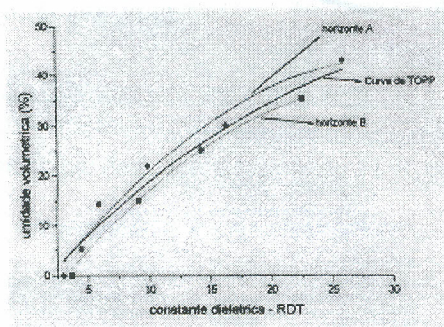


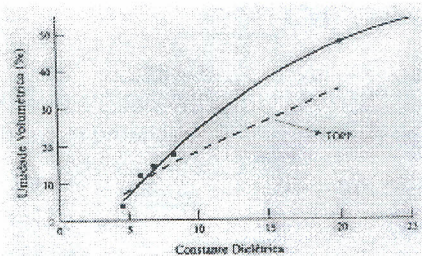
Curva de Calibração

Para a obtenção dos valores de umidade com maior precisão, conhecer a curva de calibração do solo, que relaciona constante dielétrica (ϵ) com a umidade volumétrica (%) vem a ser importante. Na Figura 2.28a pode ser vista a curva de calibração, obtida com o TDR, para o solo de Pindorama, SP, um podzólico vermelho amarelo. Neste caso, tem-se a curva de calibração do solo de Pindorama, para os horizontes A e B. Pode ser visto neste gráfico a comparação com a curva de calibração publicada por TOPP et al. (1980). As densidades das amostras de solo, do horizonte A variaram entre 1,39 à 1,41 g/cm³ e as do horizonte B de 1,27 à 1,34 g/cm³.

A curva de calibração do solo de Campo Novo do Parecis, MT, um latossolo vermelho amarelado, é apresentada na Figura 2.28b. Esse solo é bastante fino, possuindo textura predominantemente argilosa. A diferença encontrada nas curvas de calibração têm explicação em função da composição físico-química do solo e da granulometria do solo.



(a)



(b)

Figura 2.28. Curvas de calibração para solos brasileiros e comparação com a curva de calibração publicada por TOPP et al. (1980). (a) Solo de Pindorama, SP, horizontes A e B; (b) Solo de Campo Novo do Parecis, MT, horizonte A.

Novos Resultados Experimentais, Vantagens e Desvantagens do Uso da Técnica

Uma nova configuração de sonda TDR foi construída de forma segmentada em espaços distintos. A Figura 2.29a mostra o detalhe da construção da sonda de 4 fios e as dimensões da mesma. Na Figura 2.29b pode ser visto o sinal

característico da antena segmentada reproduzido na tela do equipamento TDR.

A vantagem de se utilizar a haste segmentada esta baseada no fato da redução de erros de leitura devido a variabilidade espacial e no acompanhamento da frente de molhamento no mesmo local (HERRMANN et al., 1995; CONCIANI et al., 1997).

A Figura 2.30 ilustra a avaliação da evolução da umidade do solo, ao longo do perfil em tempos determinados.

As seguintes vantagens do uso da técnica TDR podem ser citadas: a) técnica não-destrutiva; b) não utiliza radiação ionizante; c) alta exatidão na medida do conteúdo de água; d) baixo custo no acoplamento a um coletor de dados; e) portabilidade; f) medidas podem ser realizadas tanto no perfil horizontal como no perfil vertical no solo; e g) medidas podem ser feitas em campo, sem causar distúrbios no solo.

Entretanto, encontram-se, também, algumas desvantagens do uso da técnica TDR, podendo ser destacadas: a) influência da salinidade nas medidas de umidade volumétrica; b) influência dos óxidos de ferro no processo de leitura, através da permeabilidade característica de cada óxido; c) dependência do tipo de solo, isto é, a dependência de solos minerais e solos inorgânicos na calibração; e d) variações significativas da densidade global do solo, em particular em solos expansivos, provocam considerável mudança na leitura do conteúdo de água.

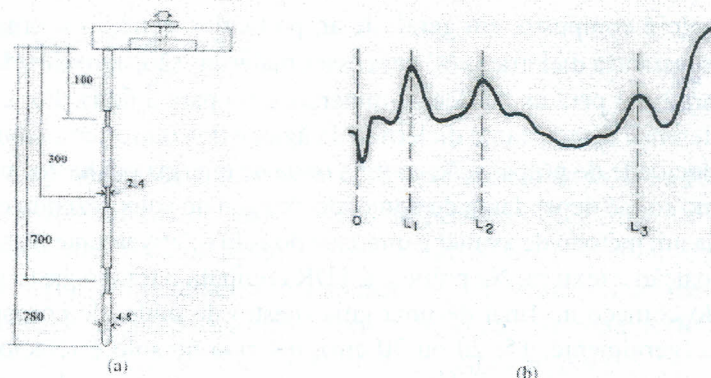


Figura 2.29. (a) Arranjo esquemático da sonda TDR com haste segmentada. (b) Sinal característico, obtido com a antena segmentada e que pode ser observada na tela do TDR. O eixo X é a grandeza medida pelo equipamento dado em metro (m), sendo L_1 , L_2 e L_3 as marcas registradas pelo aparelho devido as discontinuidades da sonda.

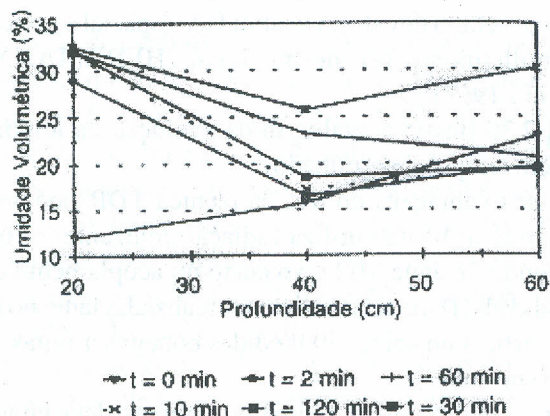


Figura 2.30. Medida da umidade do solo em diferentes profundidades, com distintos tempo utilizando a antena segmentada.

Modelos Que Relacionam a Propriedade Dielétrica e a Umidade do Solo (TDR)

O solo é composto, em geral, de ar, partículas minerais e orgânicas e água. As constantes dielétricas (ϵ) para esses materiais são, aproximadamente, 1 para o ar, 2 a 4 para as partículas minerais e 80 para a água. Por causa da grande diferença da constante dielétrica da água e dos outros constituintes do solo, a velocidade de propagação de uma onda de energia em hastes paralelas inseridas no solo é dependente do conteúdo de água no solo, fazendo com que a TDR seja um método de avaliar a umidade do solo relativamente insensível à sua composição e textura. Na prática, a TDR computa o tempo gasto para um pulso ir do começo ao final de uma guia (haste) de onda, de comprimento conhecido (geralmente, 15, 20 ou 30 cm), inserida no solo e relaciona esse tempo com a propriedade dielétrica que, por sua vez, está relacionada ao conteúdo de água no solo. A medição do tempo é feita com um osciloscópio que já vem embutido nos aparelhos atuais (JURY et al., 1991). O processador da TDR incorpora um sistema altamente sensível capaz de medir o tempo em picosegundos (um picosegundo é um trilionésimo do segundo).

Se o solo estiver completamente seco, o ϵ da equação 2.34 será de 2 a 4. Se 25% do volume do solo for água, o ϵ estará aproximadamente entre 11 e 12.

Para solos de interesse agrícola, os valores de ε dependem basicamente do conteúdo volumétrico de água do solo e independem bastante do tipo de solo.

A relação entre o valor de ε e a percentagem volumétrica de água no solo tem sido calibrada através de medições cuidadosas de ε em células de teste preparadas com volumes precisos e conhecidos de água no solo. Essa relação é então usada para converter automaticamente medições de campo de ε com o conteúdo volumétrico de água no solo.

Basicamente, dois modelos matemáticos para relacionar a propriedade dielétrica do solo com o seu conteúdo de água são descritos na literatura. Um modelo empírico, que consiste em um polinômio do terceiro grau, foi ajustado por TOPP et al. (1980) e funciona bem para solos minerais com conteúdo de água menor que $0,5 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$ (OR & WRAITH, 1997):

$$\theta_v = -5,3.10^{-2} + 2,92.10^{-2} \cdot \varepsilon_b - 5,5.10^{-4} \cdot \varepsilon_b^2 + 4,3.10^{-6} \cdot \varepsilon_b^3 \quad (2.35)$$

onde θ_v é o conteúdo de água no solo, expresso em volume, e ε_b é a propriedade dielétrica do complexo ar-solo-água. Um segundo modelo, fisicamente embasado, considera a propriedade dielétrica dos constituintes do solo individualmente (OR & WRAITH, 1997):

$$\theta_v = \frac{\varepsilon_b^\beta - (1-n) \cdot \varepsilon_s^\beta - n \cdot \varepsilon_a^\beta}{\varepsilon_w^\beta - \varepsilon_a^\beta} \quad (2.36)$$

onde ε_b é a propriedade dielétrica do complexo ar-solo-água, ε_s é a propriedade dielétrica dos sólidos do solo, ε_a é a propriedade dielétrica do ar, ε_w é a propriedade dielétrica da água, n é a porosidade total do solo, expressa em volume, e β é um parâmetro relacionado com a geometria do meio poroso, geralmente de valor 0,5 para meios porosos bifásicos, isotrópicos (ROTH et al., 1990, citados por OR & WRAITH, 1997). Assumindo $\beta = 0,5$, $\varepsilon_w = 81$, $\varepsilon_s = 4$ e $\varepsilon_a = 1$, a equação 2.36 fica simplificada para:

$$\theta_v = \frac{\sqrt{\varepsilon_b} - (2-n)}{8} \quad (2.37)$$

A equação 2.37 produz uma curva de calibração similar a de TOPP et al. (1980), para a faixa do conteúdo de água de até $0,5 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, e descreve uma faixa maior de umidade, o que é interessante para solos mais pesados e

orgânicos (OR & WRAITH, 1997).

Uma terceira forma consiste simplesmente em interpolar linearmente valores do conteúdo de água no solo para valores da propriedade dielétrica medidos no solo, usando-se uma tabela fornecida pelo próprio fabricante ou gerada pelo usuário (SOILMOISTURE, 1996). Essa forma parece ser mais flexível, pois permite que guias ou sondas de onda desenvolvidas localmente, a um custo menor, possam ser calibradas e usadas com o mesmo equipamento TDR. A Figura 2.31 mostra a relação entre a propriedade dielétrica do solo (ϵ_b ou Ka) e o conteúdo volumétrico de água no solo (θ_v). Essa relação foi desenvolvida usando células de teste cuidadosamente preparadas com diferentes tipos de solo que forneciam valores precisos do conteúdo volumétrico da água no solo (SOILMOISTURE, 1996). Os valores de ϵ_b não são exatamente os mesmos para os diversos tipos de solo (predominantemente areia, silte ou argila). Essas diferenças podem ser devido às diferenças nas ligações das moléculas da água aos diferentes minerais presentes no solo, tanto quanto devido a outras características físicas ainda não plenamente conhecidas. Entretanto, essas diferenças são mínimas na avaliação do conteúdo de água no solo.

