

Nota / Note

CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE PSICRÔMETRO ASPIRADO DE TERMOPAR

Fábio Ricardo Marin^{1,4*}; Luiz Roberto Angelocci^{2,5}; Maurício Antônio Coelho Filho^{3,4};
Nilson Augusto Villa Nova^{2,5}

¹ Pós-Graduando em Física do Ambiente Agrícola - USP/ESALQ.

² Depto. de Ciências Exatas - USP/ESALQ, C.P. 9 - CEP: 13418-900 - Piracicaba, SP.

³ Pós-Graduando em Irrigação e Drenagem - USP/ESALQ.

⁴ Bolsista CAPES.

⁵ Bolsista CNPq.

*Autor correspondente <farmarin@carpa.ciagri.usp.br>

RESUMO: Construiu-se um psicrômetro de termopar aspirado, de baixo custo e fácil utilização em sistemas automáticos de aquisição de dados, utilizando-se tubos de PVC. A aspiração foi feita por ventiladores utilizados em microcomputadores e as temperaturas foram determinadas com junções de termopar de cobre-constantan. Para umedecimento do bulbo, utilizou-se um cordão de algodão. Os resultados da comparação com higrômetro capacitivo Vaisala Inc. e com psicrômetro aspirado tipo Assman mostraram que tanto em ambientes naturais como em controlados, a precisão e a exatidão das medidas foi muito boa, de maneira que o psicrômetro aqui descrito pode ser empregado para determinação da pressão atual de vapor e da umidade relativa sem perda de qualidade dos dados, e também em estudos que levem em conta gradientes de temperatura e umidade específica.

Palavras-chave: psicrometria, psicrômetro ventilado, umidade do ar, temperatura do ar

CONSTRUCTION AND EVALUATION OF AN ASPIRATED THERMOCOUPLE PSYCHROMETER

ABSTRACT: The construction of a low cost aspirated thermocouple psychrometer made of PVC tubes is described. The instrument can easily be connected to dataloggers. The aspiration is made by fans used in microcomputers and temperatures measured with cooper-constantan thermocouples. A cotton string was used to make the wet junction. Its performance was evaluated in comparison to an Assman aspirated psychrometer and a Vaisala Inc. capacitive hygrometer, in natural and controlled environments. The results show a good agreement between measures, allowing air vapour, relative humidity, temperature and specific humidity gradients to be determined using the proposed psychrometer.

Key words: psychrometry, ventilated psychrometer, air humidity, air temperature

INTRODUÇÃO

O vapor d'água é um componente importante da atmosfera, por afetar desde o comportamento e o bem estar dos seres humanos até a qualidade dos bens produzidos e o rendimento dos vegetais cultivados. Em agricultura, esse componente atmosférico é especialmente importante, haja visto as inúmeras interações que tem com as espécies vegetais, representando, muitas vezes, fator decisivo para a implantação ou não de determinado cultivo numa dada região.

A quantificação da umidade do ar pode ser feita por vários tipos de instrumentos: os psicrômetros, que utilizam as leituras de um termômetro de bulbo seco (temperatura do ar) e a de um bulbo úmido, e os higrômetros, que utilizam a medida da variação de uma propriedade física de um material (variação das dimensões de uma substância higroscópica, como o

cabelo humano, da capacitância de um polímero higroscópico etc.) relacionada com a mudança da umidade do ar.

O uso da diferença entre a temperatura do ar e a temperatura de um sensor recoberto por uma superfície evaporante para a quantificação da umidade de ar foi relatada pela primeira vez em meados do século 18 (Bindon, 1965), de forma que o psicrômetro é o mais antigo instrumento utilizado para determinação do conteúdo do vapor d'água da atmosfera (Fritschen & Gay, 1979). Este instrumento é, ainda hoje, o método mais prático e conhecido para medição da umidade do ar (White & Ross, 1991), além de permitir bom nível de precisão nas medidas (Guyot, 1999).

Apesar do aparato psicrométrico apresentar diversas formas de construção, sua constituição essencial conta com um sensor de temperatura do ar (temperatura do bulbo seco - ts), e outro idêntico recoberto pela mecha de musselina, constantemente

umedecida e em evaporação (temperatura do bulbo úmido - t_u), com as medidas sendo realizadas simultaneamente em ambos os sensores.

