

COMPARAÇÃO DO COEFICIENTE GLOBAL DE PERDAS DE CALOR PARA CASA DE VEGETAÇÃO AQUECIDA USANDO DIFERENTES TÉCNICAS PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

CELSO E. L. DE OLIVEIRA¹, JOSÉ L. GARCIA², SATURNINO DE LA PLAZA³,
CAROLINA CHAYA²

RESUMO: O Coeficiente Global de Perdas de Calor (U) permite o equacionamento das necessidades térmicas de uma casa de vegetação climatizada. No presente trabalho, determinou-se esse coeficiente cujo referencial foi uma casa de vegetação localizada em Madri (Espanha), em que foram utilizadas medidas noturnas de temperatura do ar no interior, no exterior, bem como o consumo de energia para aquecimento. As comparações entre as técnicas de aquecimento utilizadas foram: solo radiante e aerotermos combinados com duas técnicas que visavam a promover melhor aproveitamento térmico, ou seja, a utilização de cobertura plástica formando dupla capa ou a utilização de túnel plástico. Os menores coeficientes foram conseguidos para a utilização de solo radiante com túnel e aerotermos com dupla capa com $7,19 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e $9,11 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, respectivamente; o maior valor dentre os coeficientes nas condições estudadas foi $15,13 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ao considerar o uso de aerotermos sem utilização de plásticos. Conclui-se, portanto, que os resultados comprovam o melhor rendimento térmico para as técnicas ensaiadas.

PALAVRAS-CHAVE: climatização, eficiência energética, estufas.

COMPARISON OF OVERALL HEAT LOSS COEFFICIENT TO WARM GREENHOUSE APPLYING ENERGY SAVING TECHNIQUES

ABSTRACT: The Global Heat Loss Coefficient (U) allows some answers about thermal requirements of climatic greenhouse. This trial determined this coefficient for a greenhouse in Madrid (Spain) where night measurements of inside and outside air temperature as well as energy consumption to heat were used. Comparisons were accomplished among the used heating techniques as: radiant floor and heat fan combined with two techniques aiming to promote a better thermal which means the use of a plastic covering forming a double couple or the use of a plastic tunnel. The lowest coefficients for the use of radiant soil with tunnel and heat fan with double couple were respectively $7.19 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ and $9.11 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ and the largest value was $15.13 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ for the heat fan use without plastics. Therefore, the results registered best thermal efficiency for the tested techniques.

KEYWORDS: climate systems, energy saving, greenhouse.

INTRODUÇÃO

KÖRNER et al. (2004) estudaram o consumo de energia em casas de vegetação usando modelo de controle climático e ressaltam que o uso de medidas como de controle de radiação ou perda de calor são efetivas para o aumento da eficiência energética no sistema de produção. LITAGO et al. (2005) usaram modelo estatístico para demonstrar a influência do sistema de climatização sobre os indicadores de consumo de uma estufa, demonstrando a diversidade de modelos que podem ser utilizados nesse tipo de análise.

¹ Eng^o Agrícola, Prof. Dr., Departamento de Engenharia de Alimentos, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, USP, Av. Duque de Caxias Norte, 225, Pirassununga - SP, celsooli@fzea.usp.br

² Prof. Titular, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid.

³ Catedrático de Electrotecnia, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 19-7-2005

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 4-7-2006

Segundo SEGNER et al. (1988), o coeficiente global de perdas de calor pode ser usado como ferramenta para a simulação e otimização da conservação de energia em casas de vegetação. Portanto, para modelos de controle climático cuja função de consumo de energia é considerada, a determinação de U é fundamental (SPANOMITSIOS, 2001).

O coeficiente global de perda de calor (U) faz parte da equação de balanço de energia em modelos do clima de uma casa de vegetação e expressa a taxa de energia consumida por unidade de área. Numa casa de vegetação, cumpre-se o princípio da continuidade: dividindo-a em quatro elementos - o volume de ar, o cultivo, o solo e a cobertura com sua estrutura - em cada elemento, a quantidade de energia ganha menos a perda é igual à acumulada (MONTERO, 1994).

No presente trabalho, o coeficiente de perdas de calor será utilizado para comparar diferentes técnicas de aquecimento, sendo, portanto, a temperatura do ar e o consumo de energia os parâmetros de interesse e determinado-se a melhor eficiência energética entre as técnicas ensaiadas.

Assim se prescinde da temperatura da cobertura e do cultivo, considerando que a radiação que transpassa pela casa de vegetação chega às plantas e ao solo e é convertida em calor que é cedido ao ar interior.

Tomando por base a equação do balanço de energia proposta por MONTERO (1998), desprezando-se o calor acumulado no ar, temos:

$$A_s \tau R_s (1-\alpha) + Q = A_c U (T_i - T_a) + m C_p (T_i - T_a) \quad (1)$$

em que,

A_s - superfície do solo, m^2 ;

τ - transmitância da casa de vegetação à radiação solar, %;

R_s - radiação solar instantânea exterior, $W m^{-2}$;

α - percentagem de radiação usada na transpiração, %;

Q - calor cedido pelo equipamento de aquecimento, W ;

A_c - superfície da cobertura, m^2 ;

U - coeficiente global de perdas de calor, $W m^{-2} K^{-1}$;

T_i - temperatura do ar interior, K ;

T_a - temperatura do ar exterior, K ;

m - massa de ar renovada por ventilação ou infiltração, $kg s^{-1}$, e

C_p - calor específico do ar, $J kg^{-1} K^{-1}$.