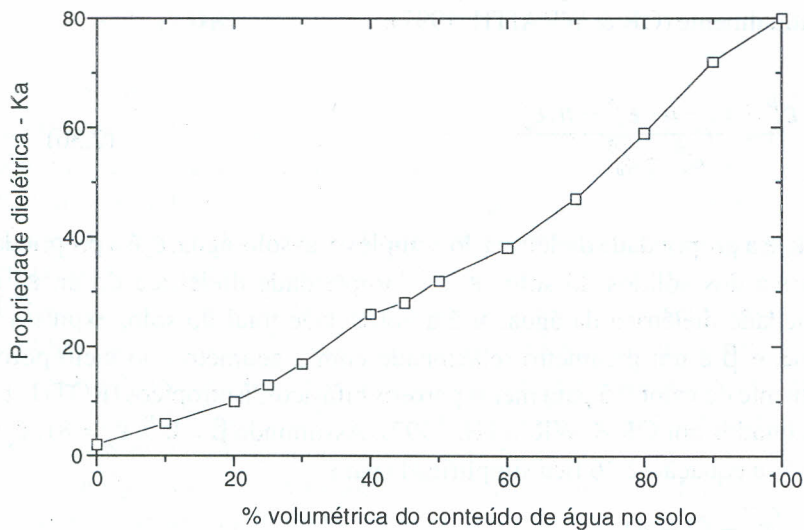


Figura 2.31. Relação geral entre a propriedade dielétrica (ϵ_b ou Ka) e o conteúdo volumétrico da água no solo (θ) (SOILMOISTURE, 1996).

Para o equipamento completo, com módulo de armazenagem de dados, interface para computador, visor para análise do pulso eletromagnético e dispositivos para coleta automática de dados, o custo da TDR é ainda relativamente alto. Equipamentos que utilizam princípio semelhante, mas que só dispõem de um medidor digital que indica diretamente o conteúdo de umidade já estão sendo oferecidos no mercado e devem, certamente, ter custo menor. Enquanto os primeiros são mais recomendados para pesquisa, esses últimos podem ser empregados para o manejo da irrigação em campo.

Uma outra limitação da TDR é a atenuação do sinal que indica início da reflexão da onda eletromagnética em solos salinos. Todavia, esse problema pode ser resolvido através do emprego de guias de onda revestidas com material isolante (SOILMOISTURE, 1996). Além disso, essa característica pode ser útil para o monitoramento simultâneo do conteúdo de água e condutividade elétrica do solo (TOPP et al., 1980; DALTON et al., 1984). Também, a necessidade de calibração para solos com grande quantidade de água retida ou solos orgânicos é uma limitação (OR & WAITH, 1997). Finalmente, tem-se como desvantagem a necessidade de abrir trincheira no perfil do solo para instalação das guias de onda em profundidade, o que, de certa forma, causa distúrbio, podendo até danificar o sistema radicular de algumas espécies frutíferas. Todavia, um equipamento disponível no mercado possui uma guia especial que é empregada para todo o perfil do solo.

Tomografia Computadorizada de Raio X

Os trabalhos pioneiros de PETROVIC et al. (1982); HAINSWORTH & AYLMORE (1983, 1986) e CRESTANA et al. (1985, 1986) introduziram a tomografia como um método bastante poderoso para estudos em ciência do solo, constituindo-se em uma técnica bastante difundida e utilizada. Nesses trabalhos a tomografia tem sido usada para estudar a difusão de água no solo (CRESTANA et al., 1985; HOPMANS et al., 1992; AYLMORE, 1993), a compactação de solos (VAZ et al., 1989), a homogeneidade de amostras (JENSSEN et al., 1988), e a macroporosidade (WARNER et al., 1988; PEYTON et al., 1994).

A tomografia de raios X ou gama utiliza o princípio da atenuação de um feixe colimado da radiação em várias direções na amostra, possibilitando a obtenção de um mapa de coeficientes de atenuação linear μ (cm^{-1}) na seção analisada. Conhecendo-se o coeficiente de atenuação em massa μ_m ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) e

considerando-se que o mesmo é constante em toda a amostra, é possível obter um mapa de densidades do plano tomográfico emergente da amostra. Para um meio poroso, usa-se o mesmo conceito anteriormente descrito, sendo necessário, entretanto, a obtenção de 2 imagens da amostra, uma úmida e outra seca, para determinar os mapas de densidades e umidades por tomografia.

O Uso da Tomografia de Raios X na Medida da Água em Amostras de Solo

O uso da tomografia de Raios X (TC) possibilita a medida da densidade global ρ_g e do conteúdo da água ou umidade no solo θ ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Além disso, esta técnica contribui para os estudos estáticos, dinâmicos, tridimensionais e simultâneos desses parâmetros, trazendo como consequência diversas outras aplicações (CRESTANA, 1985; AYLMOORE, 1993). Os fundamentos deste método estão contidos na teoria reconstrutiva da imagem.

A varredura dinâmica de um tomógrafo, do tipo da General Electric, modelo CT/T8800, de terceira geração, consiste de uma série de varreduras executadas na mesma posição do corte tomográfico da amostra (em tempos diferentes) ou em diferentes posições da mesma. A técnica dinâmica permite obter gráficos da variação da densidade com o tempo, do objeto em exame. As espessuras das fatias tomográficas podem ser de 1,5mm, 5mm e 10mm. O conjunto de detectores desse tomógrafo consiste de um arco de 30°, o qual contém 523 detectores de xenônio à alta pressão. O tubo de raios X, assim como os detectores, estão localizados na parte interna da cavidade de exame. O tamanho da matriz imagem é em geral da ordem de de 320 por 320 *pixels* (elementos das imagens). A unidade tomográfica é dada por:

$$UH = 1000 \frac{(\mu - \mu_w)}{\mu_w} \quad (2.38)$$

onde μ_w (cm^{-1}) é o coeficiente de atenuação linear da água e μ (cm^{-1}) é o coeficiente de atenuação linear do material. Comumente, é utilizada uma escala relativa onde o μ_w é tomado como nível de referência e igualado a zero (considerado como valor padrão). O valor zero UH é atribuído à água. Caso se queira conservar densidades maiores que 1000 UH, pode-se utilizar o recurso da escala ampliada ou estendida, que permite fazer com que a escala dos números do TC passe a variar no intervalo de -1000 a +3000 UH.

Depois disso, a conversão de UH para a densidade ou para o conteúdo de água no solo pode ser feita através das curvas de calibração (Figuras 2.32). A Figura 2.32 ilustra os resultados da curva de calibração de um TC, expressos em UH, como função da densidade e do conteúdo de água do solo. Neste exemplo foi encontrada uma dependência linear no caso dos solos de Barretos, SP e Trieste, Itália, confirmando os resultados encontrados por PETROVIC et al. (1982), estudando outro tipo de solo. Também é possível observar que a curva de calibração depende da constituição de cada solo. Esse mesmo comportamento ocorre no caso de experimentos de transmissão direta de raios γ e sonda de nêutrons.

Como no caso da densidade global, há uma dependência linear para os solos. No caso do solo de Barretos, SP, pode-se ver a influência da densidade calculada a partir da curva da Figura 2.32, para os seguintes valores médios: $1,23\text{g/cm}^3$, $1,29\text{g/cm}^3$ e $1,34\text{g/cm}^3$. As curvas são paralelas mostrando, dentro de boa concordância, que a densidade global do solo é responsável somente pela mudança do ponto de cruzamento da reta de calibração do conteúdo de água no solo, com o eixo das UH (Figura 2.32). A partir desses resultados, é possível obter diretamente a densidade global ou conteúdo de água de uma amostra de solo seco ou úmido, cuja distribuição de partículas, ou mesmo de água, não precisa ser, necessariamente, homogênea. Essas novas possibilidades são consequência das peculiaridades deste método. É o caso da reconstrução bi e tridimensional da imagem do objeto (como a do solo, água, semente ou raiz), das medidas absolutas e relativas da densidade global e da umidade do solo com o tempo, da detecção de inhomogeneidades, e assim por diante. Além disso, outros recursos, como a técnica dinâmica e a ampliação da resolução da imagem (escala estendida), podem ser utilizados.

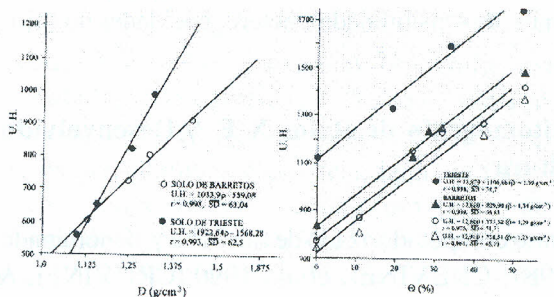


Figura 2.32. Curva de calibração linear das Unidades Hounsfield (UH) em função da densidade ρ_g (massa de solo seco dividido pelo seu volume seco) e do conteúdo de água do solo (θ) para os solos de Barretos, SP e Trieste, Itália (CRESTANA et al., 1985).

Considerações Sobre a Técnica e a Instrumentação

O uso de métodos não-convencionais, como o da tomografia, em agropecuária contribui para atender à carência metodológica e instrumental existente. Por exemplo, no caso da medida da densidade e da umidade do solo em laboratório, o método da transmissão direta com a radiação γ dos melhores. No entanto, é preciso considerar uma série de limitações atinentes. Destacam-se como principais as seguintes: a) as medidas são unidimensionais (ainda assim, o valor calculado é uma média sobre o percurso do feixe, não permitindo observar variações pontuais ou segmentares das heterogeneidades sobre este); b) não é sensível à medida de velocidades altas, como no caso da infiltração vertical da água em solos, de alta condutividades hidráulica (é o caso, por exemplo, da infiltração vertical da água em uma areia grossa, com penetração de 70cm de água em 20 minutos, o que dificulta, ou mesmo impede, estudos dinâmicos); c) supõe que a densidade global é constante quando o feixe de raios γ monoenergéticos é utilizado (o que não é verdade, como por exemplo, no caso de solos com argilas expansivas), além da dificuldade de colimação ou, como no caso de dupla energia, pouca disponibilidade de fontes adequadas. No último caso, a situação é mais difícil, pois os picos da radiação γ precisam ser muito distintos para evitar interferência na medida dos detectores. Além do mais, os erros ocorridos na medida da densidade são transferidos para a medida do conteúdo da água no solo e vice-versa, podendo comprometer a precisão das medidas.

O método da tomografia, além de permitir a medida dos parâmetros anteriormente citados, traz outras vantagens com contribuições novas, antes inviáveis de serem alcançadas. É o caso de estudos não-destrutivos, dinâmicos, bi e tridimensionais, de sensibilidade e heterogeneidades do solo e da distribuição da água.