Em geral, recomenda-se a construção de psicrômetros em que ambos os sensores de temperatura sejam protegidos e submetidos a uma corrente forçada de ar, com o objetivo de minimizar efeitos ambientais sobre o coeficiente psicrométrico (Bindon, 1965).

Nos últimos anos, com o crescimento no uso de sistemas automáticos de aquisição de dados, as medidas de temperatura utilizando-se junções termoeletricas tornaram-se mais fáceis, precisas e baratas, permitindo seu emprego em diversos tipos de estudos, desde aqueles em que se deseje conhecer apenas a temperatura absoluta de determinado ambiente até os que necessitem da medida de pequenos gradientes. Atualmente, os equipamentos para medida desses gradientes são de custo elevado e de complexa manutenção, como os utilizados nos estudos de partição da energia disponível pelo método da razão de Bowen.

Como alternativa, descreve-se neste trabalho os detalhes de construção de um psicrômetro de termopar de baixo custo, cujo desempenho foi comparado com um sensor comercial de umidade relativa e temperatura e com um psicrômetro tipo Assman, considerado como referência para esse tipo de medida.

MATERIAL E MÉTODOS

O psicrômetro é constituído por dois tubos de PVC, concêntricos, com 150 mm de comprimento e diâmetros internos de 100 mm e 50 mm. As extremidades dos tubos são fixas por dois "caps" de 100mm, com perfuração de 50 mm em seu centro e aproximadamente 20 furos de pequeno diâmetro (cerca de 5 mm), com o objetivo de promover a circulação de ar em ambos os tubos, minimizando dessa forma a carga térmica nas horas mais quentes do dia (Figura 1).

O reservatório de água fica acoplado ao psicrômetro lateralmente, para facilitar a ascensão capilar da água até a junção termoeletrica, através da mecha de musselina ou de um cordão de algodão (previamente fervido nos casos em que se verificar a presença de goma), sendo recomendado envolver a mecha e a junção com fio de algodão, assegurando assim um perfeito contato entre eles (Figura 2). Com o objetivo de evitar o desequilíbrio térmico entre a água e ar, o reservatório foi protegido da incidência de radiação solar direta cobrindo-o com uma placa de neopreno envolvida por papel aluminizado.

A aspiração do psicrômetro é feita por ventiladores comumente utilizados em microcomputadores, acoplado ao corpo do psicrômetro através de um "cap" de 100mm, fixado a ele por quatro parafusos. Este "cap" necessita ter sua face interna desgastada em cerca de 1mm para que haja um bom

encaixe no corpo do psicrômetro. No presente estudo, utilizou-se ventiladores da marca Sprite Arno Rotron, modelo SU9E5, 115 Volts e 50 Hz. Com essa constituição, a velocidade do vento que passa pelo bulbo úmido é de aproximadamente 7 m s^{-1} , o que concorda com a recomendação de Seck & Perrier (1970), permitindo assim a utilização do coeficiente psicrométrico ($0,00067^\circ\text{C}^{-1}$) proposta por Ferrel (1886), citado por Harrison (1965).

Os termopares de cobre-constatan, bitola AWG 24, formavam junções com cerca de 5 mm de comprimento; com a junção seca posicionada anteriormente em relação à úmida no sentido do fluxo de ar, e distanciadas uma da outra por 5 cm.

Para avaliação do desempenho, compararam-se os resultados do psicrômetro proposto com os de um psicrômetro elétrico aspirado, tipo Assman, constituído de dois termômetros de mercúrio, com resolução de $0,2^\circ\text{C}$, marca Rössel Messtechnik, modelo 11c. Utilizou-se também um sensor comercial para medir a umidade relativa do ar, através de um sistema capacitivo acoplado a um termistor para medida da temperatura do ar, marca Vaisala Inc., modelo HMP45C, durante o dia 22 de maio de 2000, sendo ambos instalados no posto agrometeorológico do Departamento de Ciências Exatas, ESALQ/USP Campus "Luiz de Queiroz", da

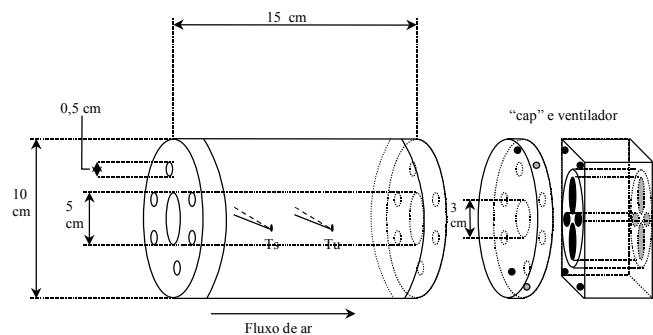


Figura 1 - Representação esquemática da vista lateral do psicrômetro e suas respectivas dimensões.

