

MÉDIAS MENSAIS DE TEMPERATURA E CONTEÚDO DE UMIDADE PARA O SOLO EM 14 CIDADES BRASILEIRAS

Gerson Henrique dos Santos, Roberto Zanetti Freire e Nathan Mendes

Pontifícia Universidade Católica do Paraná - PUCPR/CCET

Laboratório de Sistemas Térmicos

Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – PR – 80215-901 – Brazil

ghsantos@ccet.pucpr.br, rozafre@terra.com.br, nmendes@ccet.pucpr.br

Resumo: Muitos trabalhos nos campos da ciência, engenharia e agronomia estão relacionados ao estudo de solos. Na área de projetos de edificações, modelos matemáticos vêm sendo desenvolvidos para determinar a transferência de calor e umidade através do solo e piso do ambiente construído. Para calcular perfis de temperatura e umidade em solos, desenvolveu-se neste trabalho um código computacional utilizando a formulação de Philip e De Vries. As equações governantes foram discretizadas em volumes finitos e um modelo 3-D foi usado para descrever o fenômeno físico da transferência de calor e massa em um solo poroso. Utilizou-se o algoritmo MultiTriDiagonal-Matrix Algorithm (MTDMA) para resolver as equações governantes fortemente acopladas. Na seção de resultados apresentam-se as médias mensais para a temperatura e conteúdo de umidade na superfície do solo tipo aluvião-arenoso para 14 cidades brasileiras. Perfis de temperatura e conteúdo de umidade também são comparados entre as cidades de Belém e Curitiba que possuem arquivos climáticos bem distintos.

Palavras-chave: simulação higrotérmica de solos, transferência acoplada de calor e de umidade, solos porosos.

1. INTRODUÇÃO

A ciência do solo fornece os conhecimentos de base para o estudo dos fenômenos biológicos e químicos que ocorrem com elementos poluidores como os fertilizantes, pesticidas e óleos e também disponibiliza informações sobre as atividades relacionadas à agricultura, planejamento ambiental e a gestão integrada das águas (Neves et al., 2000).

Na área de simulações higrotérmicas de edificações, a maioria dos softwares apresenta várias simplificações no cálculo do fluxo de calor através do piso e ignoram o transporte de massa através dele. Entre as dificuldades encontradas no cálculo do fluxo de calor e massa entre o solo e o piso, pode-se citar: o fenômeno multidimensional, o comportamento transiente do solo e o grande número de parâmetros envolvidos na transferência acoplada de calor e massa.

Entre algumas outras análises térmicas dos solos deve-se referenciar o de Brink and Hoogendoorn et al (1983). Neste trabalho verificou-se a perda de calor por condução através do solo e por convecção natural de armazenadores de energia. Utilizaram a equação de condução de calor em regime transiente para calcular as perdas em solos com baixa permeabilidade.

Krarti (1996) utilizou a *técnica de estimação de perfil de temperatura entre zonas (ITPE)*. Em particular, verificou-se que em solos com condutividade térmica baixa em volta do perímetro da fundação, resulta geralmente em uma redução na amplitude anual do total do calor perdido pelo piso.

Brasil et al. (2003) apresentaram uma metodologia experimental e analítica para determinar a temperatura do solo situado abaixo de uma superfície plástica translúcida, usada para a secagem de grãos.

Em edificações, a umidade pode ocasionar vários problemas de ordem estrutural. Lucas *et al.* (2002) expuseram uma série de experimentos executados analisando os efeitos da condensação em

paredes e solo e propuseram algumas soluções para prevenir a deterioração destas superfícies. Além disso, a presença da umidade nas paredes e no piso implica em um mecanismo adicional de transporte de energia que é a absorção ou a liberação de calor latente de vaporização (Santos, 2003).

Para compreender os processos físicos que ocorrem no solo, informações de temperatura e conteúdo de umidade ao longo do tempo tornam-se indispensáveis. Deste modo, desenvolveu-se o código Solum para modelar a transferência tridimensional de calor e umidade em solos, baseado na teoria de Philip e De Vries (1957) que considera a difusão de vapor e migração capilar nos poros. As equações governantes foram discretizadas em volumes finitos (Patankar, 1980) e utilizou-se o algoritmo *MultiTriDiagonal-Matrix Algorithm* (MTDMA) para resolver as equações linearizadas proposto por Mendes e Philippi (2004).