O Minitomógrafo de Raios X E γ Desenvolvido Para Uso na Agricultura

O tomógrafo computadorizado de raios X e γ , denominado minitomógrafo (CRUVINEL, 1987; CRUVINEL et al., 1990; CRUVINEL & CRESTANA, 1996a, 1996b), é um equipamento desenvolvido na EMBRAPA Instrumentação Agropecuária para uso em pesquisa agrícola (CRESTANA & CRUVINEL, 1996). O equipamento se insere no contexto de um tomógrafo de primeira geração, pois o tubo de raios X ou fonte de raios gama e o detector são fixos,

enquanto a amostra em estudo é rotacionada e transladada, de modo que um fino feixe de radiação é atenuado pela amostra em diversas posições.

O equipamento é composto de uma fonte de raios X ou gama, colimadores cilíndricos de tamanhos variáveis (diâmetros de milímetros), um sistema de detecção e contagem da radiação (cadeia nuclear), mesa para posicionamento e movimentação das amostras e computador para controle, aquisição e processamento dos dados. A cadeia nuclear é composta de um detector de cristal cintilador tipo NaI(Tl), fotomultiplicadora, fonte de alta tensão para alimentação da fotomultiplicadora, amplificador, analisador monocanal e contador/temporizador. A mesa mecânica possui dois motores que controlam a posição relativa da mesa, onde é colocada a amostra de que se deseja produzir a imagem. Um motor de passo é utilizado para a rotação e outro para a translação. Um dispositivo optoeletrônico e um circuito comparador são utilizados para definir e inicializar as coordenadas de posição da mesa tomográfica. Os motores são controlados por um computador através de uma interface.

O feixe colimado de radiação incide na amostra posicionada sobre a mesa, atravessa-a, onde é atenuada, sofre uma outra colimação e é detectada pela cadeia nuclear. A atenuação ocorre devido aos processos de interação da radiação com a matéria. Os colimadores da fonte e do detector são de chumbo e possuem tamanhos variáveis, onde a escolha do tamanho ideal será feita conforme a resolução desejada. Este equipamento possibilita tomografias com resoluções espaciais entre 1 e 6mm^2 por *pixel*. A Figura 2.33 ilustra o minitomógrafo de raio X e gama da EMBRAPA-CNPDIA, onde se pode observar uma amostra de solo sendo analisada.

Aplicações do Minitomógrafo de Raios X e γ na Medida de Umidade e Densidade de Solos

As intensidades dos *pixels* das imagens tomográficas são apresentadas em termos de Unidades Tomográficas (UT), que são proporcionais aos coeficientes de atenuação linear. Algumas tomografias de amostras de diversos materiais, dentre eles éter, alumínio, óleo, areia, água e um solo (seco) tipo gley, foram obtidas com o minitomógrafo, usando uma fonte de raios gama de Amerício-241 (energia do fotopico igual a 59,6 keV), com uma resolução espacial e colimação do feixe de 2mm^2 . Pelo valor máximo da intensidade que identifica a escala de cinzas em cada imagem obtida, observou-se diferenças nas UT para cada material. Essas imagens são utilizadas para se obter a relação entre as UT e os coeficientes de atenuação linear desses materiais. Como todas as amostras são homogêneas, determinam-se os valores das UT através de médias

nos interiores das imagens e os coeficientes de atenuação através de uma medida de atenuação da amostra. A Figura 2.34 apresenta a correlação obtida, a qual é utilizada para as quantificações das imagens tomográficas, possibilitando a análise quantitativa da umidade e densidade em amostras de solos ou outros materiais

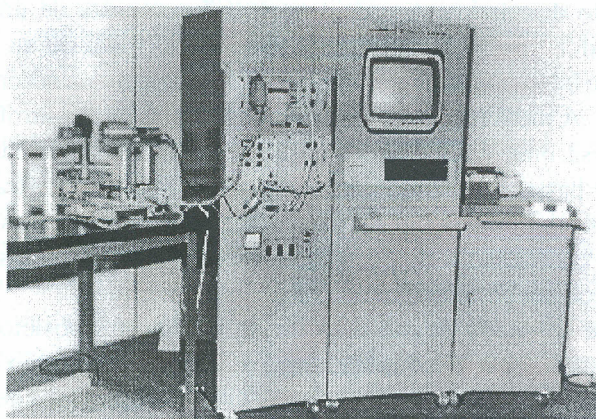


Figura 2.33. Fotografia do Minitomógrafo de raios X e γ da Embrapa Instrumentação Agropecuária, onde pode-se observar uma amostra de solo sendo analisada.

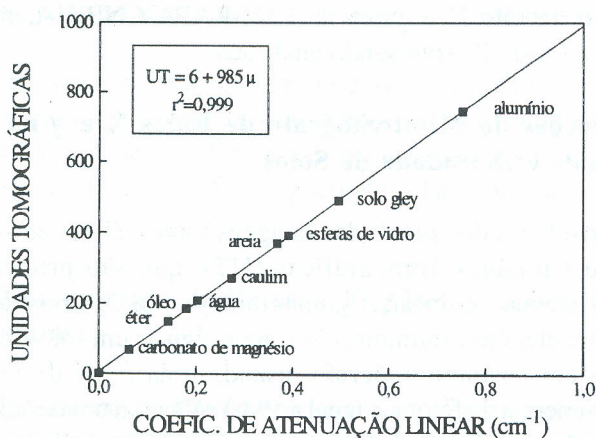


Figura 2.34. Curva de correlação entre as UT médias obtidas a partir de imagens e coeficientes de atenuação linear calculados para cada material.

A Figura 2.35 apresenta duas tomografias de uma amostra de solo (latossolo vermelho escuro-LVE) nas condições de saturação e seca em estufa (105 °C por 24 horas). A amostra foi preparada secando-se o solo, peneirando-o em malha de 1 mm e acondicionando-o em um recipiente retangular de acrílico de 2,5cm x 2,5cm e altura de 5cm. As diferenças nas UT, observadas pelos distintos valores máximos das escalas são atribuídas à presença de água nos poros do solo. Calculam-se os coeficientes de atenuação linear μ (cm⁻¹) para cada imagem e posteriormente as densidades (da imagem do solo seco) e umidades (da diferença entre a imagem com o solo úmido e seco).

Outros equipamentos tomográficos têm sido desenvolvido, inclusive para uso direto no campo, como é o caso do minitomógrafo portátil (NAIME, 1994; NAIME et al., 1994), de primeira geração, que tem seu esquema de varredura baseado no minitomógrafo de raios X e raios gama (CRUVINEL, 1987), descrito anteriormente. Os programas de reconstrução e visualização de imagem utilizado são os mesmos desenvolvidos para o minitomógrafo (CRUVINEL et al., 1990). A calibração também é idêntica à do minitomógrafo (CRESTANA et al., 1992). O tomógrafo portátil se diferencia por movimentar o conjunto fonte-detector e não a amostra, trabalhar em campo e ser alimentado por bateria, utilizando somente radiação gama.

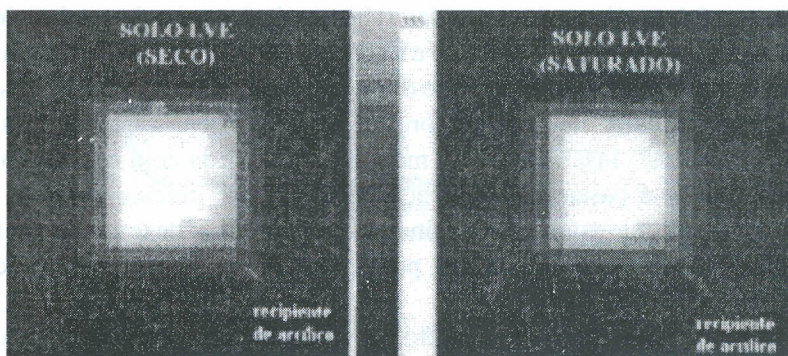


Figura 2.35. Imagens tomográficas de uma amostra de solo (LVE, São Carlos, SP) seco e saturado.

Método Capacitivo

O conteúdo de água no solo pode ser determinado via seus efeitos na constante dielétrica, medidos pela capacitância entre dois eletrodos implantados no solo. No caso de solos arenosos, onde a água livre predomina, a constante

dielétrica é diretamente proporcional ao conteúdo de água. A sonda (eletrodos) é submetida a um sinal de excitação de frequência conhecida e mede-se a impedância do circuito por ela formado. O sinal obtido não é linear com o conteúdo de água e é influenciado tanto pelo tipo, como pela temperatura do solo. Portanto, esse método requer calibração cuidadosa na instalação e também durante todo o tempo de uso, pois sua estabilidade a longo prazo é questionável.

O método capacitivo é uma técnica que fornece o conteúdo de água volumétrico em que o tempo de resposta é instantâneo. As suas principais desvantagens estão a pouca estabilidade a longo prazo e custo relativamente alto do circuito de compensação requerido. Como vantagens ela pode fornecer, ao menos teoricamente, o conteúdo absoluto de água, podendo ser usada em qualquer profundidade. As sondas podem ter diversas geometrias, de forma a cobrir diferentes volumes. Apresenta precisão relativamente boa quando não ocorrem mudanças na concentração iônica do solo e é facilmente acoplada a sistemas de medição remota como, por exemplo, a sistemas de telemetria.

Dissipação de Calor Numa Matriz Porosa Rígida

A dissipação de calor numa matriz porosa rígida é um tipo de equipamento usado para medição do potencial matricial. A razão de dissipação de calor num meio poroso é dependente da capacidade térmica desse meio, da condutividade térmica e da densidade. A capacidade e a condutividade térmicas de uma matriz porosa são afetadas pelo seu conteúdo de água (e potencial matricial). Sensores de dissipação de calor contêm geradores de calor (em configurações em linha ou em ponto fonte) inseridos numa matriz porosa rígida com espaço poroso fixo. A medição é baseada na aplicação de um pulso de calor, gerado pela passagem da corrente por uma resistência por um período de tempo específico e na análise da temperatura medida por um termopar colocado a uma certa distância da fonte de calor.

Com o sensor enterrado no solo, as variações no potencial da água no solo resultam num gradiente entre a matriz de cerâmica porosa e o solo, induzindo um fluxo de água entre os dois materiais até que um novo equilíbrio seja estabelecido. O fluxo de água varia o conteúdo de água da matriz de cerâmica que, por sua vez, varia a condutividade e a capacidade térmicas do sensor. A faixa do potencial matricial típica para tais sensores é de -10 a -1000 kPa.

Um sensor que utiliza uma linha fonte é apresentado na Figura 2.36, cujo gerador de calor é um fio fino axialmente centralizado numa matriz cerâmica cilíndrica tendo um raio de 1,5 cm e comprimento de 3,2 cm. Um termopar é localizado adjacente ao gerador de calor na metade do seu comprimento. Devido

o termopar estar localizado adjacente ao gerador de calor, quando o solo seca e a água movimentada para fora da cerâmica, a temperatura aumentará durante certo período (devido à redução da condutividade térmica). A magnitude da elevação da temperatura é sempre linearmente relacionada ao logaritmo natural do potencial matricial (Campbell Scientific, citado por OR & WRAITH, 1997).