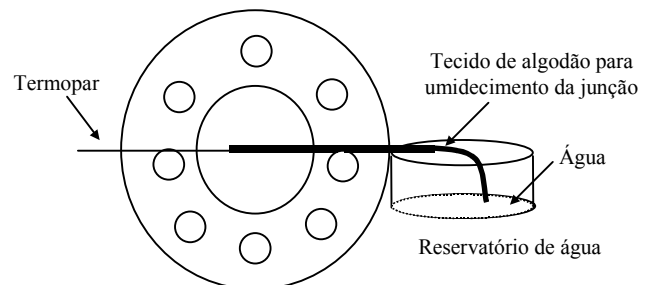


Figura 2 - Representação esquemática da vista frontal do psicrômetro, ilustrando a posição do reservatório de água e o umedecimento do tecido de algodão.

Universidade de São Paulo, em Piracicaba, SP (latitude, 22°42' S, longitude 47°30'W e altitude 546 m). Nessa comparação, os sensores foram instalados a uma altura de 1,5 m.

Um segundo procedimento de calibração foi realizado entre os dias 26 e 29 de maio de 2000, sob condições controladas de casa de vegetação instalada no Laboratório de Plantas Cultivadas sob Condição de Estresse do Departamento de Ciências Biológicas, ESALQ/USP. Foram utilizados o psicrômetro tipo Assman e o sensor comercial Vaisala, instalando-se porém três psicrômetros tipo proposto, visando avaliar sua repetibilidade sob diferentes condições de pressão atual de vapor de água. A resposta dinâmica dos aparelhos também foi avaliada por meio de alterações rápidas da umidade relativa do ar, obtida pelo acionamento do sistema de nebulização da casa de vegetação. Em ambos os procedimentos, os psicrômetros propostos foram conectados a um sistema de aquisição de dados marca Campbell Sci., modelo 21X, programada para realizar leituras a cada 1 segundo e médias a cada 15 minutos.

A umidade relativa foi obtida através da seguinte expressão:

$$UR = \frac{e_a}{e_s} 100 \quad (1)$$

em que: e_a é a pressão atual de vapor (kPa), dada pela equação psicrométrica:

$$e_a = e'_s - A.P.(T_s - T_u) \quad (2)$$

sendo e'_s a pressão saturante de vapor à temperatura do bulbo úmido (T_u), dada pela equação de Tetens:

$$-e'_s = 0,6108.10^{\frac{7,5.T_u}{237,3+T_u}} \quad (3)$$

P é a pressão atmosférica do local de medida, adotada como 96,0 kPa; A é o coeficiente psicrométrico ($0,00067^{\circ}\text{C}^{-1}$); e e_s é a pressão de saturante de vapor à temperatura do bulbo seco (T_s), dada também pela equação de Tetens (kPa).

$$e_s = 0,6108.10^{\frac{7,5.T_u}{237,3+T_u}}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra as curvas de variação da umidade relativa (UR) ao longo do dia 22 de maio dos três tipos de sensores utilizados. Pode-se verificar o bom ajuste entre as medidas realizadas pelo aparelho construído com as provenientes dos demais. Pode-se verificar também a boa concordância entre as medidas,

desde as condições de elevada UR até os momentos mais quentes do dia, quando a UR atingiu seu valor mínimo, com exceção do período entre 10 e 11 horas.

A Figura 4 ilustra a curva de variação da umidade relativa do ar obtida a partir das temperaturas de três psicrômetros do tipo proposto, além das curvas dos outros dois já utilizados no procedimento anterior. Os momentos de elevação da umidade relativa no interior da casa de vegetação foram registrados por todos os sensores, dando indício de boa capacidade de resposta frente as alterações bruscas nas condições de ambientais.