Na eq.(1), o termo da esquerda da igualdade corresponde à radiação solar e ao calor cedido; o da direita, a evapotranspiração, que está representada na primeira parte da soma e, finalmente, o aquecimento no último termo da soma. No entanto, os termos da equação assim representados sofrem ações das perdas por convecção, condução e radiação, somadas à renovação do ar.

Diversos autores apresentam valores para o parâmetro U. NELSON (1998) apresentou valores para diversos materiais e indica que uma casa de vegetação com uma lâmina de polietileno, por exemplo, perde 9,6 W de calor em cada metro quadrado de cobertura por hora, quando a temperatura exterior é de 0,55 °C inferior à interior. MARSH & SING (1994) utilizaram valor para o coeficiente global de perdas de calor de 5 $W m^{-2} °C^{-1}$ para casa de vegetação de dupla lâmina de polietileno, aquecida com uma bomba de calor. DAWSON & WINSPEAR (1976) estudaram o coeficiente global de perdas de calor para o período noturno com a seguinte equação:

$$U = Q (A(T_i - T_o))^{-1} \quad (2)$$

em que,

U - coeficiente global de perdas de calor, $W m^{-2} °C^{-1}$;

Q - calor aportado pelo sistema de aquecimento, W ;

A - área equivalente de vidro, m^2 ;

T_i - temperatura no interior da casa de vegetação, °C, e

T_o - temperatura do ar no exterior, °C.

Esses autores calcularam o coeficiente da eq.(2) por meio de regressão linear e obtiveram coeficiente de correlação (r) médio de 0,5 e valores médios de U, para três períodos experimentais consecutivos, de $7,25 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, para o teste sem cobertura plástica, e de $4,81 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ com cobertura.

BASÇETINÇELİK & ÖZTÜRK (1997) realizaram experimentos em três casas de vegetação semicilíndricas, tipo túnel, cobertas com uma lâmina dupla de polietileno, sendo os túneis aquecidos com aerotermos. Os autores calcularam o coeficiente U durante as noites frias, cujo parâmetro metodológico considerou a utilização ou não de malhas térmicas de dois tipos: de polietileno e de poliéster.

Esses mesmos autores utilizaram a eq.(2), porém considerando A como a área da cobertura (m^2). Dessa forma, obtiveram as relações entre o coeficiente U e a temperatura no exterior: com a utilização da malha de poliéster: $U = 2,5 + 0,09 t_o$; com a utilização de polietileno: $U = 3,10 + 0,02 t_o$, e sem malhas com $U = 3,40 + 0,05 t_o$; nessas equações, t_o é a temperatura do ar exterior ($^{\circ}\text{C}$). Os valores médios de U para cada técnica estavam associados à casa de vegetação com malha de poliéster de $2,78 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, à casa de vegetação com malha de polietileno de $3,48 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e ao teste sem malha de $3,65 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Dessa maneira, os autores citados utilizaram o coeficiente global de perdas de calor (U) para comparar o consumo de energia em casas de vegetação que possuem diferentes estratégias de manejo e equipamentos. Também pode verificar-se na literatura que o valor do coeficiente depende do material da cobertura, do sistema de climatização e da velocidade do vento.

Diante do exposto, este trabalho teve o objetivo de comparar diferentes técnicas de aquecimento em estufas por meio do coeficiente global de perdas de calor, indicando a melhor estratégia do ponto de vista da eficiência energética.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados foram obtidos numa casa de vegetação (132 m^2), na qual estava instalado um cultivo de gérbera (*Gerbera jamesonii*), construída com estrutura de aço e cobertura de metacrilato de 3 mm de espessura, localizada no campo de práticas da Escola de Engenheiros Agrônomos da Universidad Politécnica de Madrid, localizada em Madrid, Espanha (latitude $40^{\circ}26'36'' \text{ N}$, longitude $3^{\circ}44'18'' \text{ W}$, altitude de 595 m). Essa casa de vegetação era do tipo multitúnel, de teto curvo e paredes retas com duas naves, das quais, para o presente trabalho, só se ocupou uma de 20 m de comprimento e 6,6 m de largura. O esquema da configuração da casa de vegetação, com os equipamentos de aquecimento, pode ser visto na Figura 1.

O cultivo estava disposto em oito linhas sobre o solo radiante e duas junto à parede lateral da casa de vegetação sobre o solo.

O aquecimento, para a maioria dos cultivos comerciais na Espanha, só é aplicado no período noturno, como apoio para evitar geadas e/ou estresse térmico devido às baixas temperaturas, estratégia que também deve ser indicada para explorações em algumas regiões do Brasil. Os experimentos procuraram adotar a mesma configuração das instalações comerciais da região de Madrid.

O período experimental considerado foi composto de dois subperíodos, compreendendo as noites durante os invernos dos anos de 1999 e 2000, o primeiro subperíodo e parte de 2001, num total de 262 pontos.