Na seção de resultados apresentam-se as médias mensais para a temperatura e conteúdo de umidade na superfície do solo tipo aluvião-arenoso submetido ao arquivo TRY (Test Reference Year) de 14 cidades brasileiras. Perfis de temperatura e conteúdo de umidade também são comparados entre as cidades de Belém e Curitiba que possuem arquivos climáticos bem distintos.

2. MODELO MATEMÁTICO

As equações diferenciais parciais governantes para modelar a transferência de calor e umidade em meios porosos são dadas pelas Eqs. (1) e (2). Elas foram derivadas da conservação da massa e da energia em um elemento de volume de um material poroso. A equação da conservação da energia é descrita como:

$$\rho_0 c_m (T, \theta) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda (T, \theta) \nabla T) - L(T) (\nabla \cdot \mathbf{j}_v) \quad (1)$$

enquanto que a equação da conservação da massa como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{j}}{\rho_l} \right) \quad (2)$$

onde ρ é a densidade da matriz sólida, c_m , calor específico médio, T , temperatura, t , tempo, λ , condutividade térmica, L , calor latente de vaporização, ($= h_{LV}$), θ conteúdo de umidade em base de volume, \mathbf{j}_v , fluxo de vapor, \mathbf{j} , fluxo total de massa e ρ_l a densidade da água.

Nota-se que a Eq. (1) difere da equação de Fourier para o fluxo de calor transiente devido ao termo fonte responsável pela mudança de fase dentro do meio poroso. De acordo com Philip e De Vries (1957) e assumindo a hipótese de que o solo é um meio isotrópico, o fluxo total de umidade é dado por

$$\begin{aligned} \frac{\mathbf{j}}{\rho_l} = & - \left(D_T(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial x} + D_\theta(T, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \mathbf{i} - \left(D_T(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial y} + D_\theta(T, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \mathbf{j} \\ & - \left(D_T(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial z} + D_\theta(T, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \frac{\partial K_g}{\partial z} \right) \mathbf{k} \end{aligned} \quad (3)$$

onde

$D_T = D_{Tl} + D_{Tv}$ e $D_\theta = D_{\theta l} + D_{\theta v}$, onde D_{Tl} é o coeficiente de transporte na fase líquida associado ao gradiente de temperatura, D_{Tv} , é o coeficiente de transporte na fase vapor associado ao gradiente de temperatura, $D_{\theta v}$, é o coeficiente de transporte na fase vapor associado ao gradiente de conteúdo de umidade, D_T , coeficiente de transporte de massa associado ao gradiente de temperatura ($m^2 / s \text{ } ^\circ K$), D_θ , coeficiente de transporte de massa associado ao gradiente de conteúdo de umidade (m^2 / s) e K_g , a condutividade hidráulica (m/s).

Como condição de contorno para a superfície, na equação associada à conservação de energia, considera-se que o solo é exposto a radiação de onda curta, convecção de calor e de massa e mudança de fase. Então, o balanço de energia torna-se:

$$\left(\lambda(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} + (L(T) j_v)_{y=0} = h(T_\infty - T_{y=0}) + \alpha q_r + L(T) h_m (\rho_{v,\infty} - \rho_{v,y=0}) - \varepsilon R_{ol} \quad (4)$$

onde $h(T_\infty - T_{y=0})$ representa o calor trocado com o ar exterior por convecção, αq_r é a radiação absorvida por onda curta, R_{ol} representa a perda por radiação de onda longa e $h_m L(T)(\rho_{v,\infty} - \rho_{v,y=0})$, é a energia proveniente da mudança de fase. A absorvidade solar é definida como α e o coeficiente de convecção de massa como h_m que é relacionado com o h através da relação de Lewis.

O balanço de massa para o solo (externo) é descrito como

$$\left(D_\theta(T, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} + D_T(T, \theta) \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = \frac{h_m}{\rho_l} (\rho_{v,\infty} - \rho_{v,y=0}) \quad (5)$$

As outras superfícies foram consideradas adiabáticas e impermeáveis.

3. PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO

Submeteu-se o solo do tipo aluvião-arenoso com suas propriedades obtidas em Oliveira e Freitas (1993) ao arquivo climático TRY (Test Reference Year) de 14 cidades brasileiras: Belém, Belo Horizonte, Brasília, Curitiba, Florianópolis, Fortaleza, Maceió, Natal, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro, Salvador, São Paulo e Vitória.

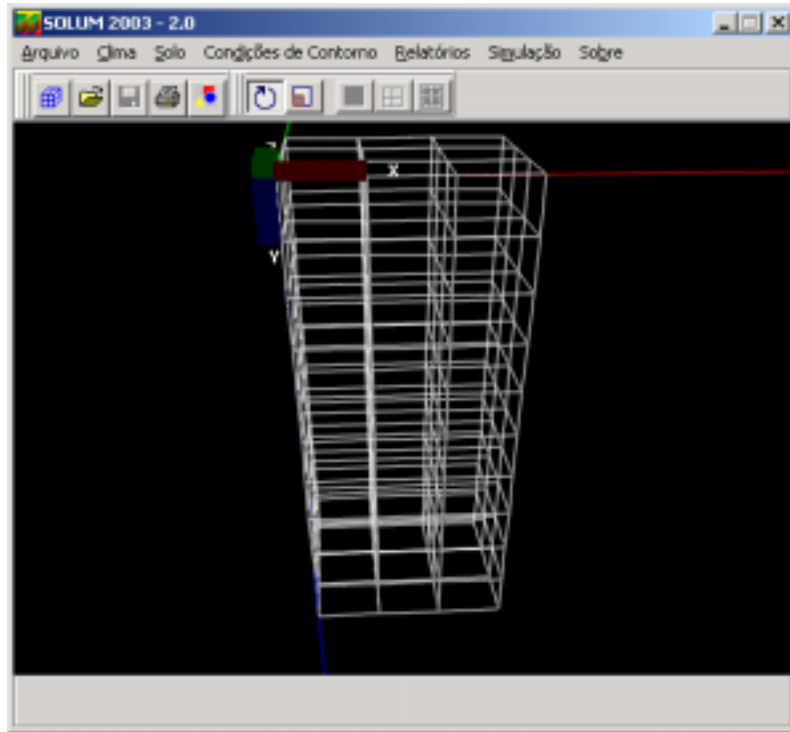


Figura 1. Definição do domínio físico do solo e da malha de simulação

Nesta análise, dividiu-se o solo em 3 X 10 X 3 volumes, com dimensões 0,5 m x 0,5 m x 0,5 m, distribuídos uniformemente conforme mostrado na Fig. (1).

As equações governantes (1) e (2) foram discretizadas através da técnica dos volumes finitos, proposta por Patankar (1980), utilizando coordenadas cartesianas e um esquema totalmente implícito para a derivada temporal.

Para um período de pré-simulação de 2 anos (Santos, 2003), considerou-se uma temperatura de 20°C e um conteúdo de umidade de 4,4 % em volume (50% de umidade relativa) para as condições iniciais para o solo.

Além do arquivo climático, considerou-se para a superfície superior um coeficiente de convecção constante de 10 W/m² K, uma absorvidade de onda curta de 0,3 e uma perda constante por radiação de onda longa de 100 W/m², com uma emissividade de 0,3. As outras superfícies foram consideradas adiabáticas e impermeáveis.

4. RESULTADOS

Na Tab. (1) observam-se os valores médios para a temperatura, umidade relativa e radiação total (direta + difusa) para as 14 capitais brasileiras, obtidos através do arquivo climático TRY (*Test Reference Year*) nos meses de janeiro e julho.

Tabela 1: Valores médios de temperatura, umidade relativa média e radiação solar total para os meses de janeiro e julho em 14 cidades brasileiras.

