

# CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA REGIÃO DO VALE DO PARAÍBA, SP

<sup>1</sup>FISCH, G.F.; <sup>1</sup>TARGA, M.S.\*

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, UNITAU, Taubaté, Sp. Brasil  
e-mail: [fisch.gilberto@gmail.com](mailto:fisch.gilberto@gmail.com), [targa.marcelo@gmail.com](mailto:targa.marcelo@gmail.com)

\*Autor correspondente

**Resumo:** O presente texto objetiva contribuir para o uso de técnicas/fórmulas para a estimativa da evapotranspiração ao comparar a perda de água em uma superfície em capacidade de campo (usando um lisímetro), com dados normalmente medidos em uma estação meteorológica convencional (evaporímetro de Piché e tanques de evaporação classe A tradicional e de nível constante) e com fórmulas de estimativa (Penman-Monteith e de Priestley-Taylor). Além da estimativa pontual da evapotranspiração com dados do Posto Meteorológico, indica-se estimar o índice de área foliar para a cobertura vegetal da área de estudo, através de técnicas de Sensoriamento Remoto e medidas não destrutivas da interceptação hemisférica da radiação pelo dossel e estimativa a evapotranspiração real espacializada com base na estimativa da evapotranspiração potencial pontual e estimativas dos índices de área foliar das diferentes coberturas. Como objetivo secundário, pode-se coletar dados do componente do balanço de radiação (ondas curtas incidente e refletida, ondas longas da atmosfera e emitidas pela superfície) e realizar estudos do ciclo diurno destes fluxos e comparações entre medidas e estimativas da energia emitida pela superfície utilizando-se a equação de Stefan-Boltzmann.

**Palavras chaves:** Ciências ambientais, índice de área foliar, balanço hídrico

**Abstract:** The purpose of this text is to contribute to the use of techniques / formulas for estimating evapotranspiration by comparing the loss of water in a field capacity (using a lysimeter), with data normally measured in a conventional meteorological station ( Piché evaporimeter and traditional and constant level A evaporation tanks) and with estimation formulas (Penman-Monteith and Priestley-Taylor). In addition to the point estimate of the evapotranspiration with data from the Meteorological Station, it is indicated to estimate the leaf area index for the vegetation cover of the study area, through Remote Sensitization techniques and non-destructive measures of the hemispheric interception of radiation by the canopy and estimation of spatialized real evapotranspiration based on the estimation of potential point evapotranspiration and estimates of the foliar area indices of the different coverages. As a secondary objective, data on the component of the radiation balance (incident and reflected short waves, long waves from the atmosphere and emitted by the surface) can be collected and studies of the diurnal cycle of these flows and comparisons between measurements and energy estimates can be made. emitted by the surface using the Stefan-Boltzmann equation.

**Keywords:** Environmental sciences, leaf area index, water balance

## 1. Introdução

Historicamente a agricultura desempenha um papel importante dentro do quadro sócio econômico do Vale do Paraíba, principalmente na área do município de Taubaté. Esta região possui, devido em parte a topografia local, a característica de ter pequenas

propriedades agrícolas, nas quais o plantio ainda é realizado de uma maneira um pouco rudimentar, não obstante de estar próximo a centros de alta tecnologia (por exemplo, o polo aeroespacial de São José dos Campos com a Embraer, CTA e o INPE). Nestas condições, melhorias no planejamento e o gerenciamento de técnicas agrícolas de plantio, irrigação e colheita, podem contribuir substancialmente para o aumento da produtividade agrícola e/ou obtenção de maior renda líquida.

É fato de que o evento de precipitação é a principal fonte de água para o solo, que fica disponível para a evapotranspiração e para os processos fotossintéticos de incorporação de matéria orgânica das plantas. Sendo assim, ou se conhece com detalhes a climatologia do local em relação às chuvas, ou se faz a irrigação da cultura, caso seja necessário. A utilização dos conhecimentos climatológicos na orientação do calendário agrícola e a irrigação suplementar, é o desejável econômica e ambientalmente. Neste sentido, as estimativas de evapotranspiração e a realização do balanço hídrico são partes importantes neste processo, contudo, a condução dos processos físicos acima mencionados, somente, é possível por meio da coleta de informações meteorológicas.