Membrana Semi-Permeável (Aquaprobe™)

A membrana semi-permeável é usada para medição do potencial matricial e osmótico. O elemento sensível desse equipamento é uma membrana semi-permeável de formato circular que é conectada ao medidor de pressão ou transdutor, do tipo que é utilizado em tensiômetros. Um tubo de vidro com microporos, revestido por meio de um processo de polimerização, funciona como uma membrana de osmose reversa. O sensor tem as seguintes características importantes: (i) seletividade ideal; (ii) alta permeabilidade à água (para resposta rápida); (iii) biologicamente inerte (para resistir à formação de lodo). O interior da membrana e as conexões com o medidor de pressão são enchidos com uma solução osmoticamente ativa. Quando a parede externa do sensor é exposta ao solo, a água passa pela membrana, alterando a pressão osmótica no interior do sensor. A membrana funciona como a cápsula de um tensiômetro, mas que não deixa passar ar nem os solutos do interior do sensor.

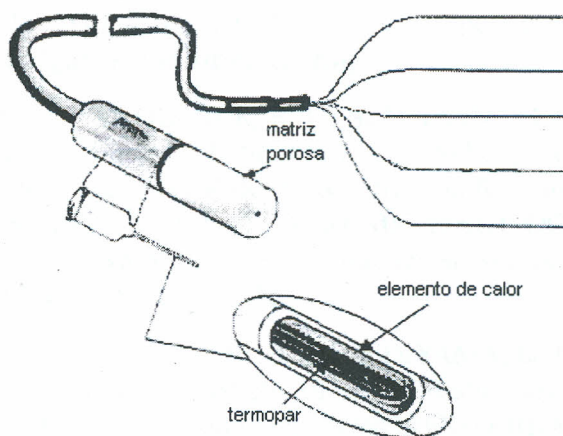


Figura 2.36. Esquema de um sensor de dissipação de calor no solo, através de linha-fonte, para medir o potencial matricial da água no solo (Fonte: Campbell Scientific, citado por OR & WRAITH, 1997).

O sensor do equipamento pode ser equipado com um medidor de pressão ou um transdutor eletrônico de pressão e é disponível para diversas profundidades. O sistema pode também ser configurado com transmissores, receptores e software e hardware de computadores e unidades de controle remoto para uma variedade de aplicações do uso da água. O equipamento pode medir, com precisão, o efeito combinado do potencial osmótico e o matricial, numa faixa de pressão de 0 a -1000 kPa, tornando-o um instrumento bem competitivo em relação a outros (SOILSENSORS, 1997).

Há vários outros métodos para estimar ou medir o conteúdo de água no solo. Alguns desses métodos estão obsoletos, outros estão em desenvolvimento e não estão ainda adaptados para ser utilizados de forma prática na pesquisa ou no manejo de irrigação. Dentre muitos, podem-se citar alguns: ressonância nuclear magnética, fibra ótica e métodos geofísicos, como radar, microondas e ultra-som, os quais ainda não são práticos ou baratos o suficiente para serem empregados no dia-a-dia. Todos esses instrumentos carecem de avaliação antes da utilização prática.

2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASE, J.K.; SIDDOWAY, F.H.; MILLARD, J.P. Spring wheat-leaf phytomass and yield estimates from airborne scanner and hand-held radiometer measurements. **International Journal of Remote Sensing**, v.5, n.5, p.771-781, 1984.
- ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Food and Agr. Org. of the United Nations, FAO Irrig. and Drain., 1982. 68 p. (Paper No. 39).
- ALLEN, R. G. ; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agron. J.**, v.81, p.650-662, 1989.
- ALLEN, R.G.; FISHER, D.K. Direct load cell-based weighing lysimeter system. In: Allen, R.G.; Howell, T.A.; Pruitt, W.O.; Walter, I.A.; Jensen, M.E. **Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements**. New York: Proc. of the Int. Symp. on Lysimetry, Amer. Soc. of Civil Eng., Irrig. and Drain. Div., 1991. p.114-124.
- ALLEN, R.G.; FISHER, D.K. Low-cost electronic weighing lysimeters. Amer. Soc. of Agric. Eng. **Trans. of the ASAE**, v.33, n.6, p.1823-1833, 1990.
- ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O. FAO-24 reference evapotranspiration factors. **Journal of Irrigation and Drainage Eng.**, v. 117, n. 5, p. 758-772, 1991.
- AMORIM NETO, M. S.; GOMIDE, R. L.; SEDIYAMA, G. C.; BRITO, R. A. L.; MAGALHÃES, P. C.; BORGES, J. C. F. Aplicação da termometria a infravermelho para detecção de status hídrico do feijoeiro irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11., 1995, Campina Grande, **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1995a. p.139-41.
- AMORIM NETO, M. S.; GOMIDE, R. L.; SEDIYAMA, G. C.; BRITO, R. A. L.; MAGALHÃES, P. C.; BORGES, J. C. F. Índice de estresse hídrico da cultura do feijoeiro irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11., 1995, Campina Grande, **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1995b. p.137-8.

- ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E.T.; HATFIELD, J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, v.6, n.2, p.300-306, 1984.
- ASRAR, G.; MYNENI, R.B.; KANEMASU, E.T. Estimation of plant-canopy attributes from spectral reflectance measurements. In: ASRAR G. **Theory and Applications of Optical Remote Sensing**. New York: John Wiley & Sons, 1989. p.252-96.
- ASTON, A. R.; VAN BAVEL, C. H. M. Soil surface water depletion and leaf temperature. **Agronomy Journal**, v.64, n.3, p.368-73, 1972.
- AYLMORE, L.A.G. Use of computer-assisted tomography in studying water movement around plant roots. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.49, p.1-52, 1993.
- AZEVEDO, P. V. de; RAMANA RAO, T. V.; AMORIM NETO, M. da S.; ESPINOLA SOBRINHO, J.; MACIEL, G. F. Resistência aerodinâmica e estomática da cultura do algodão herbáceo. **Rev. Bras. de Agrom.**, v.1, n.1, p.19-24, 1993.
- AZEVEDO, P. V. de; SOUSA, I. F. de. Balanço de energia em cultivo de feijão macassar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 7, 1991, Viçosa. **Resumos...** Viçosa: SBA, 1991. p.164-167.
- BARTHAKUR, N. Leaf temperatures under controlled environmental conditions. **Int. J. Biometeorol.**, v.19, p.21-27, 1975.
- BACKER, L. W. de; ROUMIEUX, S. M. WÉRY, B.J. Electronic lysimetry for hydrologic studies. In: Allen, R.G.; Howell, T.A.; Pruitt, W.O.; Walter, I.A.; Jensen, M.E. **Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements**. New York: Proc. of the Int. Symp. on Lysimetry, ASCE, Irrig. and Drain. Division, 1991. p.70-78.
- BARTHOLIC, J.F., NAMKEN, L.N. & WEIGAND, C.L. Combination equations used to calculate evaporation and potential evaporation. **U.S. Agric. Res. Serv.**, ARS USDA-ARS 41-170, 1-14, 1970.
- BASCUR, G.; OLIVA, M. A.; L AING, D. Termometria infrarroja en seleccion de genotipos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) resistentes a la sequia. I. Bases fisiologicas. **Turrialba**, v.5, n.1, p.43-47, 1985a.

- BASCUR, G.; OLIVA, M. A.; LAING, D. Termometria infrarroja en seleccion de genotipos de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) resistentes a sequia. II. Crecimiento y productividad. **Turrialba**, v.35,n.1, 49-53, 1985b.
- BAUER, M.E. ; VANDERBILT, V.C. ; ROBINSO, B.F. and DAUGHTRY, S.T. Spectral properties of agricultural crops and soils measured from space, aerial, field and laboratory sensors. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF PHOTOGRAMETRY, 14., **Proceedings**, Hamburg, West Germany, July 13-25, 1980. p.56-73.
- BEN-ASHER, J. PHENE, C. J.; KINARTI, A. Canopy temperature to assess daily evapotranspiration and management of high frequency drip irrigation systems. **Agricultural Water Management**, v.22, p.379-90, 1992.
- BERGAMASCHI, H.; OMETTO, J. C.; VIEIRA, H. J.; ANGELOCCI, L. R.; LIBARDI, P. L. Deficiência hídrica em feijoeiro. II. Balanço de energia. **Pesq. Agropec. bras.**, v.23, n.7, p.745-757, 1988.
- BERGAMASCHI, H.; VIEIRA, H. J.; LIBARDI, P. L.; OMETTO, J. C.; ANGELOCCI, L. R. Deficiência hídrica em feijoeiro. III. Evapotranspiração máxima e relação com a evapotranspiração calculada pelo método de Penman e com a evaporação do tanque "Classe A. **Pesq. Agropec. bras.** v.24, n.4, p.387-392, 1989a.
- BISCEGLI, C.I.; VAZ, C.M.P.; CRUVINEL, P.E.; RABELLO, L.M.; HERRMANN, P.S.P.; COLNAGO, L.A.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; NAIME, J.M.; MACEDO, A.; NOVAES, A.P.; EIRAS, J.A.; FÁVERO, J.A.; BERTUCCI NETO, V.; MACHADO, S.A.S.; MAZO, L.H.; AVACA, L.A.; SILVEIRA, P.M.; INAMASU, R.Y. Outros equipamentos e métodos. In: CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; MASCARENHAS, S.; BISCEGLI, C.I.; MARTIN-NETO, L.; COLNAGO, L.A. **Instrumentação Agropecuária: contribuições no limiar do novo século**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1996. p.228-262.
- BLAD, B. L.; ROSENBERG, N. J. Measurement of crop temperature by leaf thermocouple, infrared thermometry and remotely sensed thermal imagery. **Agronomy Journal**, v.68, n.4, p.635-41, 1976.
- BLAD, B.L., GARDNER, B.R., WATTS, D.G. & ROSEMBERG, N.J. Remote sensing of crop moisture status. **Remote Sens.**, v.3, p.4-20, 1981.

- BLOODWORTH, M.E. A thermoelectric method for determining the rate of water movement in plants. **Soil Sci. Soc.Amer. Proc.**, v.19, p.411-414, 1955.
- BLOODWORTH, M.E. Some applications of the thermoelectric method for measuring water flow rates in plants. **Agron. J.**, v.48, p.222-228, 1956.
- BOISSARD, P.; GUYOT, G.; JACKSON, R. D. Factors affecting the radiative temperature of a vegetative canopy. In: **EASTER SCHOOL IN AGRICULTURAL SCIENCE**, 48., Nottingham, 1989. **Applications of remote sensing in agriculture**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. p.45-72.
- BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Phys. Rev.**, v.27, p.779-787, 1926.
- BOWMAN, W. D. The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves. **Remote Sensing of Environment**, v.30, n.3, p.249-55, 1989.
- BRISTOL, K. L.; CAMPBELL, G.S.; CALISSENDORFF, K. Test of a heat-pulse probe for measuring changes in soil water content. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.57, p.930-934, 1993.
- BRUN, L. J.; ENZ, J. W.; LARSEN, J. K. Evaluation of energy balance and water use by spring wheat during a normal and dry season. **Agric. For. Meteorol.**, v.35, p.103-111, 1985.
- BRUTSAERT, W. H. **Evaporation into the atmosphere**. Reidel, Dordrecht, 1982. 299p.
- CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. **Eddy covariance system operator's manual CA27 and KH20**. Logan, Campbell Scientific. 1.1-2.10. 1997.
- CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. **Bowen ratio instrumentation instruction manual**. Logan, Campbell Scientific. 1.1-B.1. 1995.
- CAMPBELL, G.S. **An introduction to environmental biophysics**. Spring Verlag, New York, 1977.