Cidade	Janeiro			Julho		
	Temperatura Média (°C)	Umidade Relativa Média (%)	Radiação Total Média (W/m ² K)	Temperatura Média (°C)	Umidade Relativa Média (%)	Radiação Total Média (W/m ² K)
Belém	25.55	89.28	322.36	26.67	80.85	505.48
Belo Horizonte	25.97	63.07	595.28	20.00	63.86	572.90
Brasília	21.60	82.28	343.70	17.79	58.88	526.72
Curitiba	20.66	80.25	503.85	12.53	83.66	308.29
Florianópolis	24.79	85.56	494.18	17.52	83.83	292.44
Fortaleza	27.11	75.22	501.62	26.22	76.61	539.98
Maceió	25.91	73.67	633.23	22.16	85.55	379.81
Natal	26.77	75.59	394.25	23.92	82.09	402.04
Porto Alegre	24.63	78.06	583.03	13.71	86.04	230.09
Recife	26.68	73.86	593.24	24.04	83.12	373.74
Rio de Janeiro	27.24	77.58	626.05	20.51	84.67	493.20
Salvador	29.58	68.75	874.90	27.31	78.08	699.67
São Paulo	22.49	77.37	483.39	16.05	77.26	316.45
Vitória	25.65	83.57	470.65	20.14	84.49	306.57

Na Fig. (2) apresentam-se as temperaturas médias para a superfície do solo para as 14 cidades. Atribui-se a maior temperatura observada para Salvador devido aos maiores valores de temperatura e radiação total observados na Tab. (1).

A menor temperatura da superfície do solo observado em Brasília para o mês de janeiro é ocasionada pelo baixo valor de radiação total média fornecida pelo arquivo climático. No mês de julho verificam-se as menores temperaturas para as capitais da região sul e São Paulo.

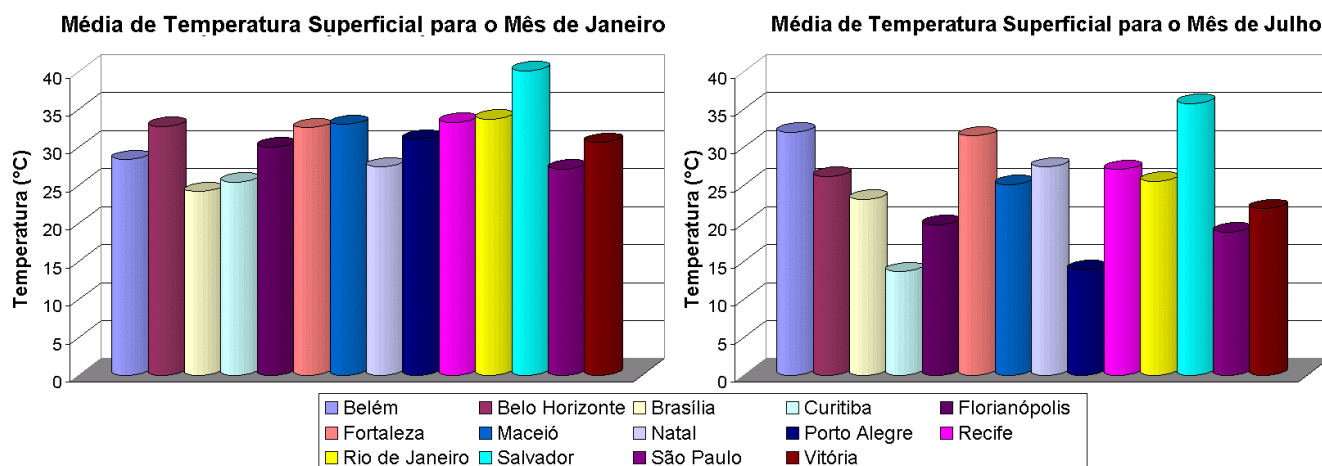


Figura 2. Média de temperatura para os meses de Janeiro e Julho na superfície do solo.

No caso do conteúdo de umidade observado na Fig. (3), Belém possui o maior valor entre as capitais para o mês de janeiro. Atribui-se o maior valor à alta umidade relativa observada na Tab. (1). Para o mês de julho observa-se o maior valor para Porto Alegre e o menor para Brasília.