Foram utilizadas duas técnicas de aquecimento: a) utilização de solo radiante com aquecimento de água por meio de caldeira elétrica de 15 kW de potência, e b) utilização de dois aerotermos de 9 kW cada. Como técnicas para aumentar a eficiência energética do aquecimento, foram ensaiados em períodos semanais alternados: a) uma cobertura plástica, que ocupava metade da área do cultivo, ficando a outra metade como testemunha, e b) um túnel sobre uma linha de cultivo na região central da casa de vegetação.

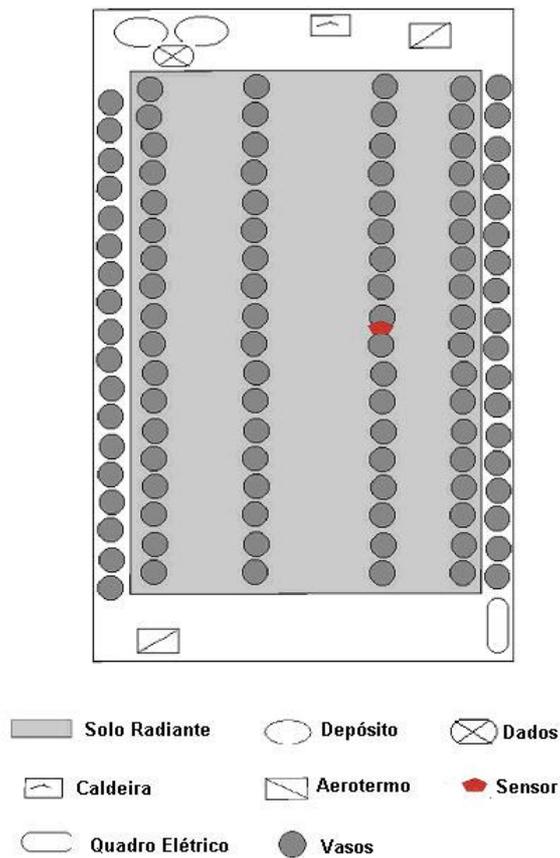


FIGURA 1. Esquema da constituição da casa de vegetação experimental com os equipamentos de aquecimento.

Os equipamentos de calefação utilizados sempre foram acionados de forma alternada durante um período semanal, segundo o desenho experimental proposto. O primeiro sistema é o denominado solo radiante, conforme adotado por DE LA PLAZA et al. (1999), que ocupa superfície de 90 m² da casa de vegetação, o qual é constituído de piso de cimento onde está inserida uma tubulação de polietileno engastada numa malha de ferro que serve como guia, seguido de uma lâmina de plástico (barreira antivapor) e, finalmente, o contrapiso em concreto (Figura 2). Pela tubulação circula água aquecida na caldeira elétrica conectada a dois boilers de 300 L cada. O acionamento do sistema dava-se quando eram cumpridas duas condições: controle temporizado que acendia a caldeira depois das 17 h até às 10 h da manhã, sempre que se cumpria a segunda condição dada pelo controle de temperatura, realizado por um termostato mecânico com “setpoint” regulado para acionamento com temperatura igual ou inferior a 17 °C e parada com 22 °C.

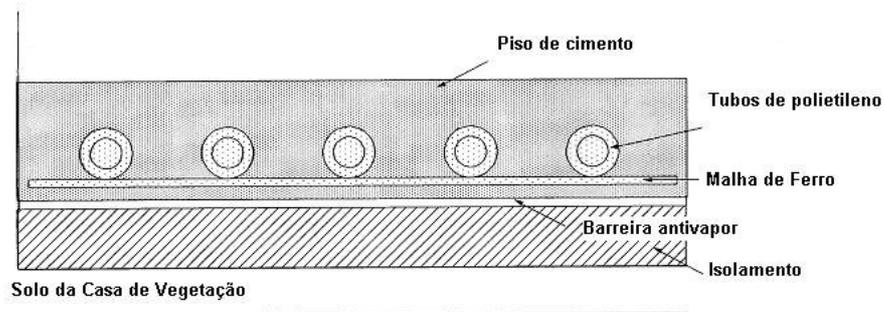


FIGURA 2. Estrutura e composição do solo radiante.

O segundo sistema estava composto por dois aerotermos elétricos de 9 kW cada um, dispostos a 1,5 m de altura do solo, em posições simetricamente opostas, nas paredes frontal e

traseira da casa de vegetação, sendo acionados por termostato que tinha um elemento sensor colocado no centro do experimento a uma altura de 1,0 m; não foram usados distribuidores, pois, conforme TEITEL et al. (1999), não existe diferença significativa para o consumo de energia entre a distribuição de ar aquecido usando ou não tubos plásticos. As conexões elétricas e comandos utilizados para acionar o conjunto estavam no quadro elétrico. Foram utilizados os mesmos “setpoints” do sistema anterior.

Para a coleta dos dados de temperatura e consumo de energia elétrica pelos equipamentos de calefação, foram instalados três sistemas de aquisição de dados que consistiam em: um “datalogger” da marca Datataker, modelo DT50-S2; um analisador de energia, marca El Control, modelo VIP System 3, e uma estação meteorológica remota Meteodata, modelo 256.

