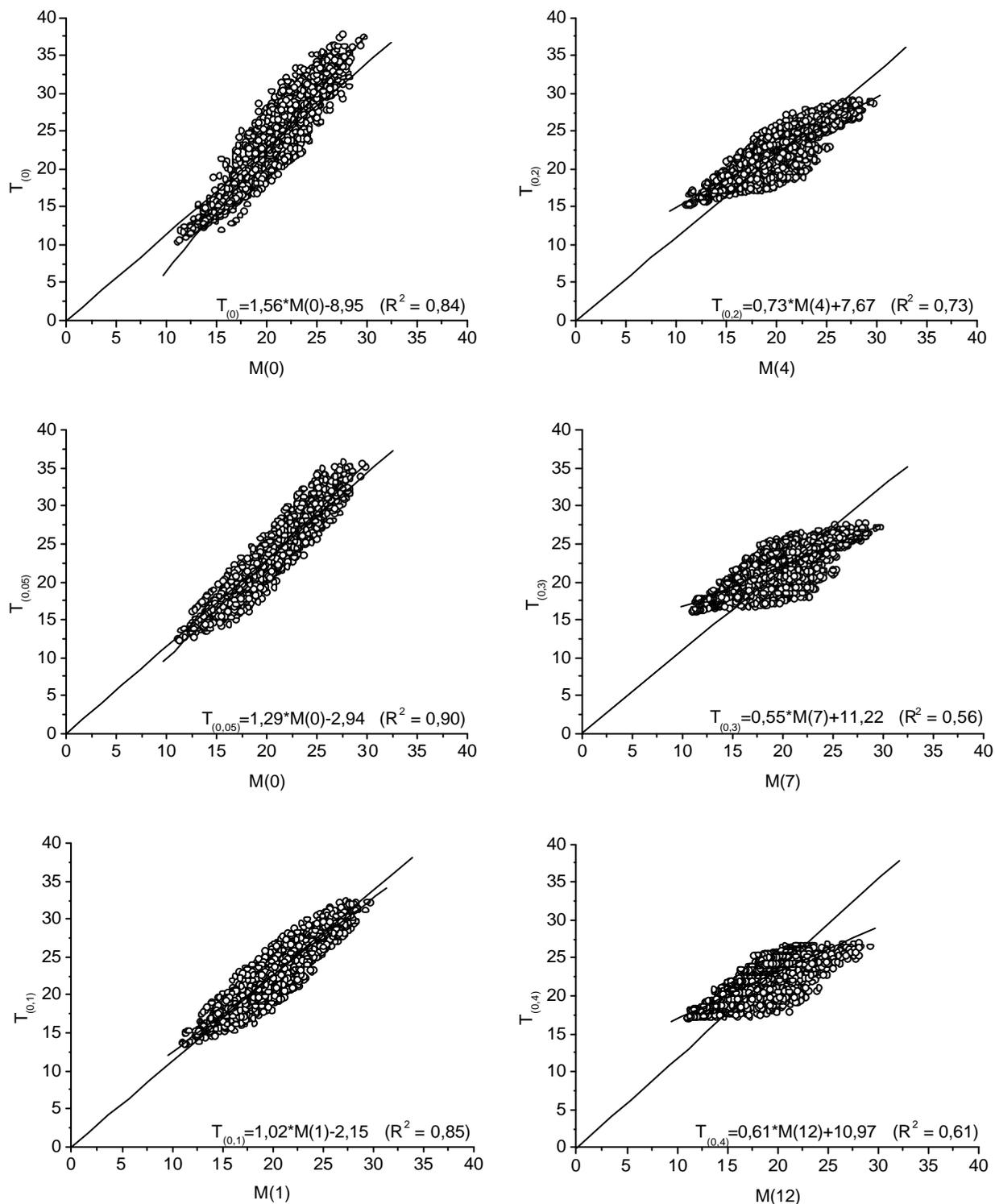


Figura 7. Regressão linear entre a temperatura do ar (1,5 m) e do solo nas profundidades de 0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 m *considerando* o atraso da propagação da onda de calor. Onde: $M(0) \dots M(12)$ é a temperatura média mensal horária do ar a 1,5 m com 0, 1, 4, 7 e 12 horas de atraso, enquanto $T_{(0)} \dots T_{(0,4)}$ representa a média da temperatura do solo a profundidade de 0; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3 e 0,4 m correspondente.