A Universidade de Taubaté (UNITAU) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), instalaram uma estação climatológica principal (ECP) na Fazenda Piloto da UNITAU (campus do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade), com intuito de coletar informações climatológicas da região e que pudesse ser útil na parte de previsão de tempo, pois os dados são enviados diariamente ao 7º Distrito de Meteorologia (DISME) do INMET e também dar o apoio climático às pesquisas que os professores e alunos da UNITAU desenvolvem. Esta estação coletou dados convencionais (temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação, ventos, insolação, evaporação, pressão atmosférica, nebulosidade) desde 1993. Mais recentemente, a UNITAU em convênio com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), instalou uma estação meteorológica automática (EMA) junto a ECP convencional, dentro do Projeto de Monitoramento Ambiental da região do Eixo Rio – São Paulo (MARSP). Esta EMA está ligada, ao INPE, onde os dados horários dos principais elementos climáticos (temperatura do ar, umidade relativa, ventos, precipitação, fluxos de radiação solar e de calor conduzido ao solo, perfil de temperatura de solo (5,10,15 e 20 cm) e pressão atmosférica) são transferidos diariamente ao INPE para utilização em previsão do tempo. Estes dados estão sendo coletados desde 1997.

Os equipamentos acima citados situam-se em um cercado meteorológico de 12 m X 18 m, colocado em um platô do campus da Agronomia - Fazenda Piloto (Figura 1).



Figura 1. Posto Meteorológico física e automática na Fazenda Piloto da UNITAU, Taubaté, SP.

## Estimativa da Evapotranspiração por Sensoriamento Remoto

A cobertura vegetal normalmente não cobre todo o solo exceto nos estágios mais avançados de desenvolvimento. É sabido que o uso de água pela planta continua crescendo mesmo após a vegetação ter coberto todo o solo (Rosenberg et al., 1983).

A figura 2 (Bouchet e Robelin, 1969, *apud* Rosenberg et al. 1983). mostra que a evapotranspiração potencial é basicamente controlada pelo clima e varia em função da estação do ano. À medida que a planta cresce, i.e. o IAF aumenta, ela aumenta. A figura mostra também que a evapotranspiração máxima é um caso especial da evapotranspiração real. A evapotranspiração máxima é limitada para um dado clima, pelo desenvolvimento da planta quando suprida plenamente de água.

Em essência, a diferença entre evapotranspiração potencial e máxima é uma medida da resistência do dossel (Figura 2) e a evapotranspiração real ocorre devido a um suprimento de água pelo solo abaixo da saturação (Rosenberg et al., 1983). Dessa forma, evapotranspiração real é igual ou menor do que a evapotranspiração máxima que por sua vez é menor ou igual a evapotranspiração potencial. É, portanto, fundamental se determinar a forma de como a cobertura vegetal se desenvolve em determinada área para se determinar a evapotranspiração.

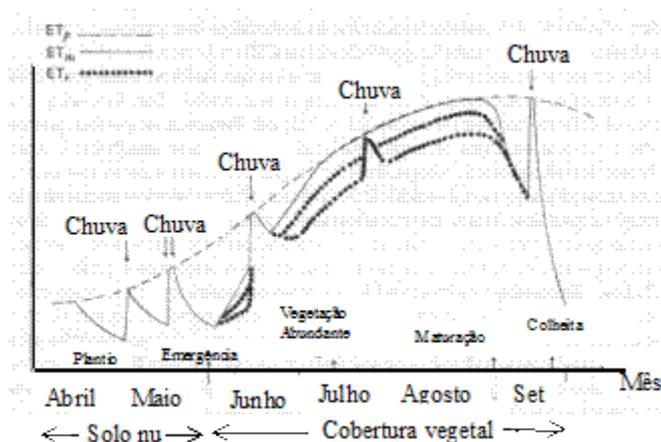


Figura 2. Relação entre Evapotranspiração Potencial Máxima e Real  
Fonte; Bouchete e Robelin (1969)

A relação entre a transpiração (componente devido à planta) e a evapotranspiração potencial cresce à medida que aumenta o índice de área foliar das culturas. Kristensen (1974), observou que essa relação aproximou de 1 quando o IAF era próximo de 3 (cevada, beterraba e grama). De forma similar, foi observado por Brun et al. (1972) que a transpiração é correlacionada com o IAF. Eles observaram para a soja que a transpiração foi de aproximadamente 50% da evapotranspiração quando a soja tinha um IAF igual a 2 e que passou a 95% quando o IAF passou para 4.