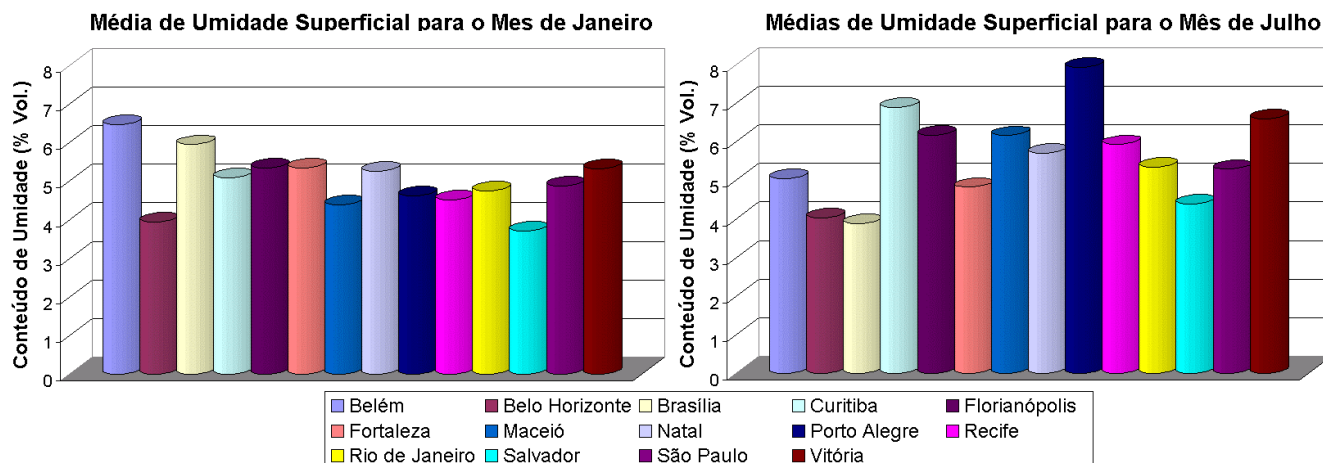


Figura 3. Média de umidade para os meses de Janeiro e Julho na superfície do solo.

Na Fig. (4) compararam-se perfis de temperatura e conteúdo de umidade para cidades com climas opostos – Belém e Curitiba. Como Belém está a uma latitude de $-1^{\circ} 38'$, as altas temperaturas ocorrem no mês de julho por ser a estação mais seca. Nota-se também na Fig. 4, o efeito capacitivo do solo quando comparam-se para a mesma cidade os perfis de temperatura média para os meses de janeiro e julho.