As temperaturas interna e externa foram medidas com sensores tipo PT 100 com intervalo de medida entre -200 e +800 °C e precisão de $\pm 0,1$ °C, localizados em pontos médios da estrutura, de acordo com o sistema de aquecimento utilizado (Figura 3). As leituras eram realizadas a cada 5 segundos e integralizadas para cálculo da média de 5 minutos, que, então, era armazenada pelo sistema e coletada com um notebook.

O analisador de energia permaneceu instalado no quadro elétrico durante todo o período experimental, alterando suas conexões de acordo com o equipamento de calefação utilizado. O equipamento media de forma contínua a potência instantânea que era integralizada em intervalos de 15 minutos e, então, armazenada; ao final da semana de ensaio, os resultados eram coletados.

As temperaturas externas e a radiação solar foram medidas na estação meteorológica, sendo utilizados seus valores para referendar os valores das medidas de temperatura externa do sensor do “datalogger” e a radiação para a determinação do momento exato do pôr-do-sol.

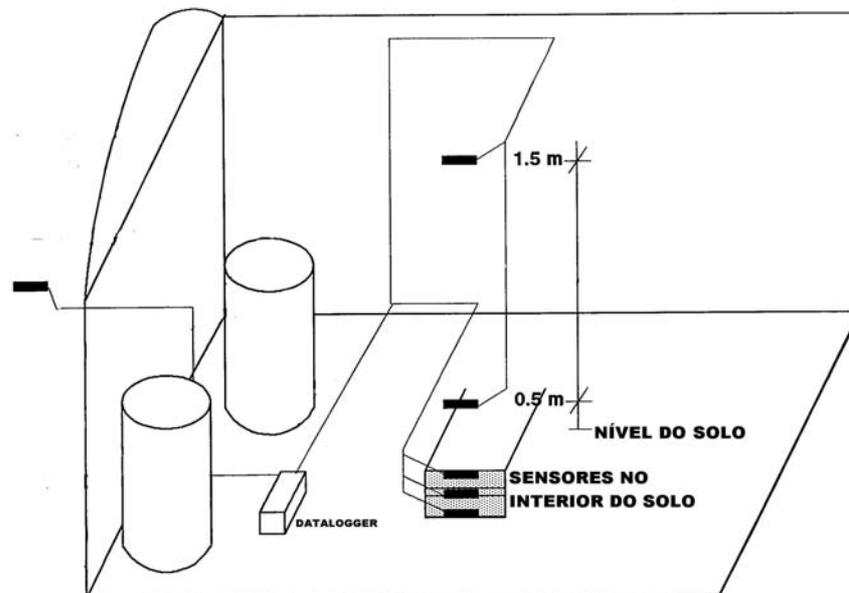


FIGURA 3. Esquema representado a posição dos sensores na casa de vegetação.

Com a finalidade de estudar a influência da colocação de cobertura de reduzido tamanho sobre o cultivo, com o fim de se diminuïrem as perdas de calor, foi construída para o experimento uma estrutura de pequenos pórticos de tubos de PVC comum, que mediam 1,05 m de altura por 1,05 m de largura, apoiados sobre pés laterais; sobre essa estrutura, foi fixada uma lâmina de polietileno transparente de 0,05 mm de espessura, perfurada na sua parte superior, com densidade de 16 furos de 3 mm de diâmetro por metro quadrado, para permitir a saída da transpiração do cultivo, diminuindo a formação de gotas por condensação no plástico. Essa estrutura foi usada para a formação de um túnel colocado na linha central, na posição, no centro da casa de vegetação, e a estrutura era montada ao entardecer, colocando-se os pórticos equidistantes a 1,05 m, conforme esquematizado na Figura 4, sendo essa estrutura denominada de túnel.

Para estudar a influência de cobertura de polietileno na casa de vegetação com a mesma finalidade da técnica anterior, foram instalados à altura de 2,20 m, sobre o solo, dois arames de 2 mm de diâmetro e outros dois do mesmo tipo junto às paredes laterais. Os arames estendiam-se sobre a metade longitudinal da casa da vegetação, e sobre eles foram colocadas três lâminas de polietileno de 0,05 mm de espessura, com 5 m de largura por 6 m de comprimento, de maneira a promover uma cobertura da área do cultivo e anteparando às paredes laterais. Para fechar as partes frontal e traseira do ambiente conseguido com os plásticos, foram montadas duas cortinas do mesmo material, ficando toda a estrutura móvel, podendo facilmente ser recolhida durante o dia e estendida durante a noite, sendo essa estrutura denominada dupla capa (Figura 5).