Entretanto, nas horas mais quentes do dia, a UR proveniente do psicrômetro tipo Assman apresentou alguma discrepância em relação aos demais. Esse desvio pode ser atribuído às dificuldades inerentes ao psicrômetro tipo Assman, que vão desde a visualização correta da coluna de mercúrio (com possíveis erros de paralaxe), passando pela graduação dos termômetros ($0,2^{\circ}\text{C}$), até a detecção do momento exato de se realizar

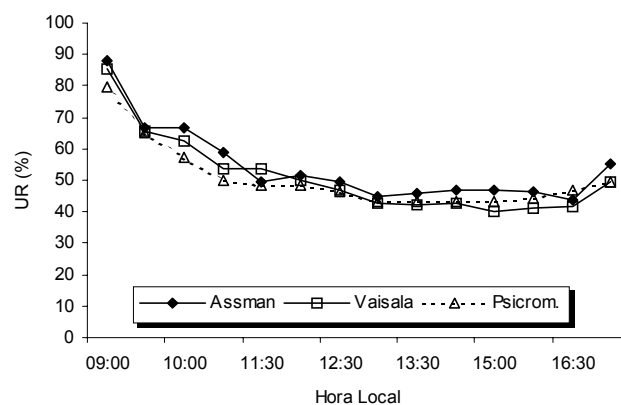


Figura 3 - Variação horária da umidade relativa do ar calculada a partir dos dados do psicrômetro proposto (P1), do psicrômetro tipo Assman e do sensor capacitivo, sob condições naturais em 22/05/2000.

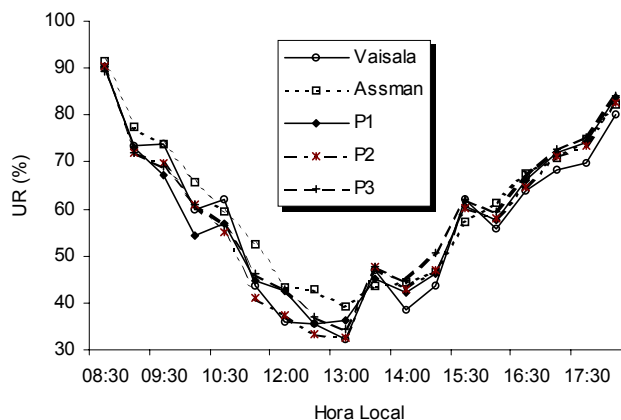


Figura 4 - Variação horária da umidade relativa do ar calculada a partir dos dados de três psicrômetros proposto (P1, P2 e P3), do psicrômetro tipo Assman e do sensor comercial Vaisala, sob condições de casa de vegetação em 26/05/2000.

as leituras da temperatura do bulbo úmido, já que entre o umedecimento do tecido e o início do processo de evaporação, recomenda-se de três a cinco minutos, de acordo com as condições ambientais durante o procedimento.

A Figura 5 mostra as equações de regressão e coeficientes de correlação (R^2) dos dados dos três tipos de sensores. Nota-se a boa concordância entre as medidas, principalmente de T_s e T_u . Com relação à pressão atual de vapor (ea) são verificadas os maiores desvios, e isso é ocasionado pelo fato de ea ser função exponencial da temperatura, levando a uma subestimativa por parte do psicrômetro proposto da ordem de 4%. Por outro lado, tais medidas, por seu caráter pontual, levam em conta erros que são minimizados quando se trabalha com dados médios de 15 minutos, já que no processo de coleta dos dados de temperatura pelo sistema de aquisição, verifica-se uma flutuação significativa entre uma medida e outra.

Sob condições controladas de casa de vegetação, estudou-se a variação da umidade relativa obtida a partir dos dados dos três psicrômetros do tipo proposto ao longo de três dias (Figura 6), tomando-se os dados médios de 15 minutos registrados pelo sistema de aquisição de dados. Pode-se verificar a boa concordância entre os três aparelhos construídos, sob as diferentes condições de UR, nos três dias.

Essa característica é especialmente importante quando há interesse em se quantificar gradientes de temperatura e umidade específica do ar. Além disso, nos estudos em que se pretende quantificar fluxos de calor sensível e latente sobre determinadas áreas, as variáveis de interesse podem ser apenas a temperatura do bulbo seco e a temperatura do bulbo úmido, de forma que a acurácia dessas medidas passa a ser extremamente importante, já que na maior parte dos casos, as diferenças entre elas são mínimas.