- CAMPBELL, G.S.; CALISSENDORFF, K.; WILLIAMS, J.H. Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.55, p.291-293., 1991.
- CAMPECHE, L. F. S. M. **Estimativa da resistência de dossel (rc) da grama com o uso da termometria ao infravermelho**. Piracicaba, 1997, 52 p. dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- CARLSON, R.E., YARGER, D.N. & SHAW, R.H. Environmental influences on the leaf temperatures of two soybean varieties grown under controlled irrigation. **Agron. J.**, v.64, p.224-229, 1972.
- CARTER, G.A. Primary and secondary effects pf water content on the spectral reflectance of leaves. **American Journal of Botany**, v.78, n.7, p.916-24, 1991.
- CERMAK, J. Improvement of method of sap flow determination in fully-grown trees based on heat balance with direct electrical heating of xylem. **Biol. Plant.**, v. 18, p. 99-105, 1976.
- CHOUDHURY, B. J.; REGINATO, R. J.; IDSO, S. B. An analysis of infrared temperature observations over wheat and calculation of latent heat flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.37, n.1, p.75-88, 1986.
- CLARK, R.N. & HILER, E.A. Plant measurements as indicators of crop water deficit. **Crop Sci.**, v.13, p.466-469, 1973.
- CLAWSON, K. L.; BLAD, B. L. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. **Agronomy Journal**, v.74, n.2, p.311-6, 1982.
- CLAWSON, K. L.; JACKSON, R. D.; PINTER JR., P. J. Evaluating plant water stress with canopy temperature differences. **Agronomy Journal**, v.81, n.6, p.858-63, 1989.
- CLOSS, R.L. The heat pulse method for measuring rate of sap flow in a plant stem. **New Zealand J. Sci.**, v.1, p.281-288, 1958.
- COHEN, Y.; FUCHS, M.; FALKENFLUG, V.; MORESHET, S. Calibrated heat pulse method for determining water uptake in cotton. **Agron. J.**, v.80, p.398-402, 1988.

- COHEN, Y.; FUCHS, M.; GREEN, G.C. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. **Plant, cell and environment**, v.4, p.391-397, 1981.
- CONCIANI, W.; CARNEIRO, B.J.; SOARES, M.M.; HERRMANN, P.S.P.; CRESTANA, S. Emprego de TDR com sondas multihastes segmentadas para medida de umidade um perfil de solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 1, 1996, São Carlos-SP. **Anais do I SIAGRO...** São Carlos: EMBRAPA-CNPDIA, 1997. p.169-173.
- CONCIANI, W.; HERRMANN, P.S.P.; SOARES, M.M. The time domain reflectometry to study matrix suction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 1, 1995, Paris-France, **Proceedings...** Paris: p.1481-1485, v.3, 1996.
- COSTA, A. B. G.; STEINMETZ, S. Uso da termometria ao infravermelho para caracterizar a necessidade de irrigação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.). I. Desempenho do índice baseado na diferença de temperatura com uma parcela de referência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11., 1995, Campina Grande, **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1995. p.108-9.
- COSTA, R. C. L.; LOPES, N. F.; OLIVA, M. A.; BARROS, N. F. Crescimento e conversão de energia solar em feijão submetido a três doses de nitrogênio e dois regimes hídricos. **Pesq. Agropec. bras.**, v.24, n.12, p.1439-1450, 1989.
- CRESTANA, S. **A tomografia computadorizada como um novo método para estudo da física da água no solo.** São Carlos: USP-IFQSC, 1985. Tese Doutorado.
- CRESTANA, S.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S. Using a computed miniscanner in soil science. **Soil Science**, Baltimore, v.142, n.1, p.56-61, 1986.
- CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E. Tomografia: do hospital à lavoura. **Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, v.21, n.121, p.20-24, 1996.

- CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; MASCARENHAS, S.; BISCEGLI, C.I.; MARTIN-NETO, L.M.; COLNAGO, L.A., ed. **Instrumentação Agropecuária: contribuições no limiar do novo século..** Brasília: EMBRAPA-SPI, 1996. 291p.
- CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; VAZ, C.M.P.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S.; REICHARDT, K. Calibração e uso de um tomógrafo computadorizado em ciência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, n.2, p.161-167, 1992.
- CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. POZZI-MUCELLI, R. S. Static and dynamical three dimensional studies of water in soil using computed tomography scanning. **Soil Science**, Baltimore, v.140, n.5, p.326-32, 1985.
- CRUVINEL, P.E. **Minitomógrafo de raios-X e raios gama computadorizado para aplicações multidisciplinares.** Campinas: UNICAMP-FEE, 1987. Tese Doutorado.
- CRUVINEL, P.E.; CESAREO, R.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. X-ray and gamma ray computerized minitomograph scanner for soil science. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v.39, n.5, p.745-750, 1990.
- CRUVINEL, P.E.; CRESTANA, S. Opportunities and use of digital signal processors in tomography scanners dedicated to agriculture. In: **WORKSHOP BRASILEIRO DE ARQUITETURAS ALTERNATIVAS USANDO DSPs**, São Carlos-SP, ago. 1996. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 1996. p.93-97.
- CRUVINEL, P.E.; CRESTANA, S. The use of a TMS320C40 in X and γ rays computerized minitomography scanner (MTC) dedicated to agriculture. In: **ANNUAL TMS320 EDUCATORS CONFERENCE**, 6, Houston, Texas, USA, Aug. 1996. **Proceedings...** Houston: Texas Instruments, 1996. não paginado.
- CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MATZANAUER, R. Balanço de energia em uma cultura de milho: estudo de caso. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, 6, Maceió, 1989. **Anais...** Maceió: SBA, 1989. p. 417-426.

- CURRAN, P. J. **Principles of Remote Sensing**. New York, Longman Scientific & Technical, 1985. 282p.
- DALTON, F.N., W.N. HERKELRATH, D.S. RAWLINS, AND J.D. RHOADES. Time domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with single probe. **Science**, v.224:, p.989-990, 1984.
- DAVID, W.P. **Remote sensing of crop water deficits and its potential applications**. Texas A&M University, College Station. Remote Sens. Cent. Tech. Rep. RSC-06, 1969.
- DAVIES, J.A. & IDSO, S.B. Estimating the surface radiation balance and its components. In: **Modification of the aerial environment of plants**. Barfield and Gerber (eds). Am.Soc. of Agr. Eng. p.183-210, 1979. (Mon. no. 2.).
- DE BACKER, L.W.; ROUMIEUX, S.M.; WÉRY, B.J. Electronic lysimetry for hydrologic studies. In: **Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements**. Allen, R.G.; Howell, T.A.; Pruitt, W.O.; Walter, I.A.; Jensen, M.E. (ed.), Proc. of the Int. Symp. on Lysimetry, Amer. Soc. of Civil Eng., Irrig. and Drain. Division, New York, 1991. p. 70-78.
- DE VRIES, D.A. Thermal properties of soil. In: W.R. van Wijk (ed.) **Physics of plant environment**. John Wiley & Sons, New York, p.210-234., 1963.
- DECKER, J.P. & SKAU, C.M. Simultaneous studies of transpiration rate and sap velocity in tree. **Plant Physiol.**, v.39, p.213-215, 1964.
- DEERING, D.W. Field measurements of bidirectional reflectance. In: ASRAR, G., ed. **Theory and Applications of Optical Remote Sensing**. New York: John Wiley & Sons, 1989, p.14-61.
- DOEBELIN, E. O. **Measurement systems: application and design**. New York, McGraw-Hill, 4th. ed., 1990. 960 p.
- DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Crop response to water**. Roma , FAO. 1979. 193 p. (Irrigation and Drainage No. 33).

- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Roma, FAO. 1977. 144 p. (Irrigation and Drainage No. 24).
- DUGAS, W.A.; UPCHURCH, D.R.; RITCHIE, J.T. A weighing lysimeter for evapotranspiration and root measurements. **Agronomy J.**, v.77, p.821-825, 1985.
- EDWARDS, W.R.N. & WARWICK, N.W.M. Transpiration from a kiwifruit vine as estimated by the heat pulse technique and the Penman-Monteith equation. **New Zealand J. of Agric. Res.**, v.7, p.537-543, 1984.
- EPIPHÂNIO, J.C.N. Metodologia de aquisição de dados ao nível terrestre. In: Assunção, G.V. **Sensoriamento Remoto na Agricultura: conceitos básicos, metodologia e aplicações**. São José dos Campos, 1989. p.53-73. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. (INPE-4806-MD/39).
- FELLNER-FELDEGG, H. The measurement of dielectrics in the time domain. **Journal of Physical Chemistry**, v.3, n.3, p.616-623, 1969.
- FERREIRA, J. A. S.; SILVA, B. B.; SOBRINHO, J. E.; MOURA NETO, E. L.; MAIA NETO, J. M. Determinação da resistência estomática do meloeiro através do método de O'Toole & Real. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11., 1995, Campina Grande, **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1995. p.99-101.
- FOLEGATTI, M. V. **Avaliação do desempenho de um "scheduler" na detecção do estresse hídrico em cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) irrigada com diferentes lâminas**. Piracicaba, 1988. 188p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- FOLEGATTI, M. V. Utilização da temperatura radiante do dossel vegetativo na caracterização do estresse hídrico da cultura do feijoeiro irrigado com diferentes lâminas de água In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11., 1995, Campina Grande, **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1995. p. 74-6.

- FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 5, 1987, Belém, **Coletânea de Trabalhos...** Belém: SBA, 1987. p.317-319.
- FRITSCHEN, L.J. Net and solar radiation relations over irrigated crops. **Agr. Meteorol.**, v.4, p.55-62, 1967.
- FUCHS, M. & TANNER, C.B. Error analysis of Bowen ratios measured by differential psychrometer. **Agric. Meteorol.**, v.7, p.329-334, 1970.
- FUCHS, M.; TANNER, C. B. Infrared Thermometry of vegetation. **Agronomy Journal**, v.58, n.6, p. 597-601, 1966.
- GAITAN, C. A.; McFARLAND, M. J.; MOORE, J. Effects of plot location on the canopy temperature function and crop water stress index of cotton. **Trans. ASAE**, v.33, n.6, p.1933-1938, 1990.
- GARDNER, B.R., BLAD, B.L., MAURER, R.E. & WATTS, D.G. Relationships between crop temperature and the physiological and phenological development of differentially irrigated corn. **Agron. J.**, v.73, p.743-747, 1981c.
- GARDNER, W. H. Water Content. In: A. KLUTE (ed.). **Methods of Soil Analysis**, part 1: Physical and Mineralogical Methods, 2nd ed. ASA, SSSA. Madison, WI, 1986. p.493-544.
- GATES, D. M. Characteristics of soil and vegetated surfaces to reflected and emitted radiation. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF REMOTE SENSING ENVIRONMENT, 3. **Proceedings...** 1964, p. 573-600.
- GATES, D.M. **Biophysical ecology**. New York: Springer-Verlag, 1980. 611p.
- GAY, L.W. A simple system for real-time processing of energy budget data. In: **Proc. WMO Symp. on Forest Meteor.**, Geneva, 1979. p. 224-226. (SMO No. 527).
- GAY, L.W. The regression of net radiation upon solar radiation. **Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B**. v.19, p.1-14, 1971.
- GEISER, K. M.; SLACK, D. C.; ALLRED, E. R.; STANGE, K. W. Irrigation scheduling using crop canopy-air temperature difference. **Transactions of the ASAE**, v.25, n.3, p.689-694, 1982.

- GIFFORD, G.F. Apparent sap velocities in big Sagebrush as related to nearby environment. **J. Range Manage**, v.21, p.266-268, 1968.
- GOMIDE, R. L. A transient heat probe sensor for measuring transpiration in the stem of woody plants. University of Arizona, Tucson, U.S.A., 1990. 166p. (Ph.D. Dissertation).
- GOMIDE, R. L.; JORDAN, K. A. & SLACK, D. C. A transient heat probe sensor for measuring transpiration in woody plant stems. In: **Proc. of the Workshop on Real Time Sensing and Control of Automated Irrigation Systems**, 16th European Regional Conf., International Commission on Irrigation and Drainage, Budapest, Hungary, 1992, p. 51-58.
- GOMIDE, R. L.; OLIVEIRA, C. S. G. de; FACCIOLI, G. G. Protótipo de um lisímetro de pesagem automático para estudos em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 4, n. 1, p. 61-68, 1996.
- GRACE, J. **Plant response to wind**. London, Academic Press, 1977. 286p.
- GRANT, D. R. Comparison of evaporation from barley with Penman estimates. **Agricultural. Meteorology**, v.15, p.49-60, 1975.
- HAINSWORTH, J.M.; AYLMORE, L.A.G. The use of computer-assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.21, p.435-440, 1983.
- HAINSWORTH, J.M.; AYLMORE, L.A.G. Water extraction by single plant roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.50, p.841-848, 1986.
- HATFIELD, J. L. The utilization of thermal infrared radiation measurements from grain sorghum crops as a method of assessing their irrigation requirements. **Irrigation Science**, v.3, n.4, p.259-68, 1983.
- HATFIELD, J. L. Wheat canopy resistance determined by energy balance techniques. **Agronomy Journal**, v.77, n.2, p.279-283, 1985.
- HATFIELD, J. L.; REGINATO, R. J.; IDSO, S. B. Evaluation of canopy temperature-evapotranspiration models over various crops. **Agric. And Forest Meteorol.**, v.32, p.41-53, 1984.

- HATFIELD, J. L.; WANJURA, D. F.; BARKER, G. L. Canopy temperature response to water stress under partial canopy. **Trans. ASAE**, v.28, n.5, p.1607-1611. 1985.
- HATFIELD, J.L. & WANJURA, D.F. Actual evapotranspiration from dryland agriculture. In: **Proc. of the Nat. Conf. on Advances in Evapotranspiration**. Amer. Soc. of Agric. Engineers. Chicago, IL., 1985. p.151-158.
- HATFIELD, J.L. Evapotranspiration obtained from remote sensing methods. In: **Advances in irrigation**. Dr. Hillel (ed.), Vol. 2, Academic Press, N.Y., 1983. pp. 395-416.
- HATTENDORF, M. J.; CARLSON, R. E.; HALIM, R. A.; BUXTON, D. R. Crop water stress index and yield of water-deficit-stressed alfalfa. **Agron. J.**, v.80, p.871-875, 1988.
- HEERMANN, D.F. & DUKE, H.R. **Evaluation of crop water stress under limited irrigation**. Am. Soc. of Agric. Eng., 1978. p.1-12. (Paper 78-2556).
- HEILMAN, J. L.; HEILMAN, W. E.; MOORE, D. G. Remote sensing of canopy temperature at incomplete cover. **Agronomy Journal**, v.73, n.3, p.403-6, 1981.
- HEILMAN, J.L. & KANEMASU, E.T. An evaluation of a resistance form of the energy balance to estimate evapotranspiration. **Agron. J.**, v.68, p.607-611, 1976.
- HEILMAN, J.L., KANEMASU, E.T., ROSENBERG, N.J. & BLAD, B.L. Thermal scanner measurement of canopy temperatures to estimate evapotranspiration. **Remote Sensing Environ.**, v.5, p.137-145, 1976.
- HEINE, R.W. & FARR, D.F. Comparison of heat pulse and radioisotope tracer methods for determining sap-flow velocity in stem segments of poplar. **J. Exp. Bot.**, v.24, p.649-654, 1973.

- HERRMANN, P.S.P.; CONCIANI, W.; SOARES, M.M.; CRESTANA, S. Medida de umidade, *in-situ*, através da técnica de reflectometria no domínio do tempo (RDT), do perfil de um meio poroso, colapsável, com uma única antena segmentada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 23. 1995, Maringá-PR, **Programação e resumos...** Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 1995. p.3-22.
- HERRMANN, P.S.P.; CRESTANA, S. Uso da técnica de reflectometria no domínio do tempo para caracterização físico-hídrica de um meio poroso. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS-ENEMP, 22., 1994, Florianópolis-SC, **Programação e resumos...** Florianópolis: UFSC-Centro Tecnológico, 1994. p.5.
- HINCKLEY, T.M. & SCOTT, D.R.M. Estimates of water loss and its relation to environmental parameters in Douglas Fir Saplings. **Ecol.**, v.52, p.520-524, 1971.
- HOFFER, R.M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensing data. In: SWAIN, P.H. ; DAVIS, S. M., ed. **Remote Sensing the Quantitative Approach**, New York: McGraw Hill, 1978. p.228-89.
- HOLMAN, J.P. **Experimental methods for engineers**. Singapura, McGraw-Hill, 5ª.ed., 1989. 549 p.
- HOPE, A. S.; JACKSON, R. D. Early morning canopy temperatures for evaluating water stress in a wheat crop. **Water Resour. Bull.**, v.25, n.5, p.1009-1014, 1989.
- HOPMANS, J.W., DANE, J.H. Calibration of a dual-energy gamma radiation system for multiple point measurements in soil. **Water Resour. Res.**, v.22, p.1109-1114, 1986.
- HOPMANS, J.W.; VOGEL, T.; KOBLIK, P.D. X-ray tomography of soil water distribution in one-step outflow experiments. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p.355-362, 1992.

- HOWELL, T.A.; SCHNEIDER, A.D.; JENSEN, M.E. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. In: **Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements**. Allen, R.G.; Howell, T.A.; Pruitt, W.O.; Walter, I.A.; Jensen, M.E. (ed.), Proc. of the Int. Symp. on Lysimetry, Amer. Soc. of Civil Eng., Irrig. and Drain. Division, New York, 1991. p. 1-9.
- HUBAND, N.D.S. & MONTEITH, J.L. Radiative surface temperature and energy balance of a wheat canopy. Part 2: estimating fluxes of sensible and latent heat. **Boundary-layer Meteorol.**, v.36, p.107-116, 1986.
- HUCK, M. G.; KLEPPER, B. Water relations of cotton. II. Continuous estimates of plant water potential from stem diameter measurements. **Agronomy Journal**, v. 69, n. , p. 593-597, 1977.
- HUNT, E.R. and ROCK, B.N. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.30, n.1, p.43-54, 1989.
- IDSO, S. B.; CLAWSON, K. L. Foliage temperature: effects of environmental factors with implications for plant water stress assessment and the CO₂/climate connection. **Water Resour. Res.**, v.22, n.12, p.1702-1716, 1986.
- IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; PINTER JR., P. J.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L. Normalizing the stresse-degree-day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, v.24, n.1, p.45-55, 1981c.
- IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; REGINATO, R. J. Remote sensing of crop yields. **Science**, v.196, p.19-25, 1977.
- IDSO, S. B.; PINTER JR., P. J.; REGINATO, R. J. Non-water-stressed baselines: the importance of site selection for air temperature and air vapour pressure deficit measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.53, n.1/2, p.73-80, 1990.
- IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; JACKSON, R. D.; PINTER JR., P. J. Foliage and air temperature: evidence for a dynamic "equivalent point". **Agricultural Meteorology**, v.24, n.3, p.223-6, 1981a.

- IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; REICOSKY, D. C.; HATFIELD, J. L.
Determining soil-induced plant water potential depressions in alfalfa by means of infrared thermometry. **Agronomy Journal**, v.73, n.5, p.826-30, 1981b.
- ITIER, B. & BRUNET, Y. **Recent development and present trends in evaporation research: A partial survey**. Proceedings of the international Conference, San Antonio, Texas, 1996.
- JACKSON, R. D. Canopy temperature and crop water stress. In: HILLEL, D., ed. **Advances in Irrigation**. New York: Academic Press, 1982. v.1, p.43-85.
- JACKSON, R. D.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; PINTER Jr, P. J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water Resources Research**, v.17, n.4, p.1133-8, 1981.
- JACKSON, R. D.; KUSTAS, W. P.; CHOUDHURY, B. J. A reexamination of the crop water stress index. **Irrig. Sci.**, v.9, p.309-317, 1988.
- JACKSON, R. D.; REGINATO, R. J.; IDSO, S. B. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. **Water Resources Research**, v.13, n.3, p.651-6, 1977.
- JACKSON, R.D. & PINTER, P.J. Jr. Detection of water stress in wheat by measurement of reflected solar and emitted thermal IR radiation. **Int. Colloq. Spectral Signatures Objects Remote Sens.**, 1981. p.399-406.
- JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. 332 p. (ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice n° 70).
- JENSSEN, P.D.; HEYERDAHL, P.H. Soil column descriptions from X-ray computed tomography density images. **Soil Science**, Baltimore, v.146, n.2, p.102-107, 1988.
- JOHNS, D., Van BAVEL, C.H.M. & BEARD, J.B. Determination of resistance to sensible heat flux density from turfgrass for estimation of its evapotranspiration rate. **Ag. Meteorol.**, v.25, p.15-25, 1981.
- JOVANOVIC, N.Z.; ANNANDALE, J.G. A laboratory evaluation of Watermark electrical resistance and Campbell Scientific 229 heat dissipation matric potential sensors. **Water SA**, v.23, n.3, p.227-232, 1997.