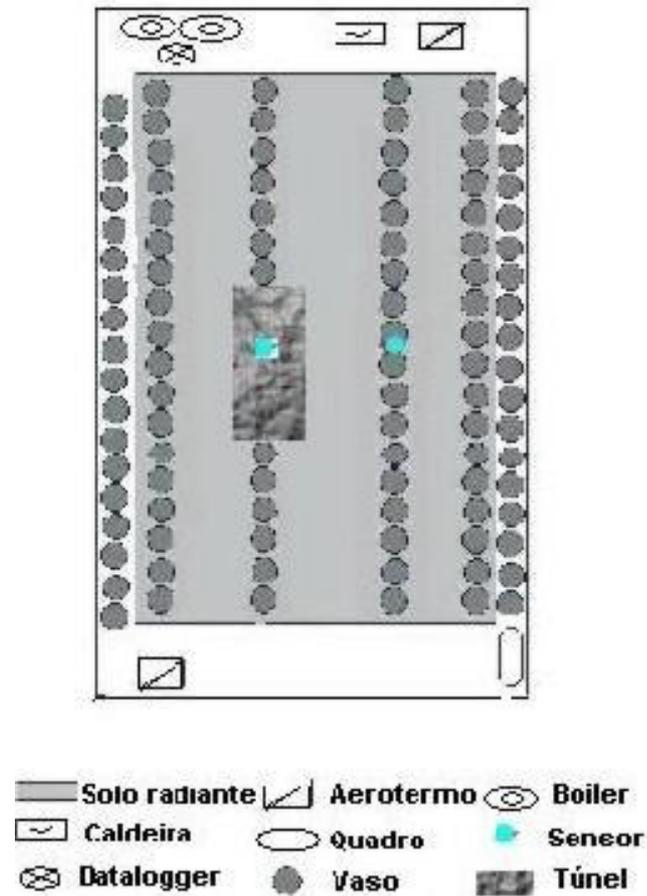


FIGURA 4. Esquema do posicionamento do túnel no interior da casa de vegetação.

Foram, então, realizadas combinações de cada técnica proposta (túnel e dupla capa) com os sistemas de aquecimento disponíveis (solo radiante e túnel), de acordo com um desenho experimental que permitiu a análise de cada situação. Os sensores eram então posicionados de forma a permitir a leitura das temperaturas nos pontos médios de cada estrutura montada, e a parte da casa de vegetação que não recebia nenhuma técnica para diminuir as perdas de calor, foi considerada como testemunha do experimento.

Esse experimento considerou 154 noites para utilização de solo radiante e 108 para utilização de aerotermos. Para cada noite do período experimental considerado, foram calculadas as médias aritméticas dos valores de temperatura no exterior, temperatura no interior e potência requerida pelo equipamento de aquecimento.

De posse dos valores médios calculados, procedeu-se, para cada noite na qual houve requerimento de aquecimento, a determinação do consumo de energia por metro quadrado de solo e o salto térmico médio entre o interior e o exterior da estrutura. Os valores do Coeficiente Global de Perdas de Calor (U) foram calculados segundo a eq.(2); esses valores foram separados por subperíodo para a verificação da qualidade dos mesmos. Os dados de temperatura foram

submetidos também ao teste t a fim de determinar as possíveis diferenças significativas entre os valores das médias.

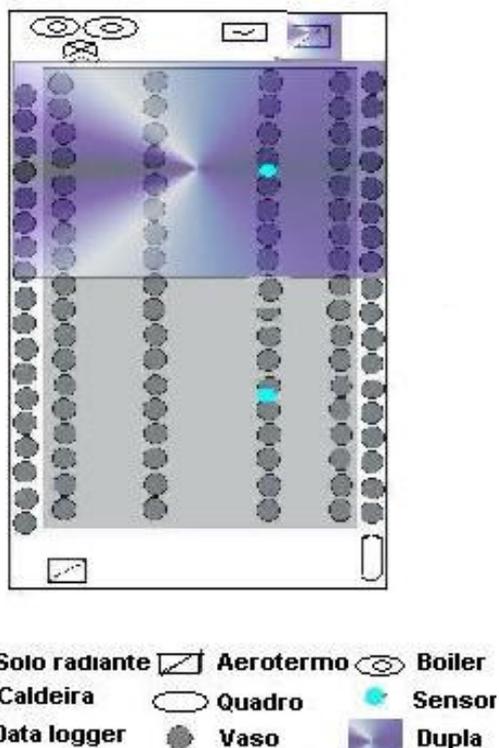


FIGURA 5. Esquema do posicionamento da dupla capa no interior da casa de vegetação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As temperaturas médias de cada técnica foram contrastadas por meio do teste t, supondo variâncias iguais (verificada pelo teste F). Foram obtidos os resultados da Tabela 1, na qual se pode verificar que, com exceção da combinação entre aeroterms e túnel, a 1% de significância, todas as demais técnicas obtiveram temperatura diferente, significativamente, do sistema de aquecimento de testemunha.

TABELA 1. Resultados do teste t (a 1% de significância) para as médias das temperaturas das técnicas ensaiadas. Test = testemunha; D. C. = dupla capa.

	Solo Radiante				Aeroterms			
	Test.	Túnel	Test.	D. C.	Test.	Túnel	Test.	D. C.
Média (°C)	13,30	18,40	12,5	14,70	14,00	14,60	13,50	18,40
Variância	15,27	7,39	6,13	5,86	2,63	1,71	3,12	6,19
Estatístico t	-4,77		-3,93		-1,07 ^{ns}		-9,98	

^{ns}: não-significativo.

A variação da temperatura para uma noite típica, para as duas combinações que forneceram os melhores resultados, é apresentada nas Figuras 6 e 7. Na Figura 6, apresenta-se que o salto térmico entre a temperatura externa e a temperatura no interior do túnel é superior ao salto em relação à temperatura da testemunha, bem como a temperatura no túnel é sempre superior. Na Figura 7, análise semelhante pode ser feita em relação à temperatura no interior da dupla capa e a temperatura da testemunha.