Analisando-se as curvas de variação da umidade relativa durante os três dias, vê-se que, durante o período noturno, ocorreram as maiores diferenças entre o psicrômetro construído e o sensor Vaisala, o que pode estar associado a abaixamento significativo da temperatura do ar durante a noite sem o resfriamento proporcional da temperatura da água do reservatório do psicrômetro, ocasionando assim uma menor depressão psicrométrica e, por conseguinte, umidade relativa maior que a medida pelo sensor capacitivo.

A Figura 7 mostra a correlação entre as temperaturas de bulbo seco dos três psicrômetros propostos e do sensor Vaisala. Analisando-se os coeficientes angulares (b) e os R^2 obtidos nas quatro correlações, pode-se inferir que a exatidão e a precisão das medidas realizadas pelos psicrômetros é muito boa, haja visto a ótima correlação obtida numa ampla faixa

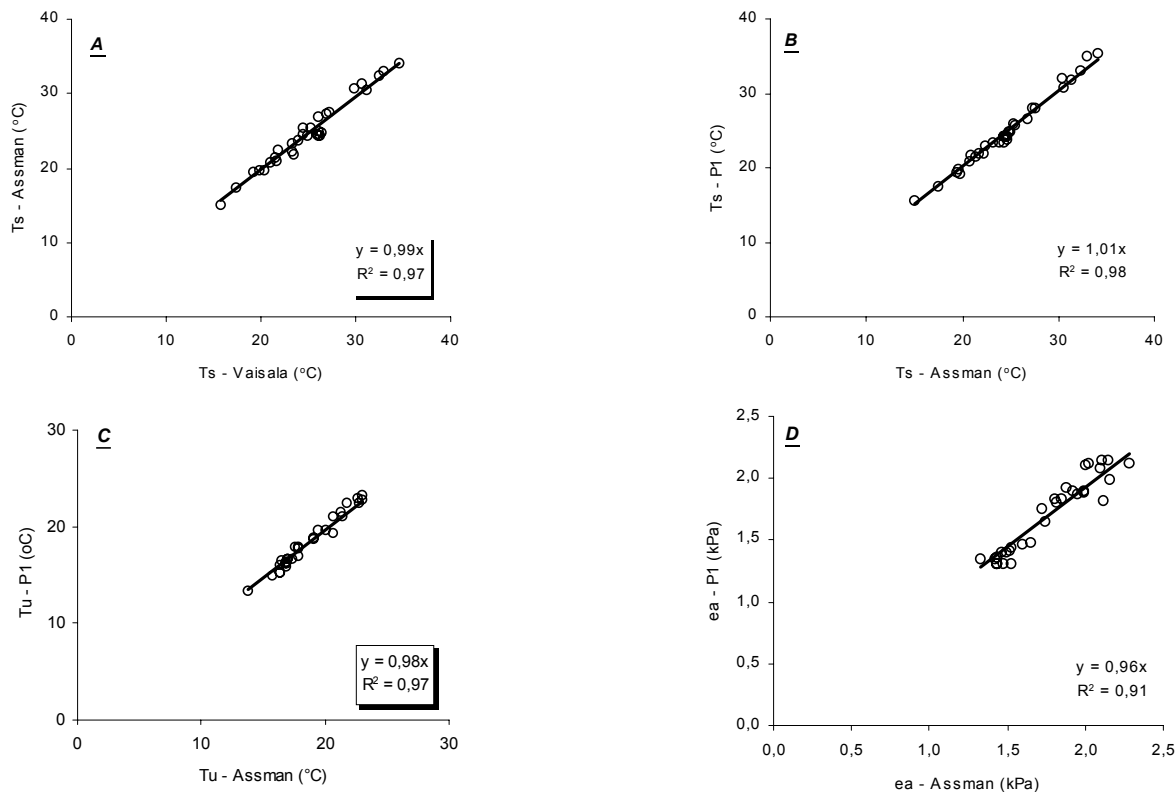


Figura 5 - Relação entre a temperatura do bulbo seco do psicrômetro Assman e a temperatura do ar do sensor comercial (A), entre as temperaturas do bulbo seco e do bulbo úmido do psicrômetro Assman e do psicrômetro proposto (B e C), e relação entre a pressão atual de vapor (ea) calculada com dados do psicrômetro tipo Assman e do psicrômetro proposto (D), nos dias 22 e 26 de maio de 2000.

de variação da temperatura, que foi de 8°C até os 38°C durante o período de medidas. Da mesma maneira, as temperaturas do bulbo úmido registradas pelos psicrômetros tiveram altos níveis de correlação desde as temperaturas próximas de 5°C até o máximo de 27°C, de forma que o coeficiente angular variou entre 0,99 e 1,00 enquanto que o R^2 manteve-se igual a 1,0 nas três correlações.