Ritchie e Burnett (1971) observaram que a relação entre a transpiração e a evapotranspiração potencial (Figura 3) pode ser modelada em função do índice de área foliar da seguinte forma:

$$T = ET_p (-0,21 + 0,70 LAI^{1/2}) \text{ para } 0,1 \leq IAF \leq 2,7$$

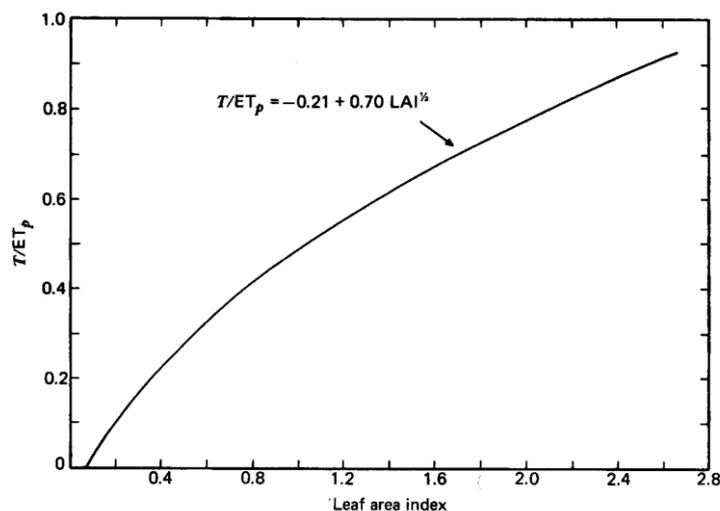


Figura 3. Índice de Área Foliar (água no solo não limitante)  
 Fonte: Ritchie e Burnett (1971).

### Uso do Índice de Área Foliar na Estimativa da Evapotranspiração

O IAF medido é uma das principais características de um dossel e está intimamente relacionado com vários processos fisiológicos da planta, em especial com a evapotranspiração (Running et al., 1989; Brun et al., 1972). Ele poderia ser usado para calcular a evapotranspiração real com base na evapotranspiração potencial estimada (Brun et al., 1972) ou entrar no próprio cálculo da transpiração usando a formulação, por exemplo, de Penman-Monteith conforme proposto por Soares et al. (2001). Eles propuseram que a condutância global do dossel seja dada pela multiplicação da condutância estomática ( $\text{ms}^{-1}$ ) pelo IAF ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ). Dessa forma, o IAF entra diretamente no cálculo da evapotranspiração usando a formulação de Penman-Monteith.

Outra alternativa para modelar a evapotranspiração potencial seria, por exemplo, com base na definição de Rosenberg et al. (1983): “*Evapotranspiração potencial é a evaporação de uma superfície extensa de uma cultura baixa a qual sombreia totalmente o solo e que exerce pouca ou resistência negligenciável ao fluxo de água e que esteja sempre suprida de água. A evapotranspiração potencial não pode exceder à evaporação da água livre (exposta) sob as mesmas condições climáticas*”. Assim, uma cobertura vegetal que não esteja sombreando totalmente a superfície do solo (IAF baixo) está limitando a evapotranspiração. Por outro lado, uma cobertura vegetal com IAF acima do necessário para sombrear todo o solo terá uma transpiração maior do que a cultura de referência usada na definição acima. Dessa forma, pode-se testar diferentes fatores de correção da evapotranspiração potencial calculada pelos diferentes métodos propostos nesse projeto com base no IAF. Por exemplo, multiplicar-se-á a evapotranspiração calculada pontualmente pelo fator  $\text{IAF}_{\text{estimado}} \text{ para cada talhão} / 2,8$ . Pereira et al., (1997) apresenta uma discussão detalhada e com embasamento científico de como o IAF pode ser usado para a estimativa do coeficiente de cultura (Kc) que permite a estimativa da evapotranspiração da cultura com base na evapotranspiração de referência.

### Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF)

A estimativa do IAF no campo pode ser obtida de várias formas, mas quase sempre destrutivas, podendo causar danos mecânicos às culturas, além de serem extremamente demoradas e em conseqüência, de alto custo. Um método alternativo para a medida do IAF é a interceptação da radiação pelo dossel da cultura, pois permite amostrar de forma

representativa a cobertura vegetal, sendo, portanto, um método prático e que não causa dano à cultura. Temos disponibilidade de um instrumento capaz de medir o IAF dessa forma, isto é, o LAI-2000, adquirido em um projeto financiado pela FAPESP (94/2706-5, Patrimônio INPE 025812), coordenado por um dos proponentes do presente projeto.

### Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) por Sensoriamento Remoto

Vimos que o IAF pode modelar a evapotranspiração, portanto, a espacialização do IAF poderia fornecer uma distribuição espacial da evapotranspiração. O Sensoriamento Remoto poderia ser usado para estimar diretamente o IAF (Xavier, 1998; Soares et al., 2001; Sousa e Ponzoni, 1996), com base em imagens, sem medidas de campo. Contudo, esta estimativa ainda carece de pesquisa para áreas de cobertura diversificada. Em adição, a estimativa de IAF através de imagens está limitada à disponibilidade de imagens, sem nuvens nas datas necessárias e na resolução espacial requerida o que certamente limitaria o uso de imagens orbitais para o presente projeto. Entretanto, essa possibilidade não deve ser descartada, caso exista disponibilidade de tais imagens. Para coberturas monotípicas têm sido obtidos resultados bastante encorajadores como pode ser observado na Figura 4 (Soares et al., 2001).

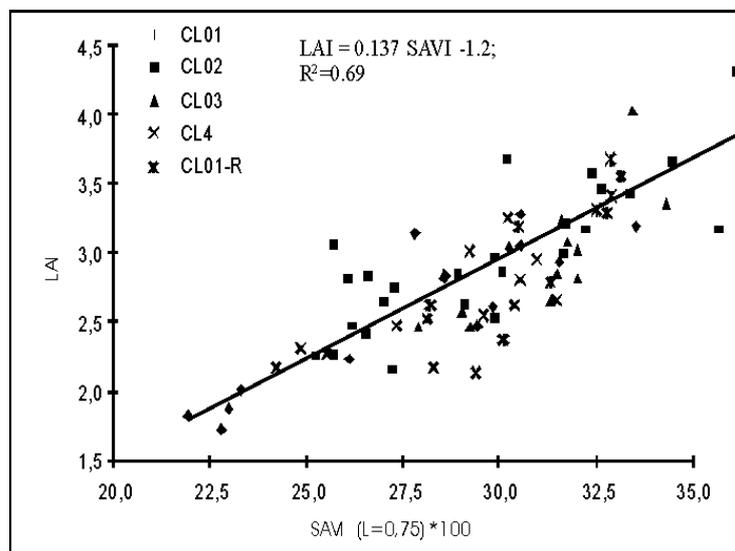


Figura 4. Curva de regressão de IAF versus o índice de vegetação SAVI (L=0,75), usando dados de vários clones em conjunto (CL01, CL02, CL03, CL04 e CL01-).

Fonte: Soares et al., 2001.

## 2. Climatologia da área do Vale do Paraíba (SP)

A utilização dos conhecimentos climatológicos na orientação do calendário agrícola é o desejável, pois a técnica de irrigar é um processo economicamente desvantajoso e que encarece o produto final. Neste sentido, as estimativas de evapotranspiração e a confecção do balanço hídrico são partes importantes neste processo.

Em geral, os agricultores que possuem sistema de irrigação no Vale do Paraíba não se utilizam de técnica para controle de irrigação, o que faz com que os custos de produção sejam ainda mais elevados. Assim, a utilização de dados de evaporação, chuva e evapotranspiração, são muito importantes para a definição também de quanto e quando irrigar as culturas, especialmente as de ciclo anual cultivadas na época de outono e inverno. A UNITAU, através de seus pesquisadores tem procurado de modo isolado ou em conjunto

com o INPE e o IAC, desenvolver pesquisas e orientar trabalhos de iniciação científica, utilizando dados do posto meteorológico para a estimativa de balanço hídrico. Neste sentido, podem ser citados os trabalhos conduzidos por Corte et al. (2000), Alvarenga et al. (2000) com a cultura do girassol e Corte et al. (2000) com a cultura do trigo, bem como sobre a estimativa da evapotranspiração (Gadioli e Targa, 1992) e sobre irrigação de trigo (Rudorff et al., 2000).

Na ausência de um método ou equipamento mais preciso para a determinação da evapotranspiração potencial visando o balanço hídrico para controle da irrigação, as estimativas deste parâmetro nos citados trabalhos foram feitas através do Tanque Classe A.