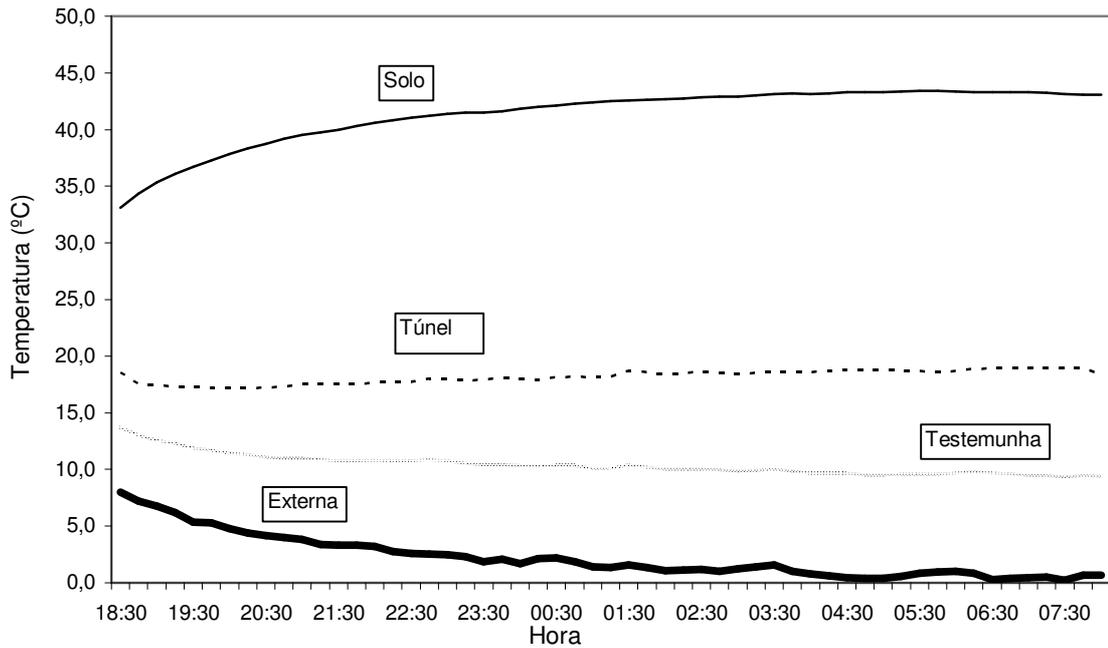


FIGURA 6. Variação da temperatura para uma noite típica com o uso de solo radiante e túnel.

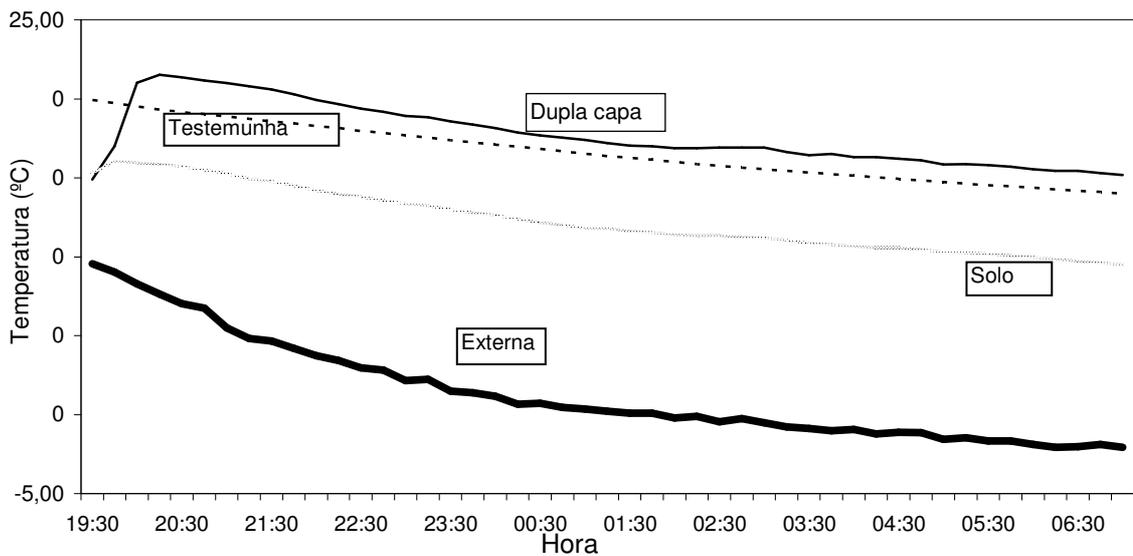


FIGURA 7. Variação da temperatura de uma noite típica com utilização de aerotermos e dupla capa.

Os coeficientes globais médios para cada técnica são, respectivamente, apresentados nas Figuras 8 e 9, para o primeiro subperíodo e para o período experimental completo. Nessas figuras, observou-se que, independentemente do período, o comportamento geral foi consistente, sendo que a técnica com menores perdas globais de calor foi com a utilização de solo radiante com túnel seguida pela dupla capa com aerotermos, dupla capa com solo radiante e, por último, a utilização de aerotermos com túnel.