Ao se avaliarem as relações entre a pressão atual de vapor d'água (ea) determinada a partir das medidas dos psicrômetros e do sensor comercial, são verificadas as maiores diferenças, principalmente nas condições de elevado conteúdo de vapor no ar (Figura 9). Tais diferenças são decorrentes dos pequenos

erros verificados nas relações entre as temperaturas do bulbo seco e do bulbo úmido (Figuras 7 e 8), pelo fato já abordado de ea ter relação exponencial com a temperatura. Tal fato, em termos médios, não compromete a utilização do psicrômetro proposto em aplicações em que se deseje quantificar ea em determinado ambiente ou mesmo estimar o fluxo de vapor a partir de seu gradiente, pois as relações obtidas mostram bom ajuste tanto entre os psicrômetros como com o sensor comercial. Nas relações entre os psicrômetros, verificou-se um desvio médio máximo de 2%, enquanto que em comparação com o sensor comercial esse desvio foi de 5%.

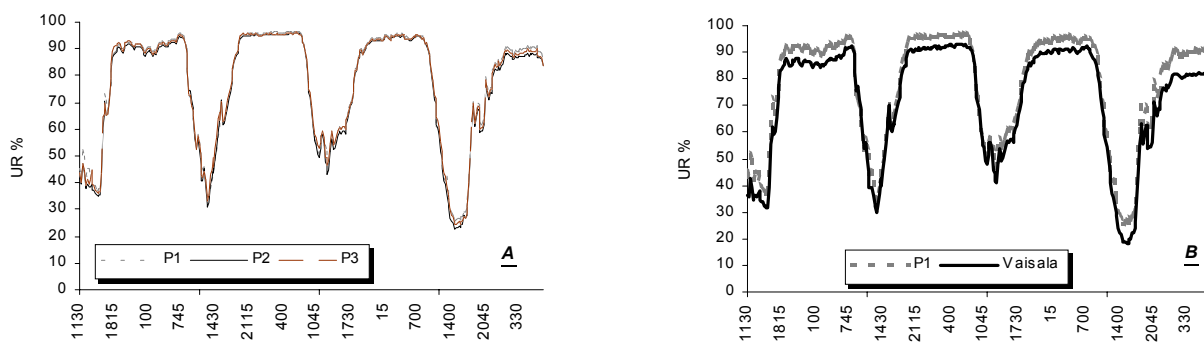


Figura 6 - Curvas de variação da umidade relativa calculada com os dados de três psicrômetros de propostos (P1, P2 e P3, gráfico A) e de um dos psicrômetros propostos e o sensor comercial (B) entre os dias 26 e 29 de maio de 2000.