Corte et al. (2000) realizando balanço hídrico da cultura do trigo, submetido a diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, concluíram que o balanço hídrico como mecanismo de decisão do momento de irrigação proporcionou uma utilização mais racional da água, energia e mão de obra, pois possibilitou a redução do número de irrigações durante o ciclo de 24 para somente 10 irrigações.

O balanço hídrico é um excelente mecanismo de decisão do momento da irrigação, proporcionando uma utilização mais racional da água, pois a frequência de irrigação foi feita em turnos variáveis de acordo com a necessidade da cultura do girassol, a demanda climatológica e com o aproveitamento da umidade em profundidade superior a 30 cm, proporcionando uma economia de água, de energia, de mão-de-obra e de insumos (Corte e Targa, 2000).

Almeida et al., 2011 observaram o desempenho de girassol cultivado no período de safrinha em Taubaté, SP utilizando o balanço hídrico com base na evapotranspiração real calculada pelo tanque classe A para a irrigação.

Fisch (1995), utilizando uma série temporal de 10 anos de dados de precipitação e de temperatura do ar, realizou o balanço hídrico para o Vale do Paraíba. Os resultados obtidos mostraram que o período do verão é extremamente chuvoso (chove aproximadamente 42 % da precipitação anual), ao passo que o inverno é bastante seco (apenas 7% do total anual). A gênese destas chuvas é bem distinta, sendo a precipitação provocada por chuvas convectivas durante o verão e por penetração de frentes frias na época de inverno. Lemos e Fisch (2000) estudaram a penetração destes sistemas no Vale do Paraíba e chegaram ao número médio de 47 sistemas atuando durante o ano todo. No período de inverno, ocorre uma predominância maior, tanto em termos numéricos da passagens das frentes frias, como também da intensidade da massa de ar polar, com a queda de temperatura.. Ainda com relação ao ciclo hidrológico, o balanço hídrico não apresenta déficit de água no solo, mesmo durante os meses de estiagem. Vale a pena ressaltar que este balanço hídrico foi realizado pela metodologia de Thornthwaith & Maher, utilizando dados médios mensais de temperatura e de precipitação. A fórmula climática desta região é  $B1rB3'a'$ , que representa um clima úmido com pequena ou nenhuma deficiência de água e mesotérmico, com evapotranspiração potencial anual de 964 mm, sendo que 33% ocorre nos meses de verão. Em um estudo posterior, Fisch (1999) analisou dados diários de precipitação dos últimos 15 anos (1983-1997) e encontrou que o período chuvoso inicia-se na segunda semana de Outubro, estendendo-se até a primeira semana de Maio. O período chuvoso acumula uma precipitação de 1068 mm (que representa 79% do total anual), com 205 dias de precipitação (chuvas superior à 1mm.dia-1). A probabilidade de ocorrência de 0 dias de intervalo de chuva é pequena (menor que 5%) durante o verão, aumentando esta probabilidade para 25% de chance de ocorrer para um período de 10-20 dias sem chuvas no inverno.

Com objetivo de demonstrar algumas metodologias utilizadas para a estimativa da Evapotranspiração potencial (Etp), bem como as variações que podem ocorrer na escolha de métodos que necessitam de menor número de variáveis climatológicas, Gadioli e Targa

(1992) determinaram os valores da Etp para Taubaté, no mês de Julho no período de 1989 a 1991 por quatro diferentes métodos e compararam com o do Tanque Classe A. Os autores observaram que na média dos três anos, os valores de evapotranspiração, tiveram os seguintes desvios percentuais em relação ao Tanque Classe: PENMAN (-2,49), HARGREAVES (-3,90), TURC (+7,16), JENSEN-HAISE (+12,90) e THORNTHWAITTE (-34,30) e concluíram que face a grande quantidade de métodos estimativos da evapotranspiração deve-se ter cuidado na adoção de um determinado método.

### 3. Metodologia de estudo

#### Evapotranspiração

Em uma superfície vegetada, ocorrem simultaneamente os processos de evaporação e de transpiração. Evapotranspiração é o termo empregado para expressar esta ocorrência simultânea (Pereira et al., 1997). Em situações em que o solo esteja bem suprido de água e que a superfície vegetada esteja em crescimento ativo e cobrindo totalmente o terreno, a evapotranspiração ocorre em sua taxa potencial, que representa o maior valor de perda d'água de uma superfície sem efeito de oásis. A evapotranspiração é a maneira pela qual as plantas perdem água para a atmosfera, extraíndo-a do solo. Além disso, os estômatos, que são as portas porosas de trocas de vapor d'água e CO<sub>2</sub>, ficam abertos, permitindo que as plantas evapotranspirem livremente, ao mesmo tempo em que praticam fotossíntese. Em teoria as plantas devem evapotranspirar na taxa potencial, pois estariam realizando o máximo de fotossíntese e incorporação de matéria orgânica. Portanto, o conhecimento e o cálculo da evapotranspiração potencial são importantes no planejamento agrícola.