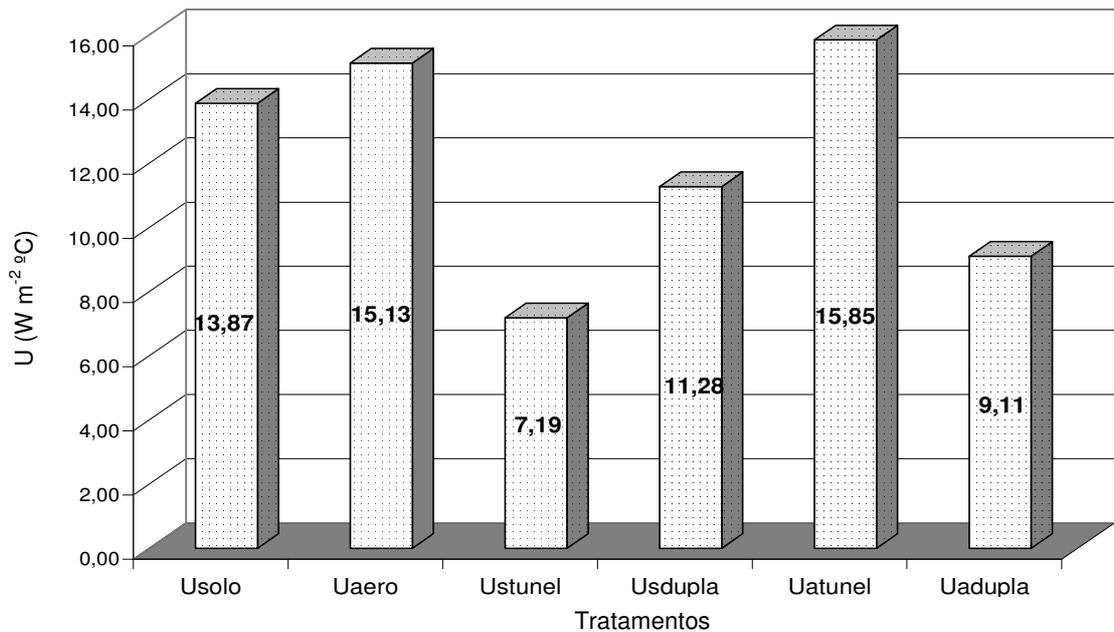


FIGURA 8. Coeficiente global de perdas de calor (U) por tratamentos, valores médios sobre as colunas para os dados do 1º subperíodo. Usolo = solo radiante; Uaero = aerotermos; Ustunel = túnel + solo radiante; Usdupla = dupla capa + solo radiante; Uatunel = túnel + aerotermos, e Uadupla = aerotermos com dupla capa.

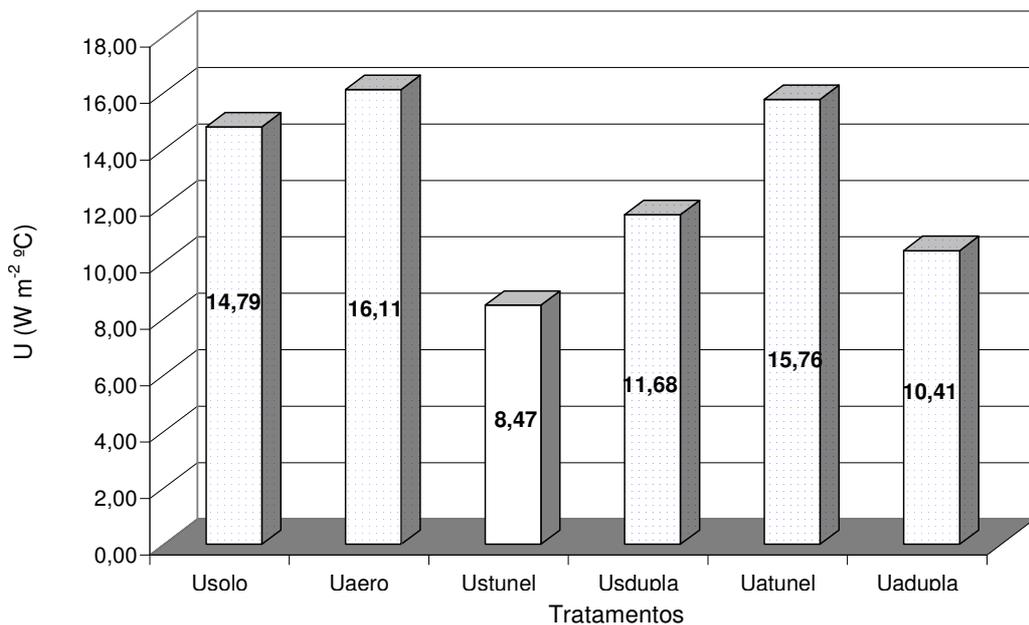


FIGURA 9. Coeficiente global de perdas de calor (U) por tratamentos; valores médios sobre as colunas para os dados do período experimental completo. Usolo = solo radiante; Uaero = aerotermos; Ustunel = túnel + solo radiante; Usdupla = dupla capa + solo radiante; Uatunel = túnel + aerotermos, e Uadupla = aerotermos com dupla capa.

Na literatura, são encontrados diversos valores para o coeficiente global de perdas de calor, mas como esse coeficiente depende dos parâmetros de cada casa de vegetação, servem apenas como referência aos valores aqui apresentados.