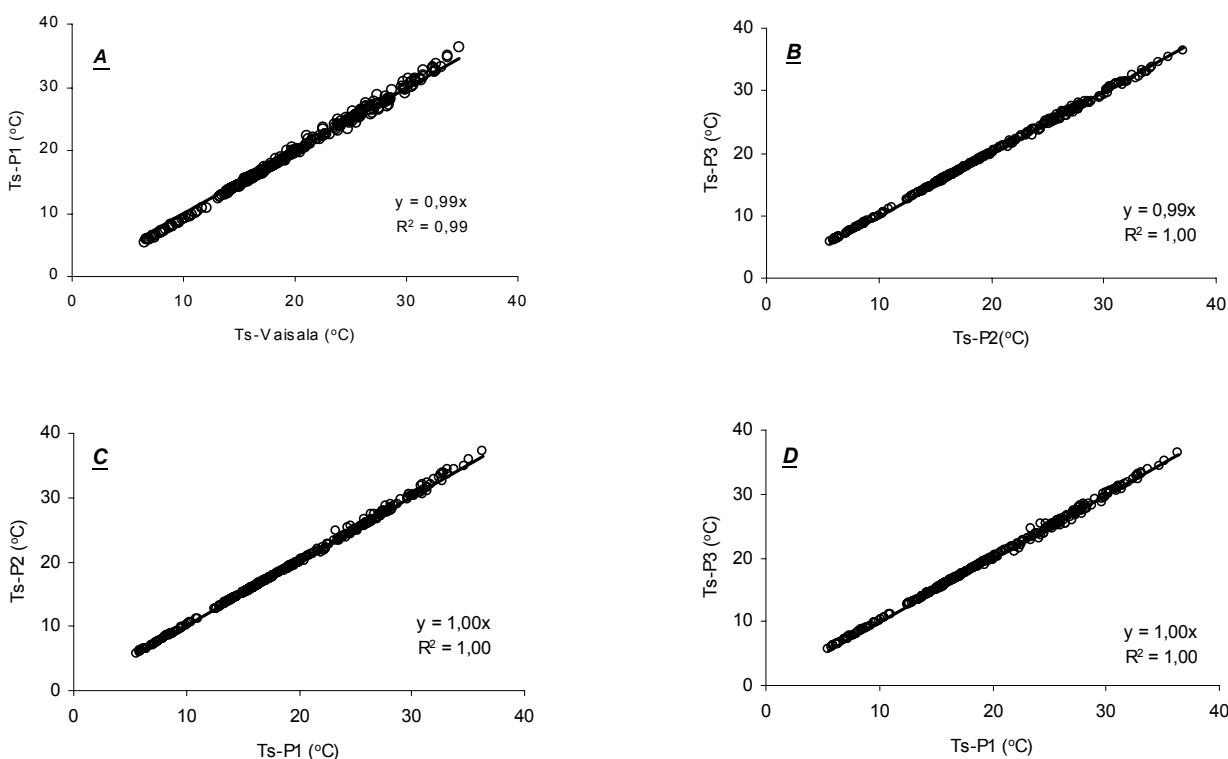


Figura 7 - Relação entre as temperaturas do bulbo seco medidas por três psicrômetros (P1, P2 e P3) e a temperatura do ar medida pelo sensor comercial (Vaisala) durante os dias 26 e 29 de maio de 2000.

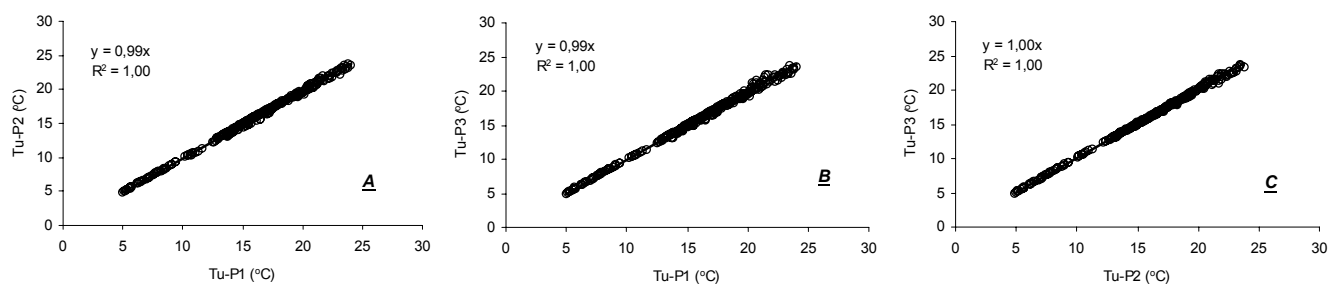


Figura 8 - Relação entre as temperaturas do bulbo úmido medidas pelos três psicrômetros (P1, P2 e P3) durante os dias 26 e 29 de maio de 2000.