Uma das maneiras mais práticas de se estimar a evapotranspiração potencial de uma superfície é considerando-se a fórmula, inicialmente, proposta por Penman (1955) e, posteriormente, modificada por Monteith (1965), para o cálculo da perda de água somente baseado em condições ambientais (evapotranspiração de Penman-Monteith LE<sub>PM</sub>), em mm/dia, conforme a Equação 1.

$$LE_{PM} = \frac{s \times (R_n - G) + \rho \times c_p \times VPD \times g_a}{(s + \gamma)} \quad \text{Eq. [1]}$$

Em que R<sub>n</sub> e G são os fluxos de saldo de radiação e calor conduzido ao solo em W.m<sup>-2</sup>, respectivamente, VPD é o déficit de pressão de vapor definido como a diferença das pressão de vapor de saturação e a atual (em hPa), g<sub>a</sub> é a condutância aerodinâmica e estimada como o inverso da velocidade do vento (s.m<sup>-1</sup>), s é a tangente da curva da pressão de vapor em função da temperatura do ar (hPa.K<sup>-1</sup>), γ é a constante psicrométrica (0,66 hPa.C<sup>-1</sup>), ρ é a densidade do ar (Kg.m<sup>-3</sup>), c<sub>p</sub> é a calor específico do ar (1005 J.Kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>). O termo que engloba (R<sub>n</sub> e G) é denominado de termo energético e o que engloba VPD e g<sub>a</sub> de termo aerodinâmico. Fisicamente eles representam os processos que forçam o processo de evaporação da água, saindo do solo e passando pelas plantas.

Esta equação, utilizada com dados médios do período diurno – das 6:00 às 18:00 horas, pode ser um bom estimador da perda de água de uma região (Pereira et al., 1997). Como estamos calculando a evapotranspiração potencial, assume-se que a condutância estomática (g<sub>s</sub>) seja nula e portanto ela não aparece na equação 1.

Uma adaptação e simplificação da equação de Penman-Monteith é a utilização do método de Priestley-Taylor (1972), o qual mantém apenas o termo que contém a contribuição do balanço de radiação (termo energético), corrigido por um coeficiente de ajuste (α). Este método simplifica a estimativa da evapotranspiração potencial, podendo ser acoplada a modelos numéricos de previsão de tempo. A determinação do valor

numérico de  $\alpha$  foi realizada comparando-se observações de perda de água por lisímetros e encontrou-se valores que situam-se na faixa entre 1,08 e 1,34, sendo o valor de 1,26 admitido como o mais provável para estimar a evapotranspiração potencial. Pereira et al. (1997) fazem uma análise detalhada deste termo para vários tipos de superfície e coeficientes. Desta maneira, a equação (1) torna-se:

$$LE_{PT} = 1,26 \times (R_n - G) \quad \text{Eq. [2]}$$

### Estratificação da Área de Estudo

A área de estudo deve ser estratificada em talhões "homogêneos" com base no IAF usando dados e técnicas de Sensoriamento Remoto. Devem ser utilizadas fotografias aéreas, no mínimo, na escala 1:15.000. As fotos necessárias para cobrir a área de estudo devem ser georreferenciadas com base em carta topográfica – IBGE, e escala 1:10.000, projeção UTM, com a utilização *softwares* de geoprocessamento, como o SPRING ("<http://www.dpi.inpe.br/spring>") ou o QGis (<https://qgis.org>), ambos de acesso livre.

### Medidas Não Destrutivas de IAF usando o LAI-200

LAI-2000 medidor do Índice de Área Foliar (IAF) é uma unidade de controle que possui a eletrônica necessária para medir, gravar e computar valores do Índice de Área Foliar. Para a medição utilizam-se ângulos de visada em 5 distintas bandas angulares (0-13°, 16-28°, 32-43°, 47-58° e 61-74°). O sensor é constituído de cinco fotodiodos, cujas superfícies ativas estão arrançadas em anéis concêntricos. A imagem desta visão, quase hemisférica, é projetada dentro destes anéis, permitindo, para cada intervalo angular, a medição da radiação na banda e no ângulo zenital conhecido (Figura 5). Um filtro óptico restringe a transmissão radiativa para comprimentos de ondas menores que 490 nm (LI-COR, 1992).