DAWSON & WINSPEAR (1976) utilizaram uma segunda capa de filme plástico negro (*blackout*) numa casa de vegetação de cobertura de vidro e obtiveram coeficiente global de perdas de calor para o período noturno em três campanhas consecutivas de $7,25 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para uma casa de vegetação sem cobertura plástica e de $4,81 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ com cobertura. Concluíram, então, que a colocação de cobertura pode alcançar redução das perdas na ordem de um terço em relação à referência. Considerando o avanço das técnicas construtivas e a solução tecnológica adotada, os valores obtidos nos experimentos apresentados são coerentes com os encontrados na literatura, demonstrando a importância de técnicas de eficiência energética.

As pequenas diferenças entre os valores para o primeiro subperíodo e o período experimental completo não são significativas. Os maiores valores do coeficiente U significam consumo relativamente maior que o dos menores coeficientes. Assim, as técnicas de uso do solo radiante e dos aerotermos levaram a coeficientes sempre superiores aos das técnicas de eficiência ensaiadas, demonstrando que essas conseguem efeito de conservação de energia.

A técnica que obteve o menor coeficiente foi o uso de solo radiante com túnel seguida pelo uso de aerotermos com dupla capa, solo radiante com dupla capa e com resultado pior que o do uso do solo radiante simples, aparece o uso dos aerotermos com túnel.

Análises econômicas que envolvessem o custo de instalação de cada sistema para cultivo comercial, não foram objeto deste estudo, sendo recomendada sua realização para análise de viabilidade dos investimentos, mas, seguramente, em situações em que o custo de energia é alto, as técnicas de maior eficiência energética tendem a ser amortizadas primeiramente.

Mais importante que verificar o valor absoluto do coeficiente de perdas de calor é a comprovação, na qual coincidem todos os autores, da utilização de uma barreira às perdas no interior da casa de vegetação. Entretanto, com os resultados obtidos, pode-se quantificar que a utilização do túnel com o solo radiante proporciona redução de 43% do consumo de energia com relação à utilização do solo radiante simples, e para a dupla capa com o solo, a redução é de 21%. No entanto, o uso de calefação por aerotermos proporcionou o valor com túnel de 2% de redução, e para dupla capa, de 35% para o conjunto de todo o período experimental.

CONCLUSÕES

O uso do coeficiente global de perdas de calor permitiu a identificação de técnicas que obtiveram resultados significativos quanto à redução do consumo de energia para dada condição térmica. A técnica mais econômica foi a utilização de solo radiante com túnel, e a técnica que resultou nas maiores perdas foi a utilização de aerotermos. Este estudo permitiu concluir que a utilização de plásticos em estruturas simples, no interior de casas de vegetação, pode melhorar significativamente seu desempenho térmico quando se pretende o aquecimento, promovendo melhor eficiência energética.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Politécnica de Madri e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- BASÇETINÇELİK, A.; ÖZTÜRK, H. The determination of the overall heat loss coefficient in plastic tunnel greenhouse with thermal screens. *Acta Horticulturae*, Leuven, v.443, p.85-91, 1997.
- DAWSON, J.R.; WINSPEAR, K.W. The reduction of glasshouse heat losses by internal blinds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, v.21, p.431-6, 1976.
- DE LA PLAZA, S.; BENAVENTE, R. M.; GARCÍA, J.L.; NAVAS, L.M.; LUNA, L.; DURÁN J.M.; RETAMAL, N. Modelling and optimal design of an electric substrate heating system for greenhouse crops. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, v.73, p.131-9, 1999.

- KÖRNER, O.; BAKKER, M.J.; HEUVELINK, E. Daily temperature integration: a simulation study to quantify energy consumption. *Biosystems Engineering*, London, v.87, n.3, p.333-43, 2004.
- LITAGO, J.; BAPTISTA, F.J.; MENESES, J.F.; NAVAS, L.M.; BAILEY, B.J.; SÁNCHEZ-GIRÓN, V. Statistical modelling of the microclimate in naturally ventilated greenhouse. *Biosystems Engineering*, London, v.92, n.3, p.365-81, 2005.
- MARSH, L.S.; SINGH, S. Economics of greenhouse heating with a mine air-assisted heat pump. *Transaction of the ASAE*, St. Joseph, v.37, p.1959-63, 1994.
- MONTERO J.I. Instalaciones y métodos de control climático: Calefacción. In: CURSO SUPERIOR DE ESPECIALIZACIÓN SOBRE TECNOLOGÍAS DE INVERNADEROS, Almería: UPM, 1994. 93 p.
- NELSON P.V. Greenhouse operation & management. 3rd.ed. Boston: Prentice Hall, 1998. 704 p.
- SEGINER, I.; KANTZ, D.; PEIPER, U.M.; LEVAV, N. Transfer coefficients of several polyethylene greenhouse covers. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, v.39, n.1, p.19-37, 1988.
- SPANOMITSIOS, G.K. Temperature control and energy conservation in a plastic greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, v.80, n.3, p.251-9, 2001.
- TEITEL, M.; SEGAL I.; SHKLYAR, A.; BARAK, M. A comparison between pipe and air heating methods for greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, London, v.72, n.1, p.259-73, 1999.