- JURY, W.A.; GARDNER, W.R.; GARDNER, W.H. **Soil physics**. New York: John Wiley. 1991. 328p.
- KANEMASU, E.T., WESLEY, M.L., HICKS, B.B. & HEILMAN, J.L. Techniques for calculating energy and mass fluxes. In: **Modification of the aerial environment of crops**. B.J. Barfield and J.F. Gerber (Eds.). Am. Soc. Agr. Engrs. St. Joseph, MI, 1979. p.156-182.
- KHERA, K. L.; SANDHU, B. S. Canopy temperature of sugarcane as influenced by irrigation regime. **Agric. For. Meteorol.**, v.37, p.245- 258, 1986.
- KIM, J.; VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J. Energy balance and water use of cereal crops. **Agric. For. Meteorol.**, v.48, p.135-147, 1989.
- KIMBALL, B.A. & JACKSON, R.D. Soil heat flux. In: **Modification of the aerial environment of crops**. B.J. Barfield and J.F. Gerber (Eds.), Am. Soc. Agr. Engrs. St. Joseph, MI, 1979. p.211-224.
- KLEPPER, B.; BROWNING, V. D.; TAYLOR, H.M. Stem diameter in relation to plant water status. **Trans. Of the ASAE**, v. 4, n. 8, p. 683-685, 1971.
- KOLLENKARK, J. C. ; VANDERBILT, V. C. ; BAUER, M. E. and HOUSLEY, T. L. Effect of cultural practices on agronomic and reflectance characteristics of soybean canopy. **Agronomy Journal**, v.74, n.4, p.751-58, 1982.
- LADEFOGED, K. A method for measuring the water consumption of larger intact trees. **Physiol. Plantarum**, v.13, p.648-658, 1960.
- LEMON, E. R. Photosynthesis under field conditions: II. An aerodynamic method for determining the turbulent carbon dioxide exchange between the atmosphere and a corn field. **Agronomy Journal**, v.52, n., p.697-703, 1960.
- LEYTON, L. Problems and techniques in measuring transpiration from trees. In: **Physiology of Tree Crops**, Proc. Symp., Long Ashton Res. Stn. Univ. Bristol, 1969. N. Y. Acad. Press. (eds.L.C. Luckwill & C.V. Cutting), 1970. pp. 382.
- LINACRE, E. T. A note on a feature of leaf and air temperature. **Agricultural Meteorology**, v.1, n.1, p.66-72, 1964.

- LINACRE, E. T. Further notes on a feature of leaf and air temperature. **Theoretical and Applied Climatology**, v.15. p.422-6, 1967.
- LINACRE, E.T. Estimating the net radiation flux. **Agr. Meteorol.**, v.5, p.49-63, 1968.
- LORENZ, D. Temperature measurements of natural surfaces using infrared radiometers. **Appl. Opt.**, v.7, p.1705-10, 1968.
- LOWE, P. R. An approximating polynomial for computation of saturation vapor pressure. **Journal Applied Meteorology**, v. 16, n. , p. 100-103, 1976.
- LUCHIARI Jr. A.; RIHA, S. J. Bulk surface resistance and its effect on evapotranspiration rates in irrigated wheat. **Agronomy Journal**, v.83, n.5, p.888-95, 1991.
- MAGIOTTO, S. R. **Estimativa da evapotranspiração de referência pelo uso da termometria ao infravermelho**. Piracicaba, 1996, 90p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- MAREK, T.H.; SCHNEIDER, A.D.; HOWELL, T.A.; EBELING, L.L. Design and construction of large weighing monolith lysimeters. Amer. Soc. of Agric. Eng. **Trans. of the ASAE**, v.31, p.477-484, 1988.
- MARSHALL, D.C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. **Plant physiology**, v.33, p.385-396, 1958.
- MEDEIROS, S. L. P.; SANTOS, M. L. dos; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A. Balanço de energia em uma cultura de milho. **Ciência Rural**, v.23, n.1, p.1-6, 1993.
- MILTON, E. J. Field measurement of reflectance factors: a further note. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.48, n.9, p.1474-76, 1982.
- MILTON, E. J. Principles of field spectroscopy. **International Journal Remote Sensing**, v.8, n.12, p.1807-27, 1987.
- MITCHELL, B. W.; McCLURE, W.F. Signal conditioning for filtering, amplifying, computing, simulating, and controlling. In: **Instrumentation and Measurement for Environmental Sciences**. Mitchell, B.W. (ed.), Amer. Soc. of Agric. Eng., St. Joseph, Michigan, 2nd. ed., 1983. p. 10.01-10.19.

- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. In: **The state and movement of water in living organisms**. New York Academic Press. Proc. Symp. Soc. Exp. Biol. 19: 205-234, 1965.
- MONTEITH, J. L. **Principles of environmental physics**. New York: American Elsevier Pub., Inc., 1973. 241p.
- MONTEITH, J. L.; SZEICZ, G. Radiative temperature in the heat balance of natural surfaces. **Quartely Journal of Royal Meteorological Society**, v.88, n.378, p.496-507, 1962.
- MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of environmental physics**. Second Edition. Edward Arnold. London. 1990. 291 p. ilustr.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and surface temperature. **Quart. J. Roy Meteorol. Soc.**, v.107, p.1-27, 1981.
- MONTEITH, J.L. **Vegetation and the atmosphere**. Academic Press, London. Vol. 1 Principles. 278 p. and Vol. 2 Case studies, 1975. 439 p.
- MOREIRA, M.A. **Déficit hídrico na cultura do trigo e o impacto na resposta espectral e em parâmetros agronômicos**. Piracicaba, 1997. 142p. (Doutorado – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – USP).
- MYERS, V. I. Soil, water, plant relationships. In: **Remote Sensing With Spectral Reference to Agriculture and Forestry**. Washington, DC: National Academy of Science. 1970. p.253-79.
- NAIME, J.M. **Projeto e construção de um tomógrafo portátil para estudos de ciência do solo e plantas, em campo**. São Carlos: USP-EESC, 1994. 87p. il. Dissertação Mestrado.
- NAIME, J.M.; TORRE, A.; INAMASU, R.Y.; CRUVINEL, P.E.; CRESTANA, S. **Projeto e construção de um tomógrafo portátil para investigações não-destrutivas, em campo, do sistema água-solo-planta**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 10 E CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CONTROLE AUTOMÁTICO, 6, Rio de Janeiro-RJ, set. 1994. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Automática, 1994. v.2, p.767-772.

- NISHIMURA, T.; ALMEIDA, A. de; ANDRÉ, R. J. B.; VOLPE, C. A.; LIBERA, C. de L. F. D.; MALHEIROS, E. B. Balanço de energia numa cultura de milho (*Zea mays L.*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 4, LONDRINA, 1985. **Anais...** Londrina: SBA, 1985. p.83-92.
- NOVALYNX, Systems Inc. Model 255-100 analog output evaporation gauge. Rancho Cordova, California, 1997. 12 p. (Instruction Manual).
- O' TOOLE, J. C.; HATFIELD, J. L. Effect of wind on the crop water stress index derived by infrared thermometry. **Agron. J.**, v.75, p.811-817, 1983.
- O'TOOLE, J. C.; REAL, J. G. Estimation of aerodynamic and crop resistances from canopy temperature. **Agronomy Journal**, v.78, n.2, p.305-10, 1986.
- OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2.ed. London: Routledge, 1992. 435p.
- OR, D.; WRAITH, J.M. Agricultural and environmental soil physics. Logan: USU. 1997. 218p.
- PALOSCIA, S.; PAMPALONI, P. Microwave remote sensing of plant water stress. **Remote Sensing of Environment**, v. 16, n. , p. 249-255, 1984.
- PALOSCIA, S.; PAMPALONI, P. Microwave polarization index for monitoring vegetation growth. In: **Proc. IGARSS Symp.**, Ann Arbor, MI, 1987. p. 1487-1491.
- PAMPALONI, P.; PALOSCIA, S. Microwave emission and plant water content: a comparison between field measurements and theory. **IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing**, v. 24, n. , p. 900-905, 1986.
- PARSONS, J. E.; PHENE, C. J.; BAKER, D. N.; LAMBERT, J. R.; McKINION, J. M. Soil water stress and photosynthesis in cotton. **Physiol. Plant.**, v. 47, p. 185-189, 1979.
- PAZZETTI ORDONEZ, G. A. **Aplicação da termometria infravermelha na irrigação da cultura de milho (*Zea mays L.*) e do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*)**. Viçosa, UFV, 1990. 61 p. (Tese de Mestrado).
- PAZZETTI, G. A.; OLIVA, M. A.; LOPES, N. F. Aplicação da termometria ao infravermelho à irrigação do feijoeiro: crescimento e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.28, n.12, p.1371-7, 1993.

- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society**, v.198, p.116-40, 1948.
- PENNINGTON, D. A.; HEATHERLY, L. Effects of changing solar radiation on canopy-air temperatures of cotton and soybean. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.46, n.1/2, p.1-14, 1989.
- PEREIRA, A. R., VILLA NOVA, N. A. & SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba, Fealq. 1997, 183p
- PETROVIC, A.M.; SIEBERT, J.E.; RIEKE, P.E. Soil bulk density in three dimensions by computed tomography scanning. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, p.445-450, 1982.
- PEYTON, R.L.; GANTZER, C.J.; ANDERSON, S.H.; HAEFFNER, B.A.; PFEIFER, P. Fractal dimension to describe soil macropore structure using X ray computed tomography. **Water Resources Research**, Washington, v.30, n.3, p.691-700, 1994.
- PHENE, C. J.; ALLEE, C. P.; PIERRO, J. Measurement of soil matric potential and real time irrigation scheduling. **Agric. Water Management**, v. 16, n. 3, p. 173-185, 1989.
- PICKARD, W. F. A heat pulse method of measuring water flux in woody plant stems. **Mathematical Biosciences**, v. 16, p. 247-262, 1973.
- PRUITT, W.O.; LOURENCE, F.J. Experiences in lysimetry for ET and surface drag measurements. In: **Advances in Evapotranspiration**, Amer. Soc. of Agric. Eng., St. Joseph, Michigan, 1985. p. 51-69.
- REYENGA, W.; DUNIN, F.X.; BAUTOVICH, B.C.; RATH, C.R.; HULSE, L.B. A weighing lysimeter in a regenerating eucalypt forest: design, construction, and performance. **Hydrol. Processes**, v.2, p.301-314, 1988.
- RICHARDSON, A. J. and WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.43, n.12, p.1541-52, 1977.
- RIPPLE, W.J. Spectral reflectance relationships to leaf water stress. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.52, n.10, p.1669-75, 1986.

ROSENBERG, N.J., BLAD, B.L. & VERMA, S.B. **Microclimate: the biological environment**. John Willey & Sons, Inc., NY, 1983.

SAHA, S. K.; AJAI GOPALAN, A. K. S.; KAMAT, D. S. Relations between remotely sensed canopy temperature, crop water stress, air vapour pressure deficit and evapotranspiration in chickpea. **Agric. For. Meteorol.**, v.38, p.17-26, 1986.

SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. **J. Agr. Met.** v.37, n.1, p.9-17, 1981.

SAKURATANI, T. Two thermic methods for measuring water flux in the stem of intact plants and their application. **Bull. Of the National Inst. Of Agric. Sci.**, v. 29, p. 47-121, 1982.

SAKURATANI, T. Improvement of the probe for measuring water flow rate in intact plants with the stem heat balance method. **J. Agr. Met.**, v.40, n.3, p.273-277, 1984.

SAKURATANI, T.; ABE, J. A heat balance method for measuring water flow rate in stems of intact plants and its application to sugarcane plants. **Tropical Agric. Res. Center, JARQ**, v. 19, n. 2, p. 92-97, 1985.

SANTOS, R. Z. dos; ANDRÉ R. G. B. Relações energéticas e aerodinâmicas em uma cultura de feijão. **Rev. Bras. de Agromet.**, v.1, n.1, p.11-18, 1993.

SCHULZE, E.D.; CERMAK, J.; MATYSSEK, R.; PENKA, M.; ZIMMERMAN, R.; VASICEK, F. Canopy transpiration and water fluxes in the xylem of the trunk of Larix and Picea trees - a comparison of xylem flow, porometer and cuvette measurements. Springer-Verlag, **Oecologia** (Berlin), v.66, p.475-483, 1985.

SCHWERDTFEGGER, P. **Physical principles of micrometeorological measurements**. New York, Elsevier Scientific Publishing Company. 1976, 113p.

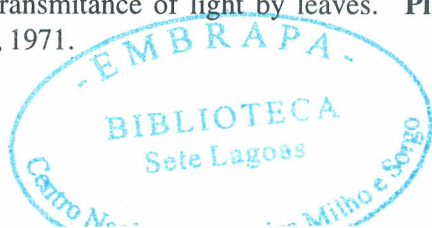
SEDIYAMA, G. C. A versão/proposta para o conceito de evapotranspiração de referência. **IX Crongresso Brasileiro de Agrometeorologia**, SBA, Campina Grande, PB. 1995, 14 p.

- SHARMA, M.L. Estimating evapotranspiration. **Advances in irrigation**, v.3, p.213-281, 1985.
- SHAW, C.B. & GIFFORD, G.F. Sap velocity studies in natural stands of pinyon and juniper trees. **J. Range Manage**, v.28, p.377-379, 1975.
- SHUTLEWORTH, W. J. Evaporation. In: Maidmaint ed. **Handbook of Hydrology**, Mc Graw-Hill, New York, 4.1-4.53. 1992.
- SILVA, B. B. da; KUMAR, K. K.; AZEVEDO, P. V. de; SOUZA, P. V. de. Estimativa das resistências aerodinâmicas e da cultura com base na temperatura do dossel para o algodão herbáceo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 8, Santa Maria, 1993. **Resumos...** Santa Maria: SBA, 1993. p. 54.
- SILVA, E.L.da, **Notas de Aula de Relação Água-Solo-Planta**. Departamento de Engenharia Universidade Federal de Lavras. 1997.
- SLAVIK, B. **Methods of studing plant water relations**. Springer-Verlag, N.Y., 1974. 449p.
- SMITH, M. Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Rome, FAO, Land and Water Development Division, 1991. 45 p.
- SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. **Journal of Irrigation and Drainage Eng.**, v. 118, n. , p. 977-980, 1992.
- SOIL SENSORS, INC. AquaProbe - Soil moisture sensor - A fresh approach to measuring soil moisture, 1997, Minneapolis, MN, USA. (Technical Report - 401).
- SOILMOISTURE EQUIPMENT CORPORATION. Operating instructions for the TRASE systems, model 6050x1 version 2000, 1996, snp, Goleta, California, USA.
- STEFFEN, C. A. **Reflectância**. São José dos Campos, agosto de 1995. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. (INPE 5638. PUD/070).
- STEFFEN, C.A., MORAES, E.C.and GAMA, F. G. Radiometria óptica espectral. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., Salvador, BA, 39p. 1996.

- STEGMAN, E. C.; SODERLUND, M. Irrigation scheduling of spring wheat using infrared thermometry. **Trans. ASAE**, v.35, n.1, p.143-152, 1992.
- STEINMETZ, S.; COSTA, A. B. G. Uso da termometria ao infravermelho para caracterizar a necessidade de irrigação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.). I. Desempenho do índice baseado na variabilidade da temperatura do dossel vegetativo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11., Campina Grande, 1995. **Anais...** Campina Grande: Soc. Bras. de Agrometeorologia, 1995. p.504-5.
- STOCKLE, C. O.; DUGAS, W. A. Evaluating canopy temperature-based indices for irrigation scheduling. **Irrigation Science**, v.13, n.1, p.31-7, 1992.
- STONE, J.F. & SHIRAZI, G.A. On the heat-pulse method for the measurement of apparent sap velocity in stem. **Planta**, v.122, p.169-177, 1975.
- STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. London, Kluwer Academic Publishers. 1997. 670p.
- SUMAYAO, C. R.; KANEMASU, E. T.; BRAKKE, T. W. Using leaf temperature to assess evapotranspiration and advection. **Agricultural Meteorology**, v.22, n.2, p.153-66, 1980.
- SVENDSEN, H.; JENSEN, H. E.; JENSEN, S.E.; MOGENSEN, V. O. The effect of clear sky radiation on crop surface temperature determined by thermal thermometry. **Agric. For. Meteorol.**, v.50, p.239-243, 1990.
- SWANSON, R.H. & WHITFIELD, D.W.A. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. **J. of Exp. Bot.** v.32, p.221-239, 1981.
- SWANSON, R.H. **An instrument for detecting sap movement in woody plants**. U.S. Forest Serv., Intermountain Forest & Range Exp. Sta., 1962. p.16. (Paper no. 68).
- SWANSON, R.H. Water transpired by trees indicated by heat pulse velocity. **Agric. Met.**, v.10, p.277-281, 1972.
- SWANSON, R.H.; BENECKE, U. & HAVRANECK, W.M. Transpiration in mountain beech estimated simultaneously by heat-pulse velocity and climatised cuvette. **New Zealand J. of Forestry Sci.**, v.9, p.170-176, 1979.

- SZEICZ, G. & LONG, I.F. Surface resistance of crops. **Water Resources Res.**, v.5, n.3, p.622-633, 1969.
- SZEICZ, G., ENDRODI, G. & TAJCHMAN, S. Aerodynamic and surface factors in evaporation. **Water Resources Res.**, v.27, n.5, p.380-394, 1969.
- TANNER, B. D. Automated weather stations. **Remote Sensing Reviews**, v.5, n.1, p. 73-98, 1990.
- TANNER, C.B. **Temperature: Critique I. Controlled Environmental Guidelines for plant research** (T.W. Tibbits and T.T. Kozolowski, Eds.), Academic Press, 1979. p. 117-130.
- THORPE, M. R. Net radiation and transpiration of apple trees. **Agricultural meteorology**, v.19, p.41-57, 1978.
- TOPP, G.C. Soil Water Content. In: M.R.CARTER (ed.). **Soil Sampling and Methods of Analysis**. Canadian Soc. Soil Science, Ottawa-Ontario, Canada, 1993. p.541-557.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic Determination in Soil Water Content: Measurements of Coaxial Transmission Lines. **Water Resources Research**, v.16, n.3, p.574-582, 1980.
- TORRE-NETO, A.; HERRMANN, P.S.P.; MARTINS, A.L.M.; CRESTANA, S. Medidas de parâmetros hídricos do solo através das técnicas de TDR e tensiometria automatizada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO: O SOLO NOS GRANDES DOMÍNIOS MORFOCLIMÁTICOS DO BRASIL E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTADO, 25., Viçosa-MG, 1995. **Resumos expandidos...** Viçosa: UFV, 1995. v.1, p.20-23. ref.I.07.
- TUCKER, C. L. Hand-held radiometer studies of vegetation in-situ: a new and promising approach . In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING FOR OBSERVATION AND INVENTORY OF EARTH RESOURCES AND THE ENDANGERED ENVIRONMENT, **Proceedings...** Freiburg, F.R. Germany, 2-8 July, G. Hildebrandt and H. J. Boehnel, v.7, p.667-72. 1978.
- TUCKER, C.L. and GARRATT, M.W. Leaf optical system modeled as a stochastic process. **Applied Optical**, v.16, n.3, p.635-42, 1977.

- VAZ, C.M.P.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CRUVINEL, P.E.; REICHARDT, K.; STOLF, R. Using a computed tomography miniscanner for studying tillage induced soil compaction. **Soil Technology**, Cremlingen, v.2, p.313-321, 1989.
- VERMA, S.B., ROSENBERG, B.L., BLAD, B.L. & BARADAS, M.W. Resistancy energy method for predicting evapotranspiration: determination of boundary layer resistance and evaluation of error effects. **Agron. J.**, v.68, p.776-782, 1976.
- VETTORAZZI, C.A. **Sensoriamento remoto orbital**. Série Didática n. 002 – Departamento de Engenharia Rural – ESALQ-USP, 134p., 1992.
- WANJURA, D. F.; UPCHURCH, D. R.; MAHAN, J. R. Automated inrrigation based on threshold canopy temperature. **Trans. ASAE**, v.35, n.1, p.153-159, 1992.
- WARNER, G.S.; NIEBER, J.L.; MOORE, I.D.; GEISE, R.A. Characterizing macropores in soil by computed tomography. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p.653-660, 1989.
- WEBB, E.K., PEARMAN, G.I. & LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v.106, p.85-100. 1980.
- WENDT, C.W.; BROOKS, C.R. & RUNKLES, J.R. Use of the thermoelectric method to measure relative sap flow in monocotyledons. **Agron. J.**, v.57, p.637-638, 1965.
- WIEGAND, C. L.; NANKEN, L. N. Influences of plant moisture stress, solar radiation, and air temperature on cotton leaf temperature. **Agronomy Journal**, v.58, n.6, p.582-6, 1966.
- WIEGAND, C.L. and RICHARDSON, A.J. Spectral component analysis rationale, and results for three crops. **International Journal of Remote Sensing**, v.8, n.7, p.1011-32, 1987.
- WOOLLEY, J.T. Reflectance end transmittance of light by leaves. **Plant Physiology**, v.47, n.1-6, p.656-62, 1971.



WRIGHT, J.L. & JENSEN, M.E. Development and evaluation of evapotranspiration models for irrigation scheduling. **Trans. of the ASAE**, v.21, p.88-96, 1978.

ZEGELIN, S.J.; WHITE, I.; JENKINS, D.R. Improved fields probes for soil water content and electrical conductivity measurements using TDR. **Water Resources Research**, v.25, n.11, p.2367-2376, 1989.

ZHANG, L.; LEMEURE, R. Effect of aerodynamic resistance on energy balance and Penman-Monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions. **Agric. For. Meteorol.**, v.58, p.209-228, 1992.