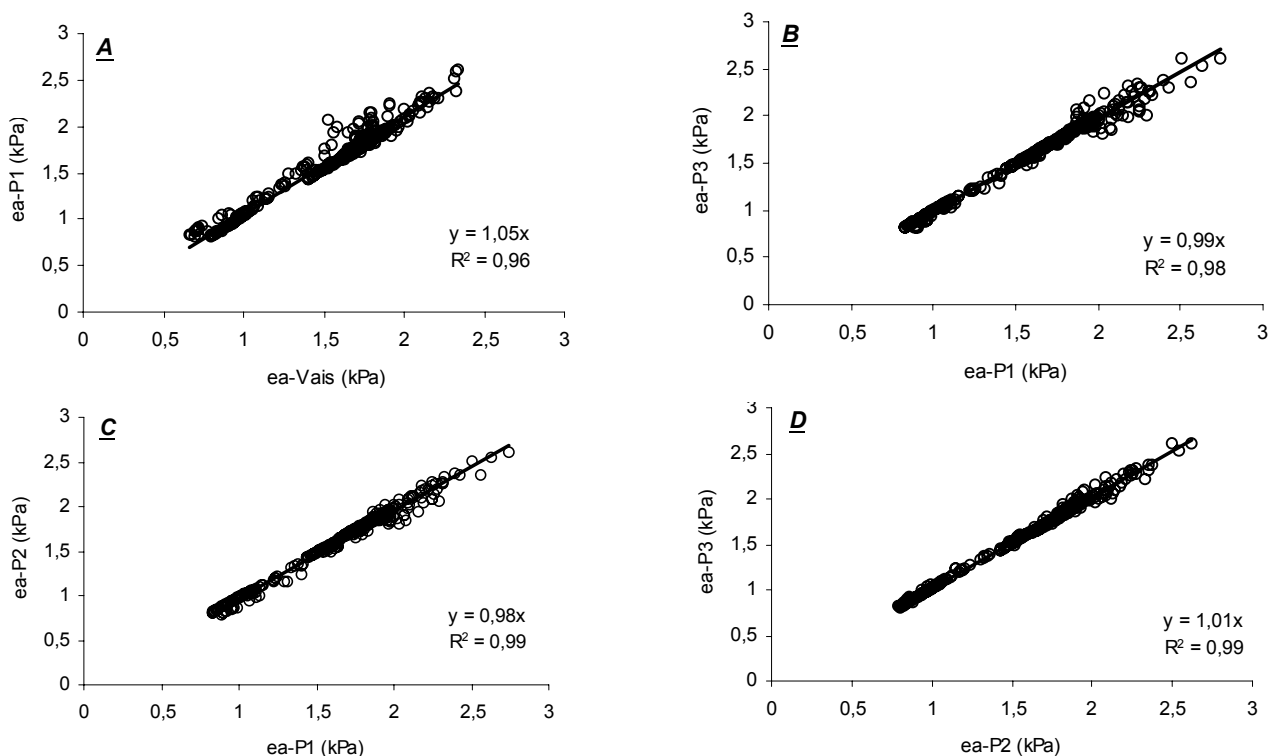


Figura 9 - Relação entre a pressão atual de vapor d'água determinada a partir das medidas dos três psicrômetros (P1, P2 e P3) e a do sensor comercial (Vaisala) entre os dias 26 e 29 de maio de 2000.

CONCLUSÕES

O psicrômetro proposto pode ser utilizado para determinação da umidade relativa, tendo desempenho satisfatório quando comparado com o psicrômetro tipo Assman e com o sensor Vaisala, apresentando a vantagem de ser de fácil construção e manutenção, e de baixo custo. Pode também ser empregado em estudos que levem em conta gradientes de temperatura e umidade específica, tanto em condições naturais como em ambientes controlados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BINDON, H.H. A critical review of tables and charts use in psychrometry. In: WEXLER, A. **Humidity and moisture**. New York: Reinhold, 1965. v.1, p.3-15.
- FRITSCHEN, L.J.; GAY, L.W. **Environmental instrumentation**. New York: Springer-Verlag, 1979. 212p.
- GUYOT, G. **Climatologie de l'environnement**. Paris: Durrod, 1999. 525p.
- HARRISON, L.P. Some fundamental considerations regarding psychrometry. In: WEXLER, A. **Humidity and moisture**. New York: Reinhold, 1965. v.3, p.71-104.
- WHITE, G.M.; ROSS, I.R. Humidity. In: HENRY, Z.A.; ZOERB, G.A.; BIRTH, G.S. **Instrumentation and measurement for environmental sciences**. Saint Joseph: ASAE, 1991. p.8.01-8.13.
- SECK, M.; PERRIER, A. Description d'un psychromètre a thermocouples. Son application a la mesure des gradients d'humidité. In: BUSTARRET, J. **Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère**. Paris: INRA, 1970. p.440-468.

Recebido em 11.08.00