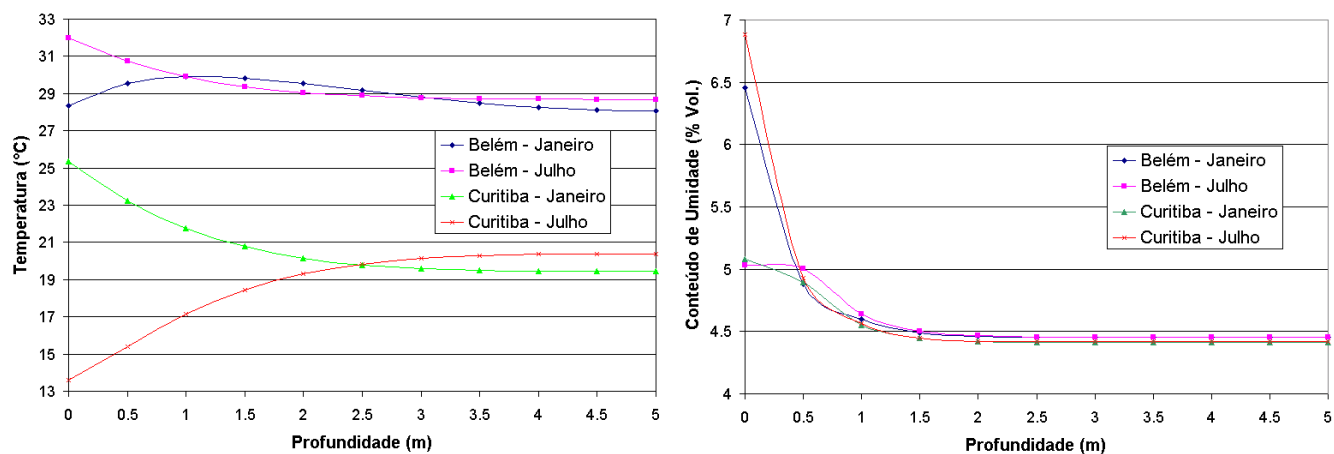


Figura 4. Variação de temperatura e umidade em relação à profundidade para os meses de janeiro e julho para as cidades de Belém e Curitiba.

A Fig. (5) mostra a variação da temperatura com a profundidade para a cidade de Curitiba durante um período de dois anos e meio (incluído os 2 anos de pré-simulação). A periodicidade observada entre os valores no decorrer dos anos mostra a validade do período de pré-simulação adotado, para a simulação do solo.

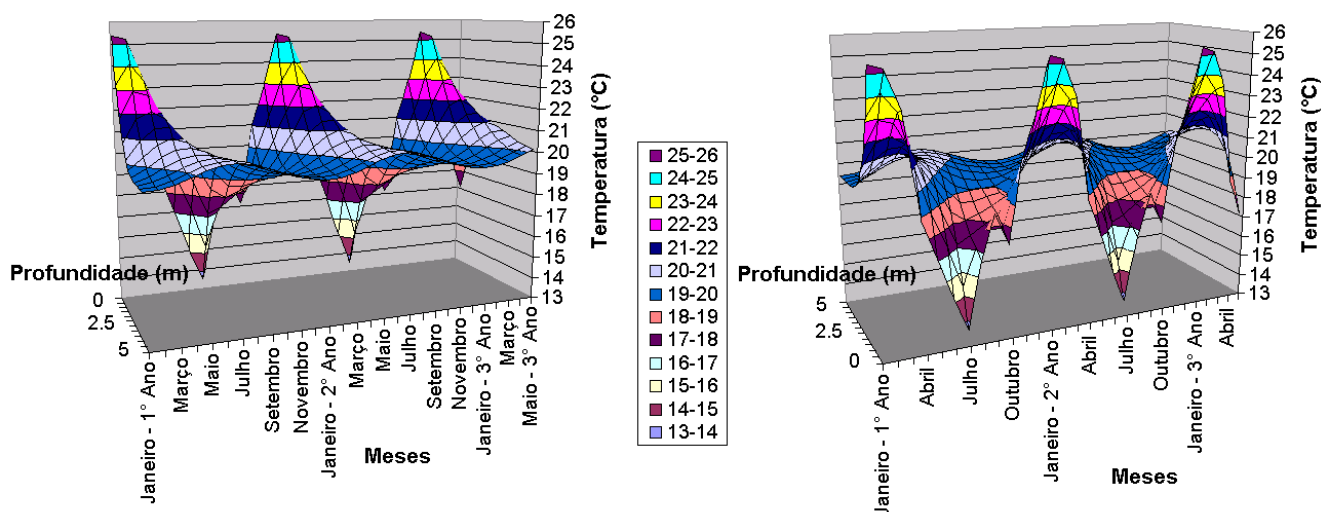


Figura 5. Variação de Temperatura em relação a profundidade para Curitiba no período de 2 anos e meio

A física do solo mostra-se de interesse entre as várias áreas da ciência. Para o conhecimento dos processos químicos e biológicos que ocorrem no solo, perfis de temperatura e conteúdo de umidade obtidos através de diferentes condições de contorno, mostra-se de fundamental importância. Desta forma, observam-se através dos resultados obtidos nas Figs (2-5) as potencialidades do código computacional em diversas aplicabilidades. Além da agronomia e das ciências hídricas, programas que realizam análises termo energéticas de edificações como, por exemplo, o PowerDomus (2003), necessitam de valores de temperatura e conteúdo de umidade do solo e piso para obter os fluxos de calor e umidade para o ambiente construído.