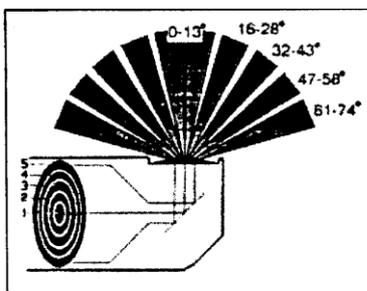


Figura 5. Ângulos de visada e arranjo dos 5 detectores do LAI-2000.  
Fonte: (LI-COR, 1992)

### Coleta dos dados

Segundo LI-COR (1992), a medição deve ser feita em pelo menos uma leitura de referência fora do dossel, realizadas em clareiras com o sensor sempre sombreado, ou seja, oposto a direção do sol, e dentro do dossel fazer quantas medições forem necessárias (dependendo do tamanho da área), lembrando-se que é obrigatório para uma boa análise utilizar a mesma direção do sensor na clareira e para minimizar erros de medições entre dosséis esparsos e densos é recomendado utilizar o anel de 45° e para lugares menos densos pode-se utilizar anéis de ângulos maiores.

As medidas devem ser coletadas no intervalo máximo de uma semana no período da tarde das 17 as 18:00 h, em duas estações (seca e chuvosa) dependendo das condições

meteorológicas. Devem ser realizadas 5 medições em cada tipo de cobertura do solo, sendo 1 medida acima do dossel e 4 medidas abaixo do dossel nas entre linhas diagonalmente. Deve-se analisar o desvio padrão das medidas e se esse for grande, deve-se aumentar o número de medidas nos talhões de maior variação.

Após as medições, os dados armazenados coletados em campo devem ser transferidos para o microcomputador usando o *software* COMM, (*software* próprio, fornecido pela LI-COR junto com o equipamento). As medidas obtidas deverão ser analisadas em forma de planilhas através do *software* “Excel” (disponibilizado pela UNITAU) para análise de todas os talhões identificados. Através de um sistema de processamento de imagens e geoprocessamento, os dados de IAF medidos em campo serão associados aos diversos polígonos da imagem previamente analisada, para se ter uma distribuição espacial do IAF para toda a área de estudo. Uma vez calculada a evapotranspiração pelos métodos propostos, seus valores serão ponderados pelo valor do IAF para cada talhão, obtendo-se assim, a evapotranspiração total para toda a área de estudo.

### **Balanco de Radiação**

As estimativas de Penman-Monteith e de Priestley-Taylor necessitam de medidas do saldo de radiação (ondas curtas e longas) que fica disponível para a evapotranspiração. Sendo assim, e em geral os postos meteorológicos não possuem medidas desta variável; deve-se minimamente instalar um equipamento para este parâmetro. Recentemente, a Kipp & Zonnen lançou no mercado um instrumento (CNR1) que mede os componentes do balanço de radiação (ondas curtas, incidente e refletida e ondas longas da atmosfera e emitidas pela superfície). Simultaneamente, às medidas deste equipamento, o CNR1, são em geral coletados dados de temperatura de solo (1, 5, 10 e 20 cm de profundidade) que podem ser utilizados para comparação entre medições (com o CNR1) e estimativas (usando-se a equação de Stefan-Boltzmann) da energia emitida pela superfície.

Pela equação de Stefan-Boltzmann, a energia irradiada de um corpo pode ser associada com a temperatura deste, elevada a quarta potência e corrigida por um coeficiente de emissividade (razão entre a emissividade do corpo e a de um corpo negro) e um fator de proporcionalidade  $\sigma$ , a saber:

$$\text{Energia} = \varepsilon \sigma T_{\text{sup}}^4 \quad \text{Eq. [3]}$$

Em que a energia é aquela emitida pela superfície ( $\text{W.m}^{-2}$ ),  $\varepsilon$  é a emissividade da superfície vegetada (assumida como 0,98),  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann (valor numérico de  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ) e  $T_{\text{sup}}$  é a temperatura da superfície (em  $^{\circ}\text{K}$ ). Com os valores medidos (médias horárias) da temperatura a 1 mm de profundidade é possível estimar esta energia e comparar com as observações.