5. CONCLUSÕES

Compararam-se a temperatura e o conteúdo de umidade em um solo do tipo aluvião-arenoso para 14 capitais brasileiras, através do desenvolvimento de uma rotina computacional que modela a transferência acoplada de calor e umidade em solos porosos, baseada na teoria de Philip e DeVries. Utilizou-se o algoritmo MTDMA para resolver as equações governantes discretizadas em volumes finitos.

Como a ciência do solo fornece os conhecimentos necessários para o estudo dos processos físicos, biológicos e químicos que ocorrem na agricultura, planejamento ambiental e também na análise termoenergética de edificações, o modelo e o código computacional mostram-se com grande potencial na utilização em diversas áreas da ciência.

6. REFERÊNCIAS

- Brasil, S. B., Ferreira, A. G., Valle, R. M., Cortez, M. F. B., Andrade, R. M., 2003, A Methodology to Determine the Temperature Distribution on the Ground Under a Plastic Cover Exposed to the Solar Radiation. 17th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM.
- Brink, G. J. Van Den, Hoogendoorn, C. J., 1983, Ground Water Flow Heat Losses for Seasonal heat Storage in the Soil. *Solar Energy*, Vol. 30, N°4, pp. 362-371.
- Krarti, M., 1996, Effect of Spacial Variation of Soil Thermal Properties on Slab-on-Ground Heat Transfer. *Building and Environment*, Vol. 31, No. 1, pp. 51-57.
- Lucas, F., Adelard, L., Garde, F., Boyer, H., 2002, Study of moisture in buildings for Hot Humid Climates. *Energy and Building*, Vol. 34, pp. 345-355.
- Mendes, N. and Philippi, P. C., 2004, MultiTridiagonal Matrix Algorithm for Coupled Heat Transfer in Porous Media: Stability Analysis and Computational Performance, *Journal of Porous Media*. (In press).
- Neves, R., Leitão, P. C., 2000, Modelação numérica da circulação da água no solo. O modelo MOHID. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. *Pedologia*, Oeira, 28: 46-55.
- Oliveira, A. A. J; Freitas, D. S., 1993, Influência do Meio nas Difusividades do Modelo de Phillip e Vries. Relatório de Pesquisa, UFSC.
- Patankar S.V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*.
- Philip, J. R., D. A. de Vries., 1957, Moisture Movement in Porous media under Temperature Gradients. *Trans Am geophysical Union*, Vol. 38, pp. 222-232.
- Santos, G.H. and Mendes N., 2003, The Solum Program for Predicting Temperature Profiles in Soils: Mathematical Models and Boundary Conditions Analyses, *BUILDING SIMULATION 2003*, Eighth International IBPSA Conference. International Building Performance Simulation Association, Eindhoven, Netherlands, Vol. 3, pp.1171-1175.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

PREDICTING MONTHLY-AVERAGED VALUES FOR TEMPERATURE AND MOISTURE CONTENT IN AN UNSATURATED POROUS SOIL IN 14 BRAZILIAN CITIES.

Gerson Henrique dos Santos, Roberto Zanetti Freire e Nathan Mendes

Pontifical Catholic University of Paraná – PUCPR/CCET, Thermal Systems Laboratory

Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba – PR – 80215-901 – Brazil

ghsantos@ccet.pucpr.br, rozafre@terra.com.br, nmendes@ccet.pucpr.br

Abstract: *Many works in the field of science and engineering such as agronomy and building science are physically related to soils and require an accurate determination of temperature and moisture content spatial distributions. In the building science area, e.g., mathematical models are developed to provide better indoor thermal comfort with lower energy consumption and, mainly in low-rise buildings, the heat and moisture transfer through soils plays an important role on the energy and mass balances.*

Therefore, in order to calculate the temperature profiles in a more accurate way, a computational code has been developed and conceived to model the coupled heat and moisture transfer in unsaturated soils, using the Philip and De Vries model and MultiTriDiagonal-Matrix Algorithm (MTDMA) as a solver of the linearized algebraic conservation equations. In this way, monthly-averaged values of temperature and moisture content are obtained for a sandy silt soil for 14 Brazilian cities.

Keywords: *hygrothermal simulation of soils, coupled heat and moisture transfer, porous soil.*