### **Determinação de Coeficientes de Cultura (Kc)**

Independente se a agricultura irrigada é conduzida de modo contínuo ou suplementar às precipitações, o controle da irrigação é desejável devido a eminente escassez de água no Globo. O conhecimento da Evapotranspiração da cultura é fundamental para o controle da irrigação que em geral é estimada através do produto entre a evapotranspiração potencial ou de referência para gramado e um coeficiente de cultura (Kc), que é variável de acordo com o tipo e o estágio de desenvolvimento da cultura conforme equação (4) Jensen (1968).

$$ETc = ETp \times Kc \quad \text{Eq. [4]}$$

Doorembos & Pruitt (1977) apresentam dados tabelados de Kc para várias culturas, contudo, a definição de coeficientes locais são importantes para a estimativa mais precisa da ETc.

Soma (1999) instalou, na UNITAU, seis lisímetros do tipo lençol freático constante, para o desenvolvimento de sua Tese de Doutorado que visa a determinação do consumo de água da cultura de arroz. Deste modo, a determinação da evapotranspiração de determinada cultura pelo cultivo nestes lisímetros e seu relacionamento com a Evapotranspiração potencial obtidos para a gramairão possibilitar a determinação dos coeficientes de cultura, tão importantes no controle da irrigação.

### **Análise Estatística das Comparações**

As análises estatísticas a serem realizadas podem ser as tradicionais de análise experimental de dados, com comparações entre valores médios (usando-se intervalos de confiança e testes do tipo t-Student), cálculo de viés (bias) no caso de comparações entre estimativas e medidas diretas, determinação entre coeficiente de correlação de duas séries de medidas comparativas, etc. A utilização destas ferramentas matemáticas serão feitas com o uso do computador e planilhas eletrônicas (do tipo EXCEL).

Basicamente pode-se realizar as seguintes comparações:

- a) medidas de lisímetros X estimativas de evapotranspiração (Penman-Monteith e Priestley-Taylor);
- b) medidas de lisímetros X medidas de evaporação de tanque classe A (com e sem nível constante);
- c) medidas de radiação de ondas longas emitida pela superfície X estimativas de emissão usando a temperatura do solo.
- d) Determinação de coeficientes de cultura pelos diferentes métodos de obtenção da Etp.

### **Avaliadores de desempenho**

Em um estudo é sempre difícil a quantificação de desempenho, porém é necessário buscar avaliadores do grau de sucesso ou não. Sendo assim, recomenda-se os seguintes avaliadores de desempenho:

a) coleta de dados diários para estimativas de evapotranspiração:

$$AD1 = 100 \% * (\text{número de dias de dados coletados}) / (\text{número total} = 365 \text{ dias})$$

Deve-se ter como objetivo um valor de AD1 superior a 85%.

b) número de pares (totais diários) de evapotranspiração feita por uma das técnicas (estimativas de Penman-Monteith, Priestley-Taylor, tanque de evaporação classe A com ou sem nível constante, lisímetro de evaporação). Este número de pares (AD2) recomenda-se que seja maior do que 180 (6 meses), sendo distribuídos igualmente nos 4 trimestres de medidas (trimestres primavera - Setembro-Outubro-Novembro, verão – Dezembro-Janeiro-Fevereiro, outono – Março-Abril-Maio e inverno – Junho-Julho-Agosto);

c) medidas de IAF em duas estações para as diversas classes de cobertura vegetal da área de estudo associadas com o mapa de cobertura da terra obtido a partir de técnicas de Sensoriamento Remoto e estimativa da evapotranspiração espacializada por estação (seca e chuvosa);

d) análise do balanço de radiação completo (ondas curtas incidente e refletida, ondas longas da atmosfera e superfície) em pelo menos 40 dias, sendo 10 dias em cada trimestre (primavera, verão, outono e inverno).

e) determinação de coeficientes de cultura Kc das culturas de feijão, arroz e trigo em 330 dias de cultivo.

#### 4. Bibliografia

- ALMEIDA, J. C. R.; ALMEIDA, A. A. S.; ALVARENGA, B. S.; TARGA, M. S. Desempenho de girassol cultivado no período de safrinha em Taubaté-SP. Repositório Eletrônico de Ciências Agrárias, Coleção Ciências Agrônômicas. Taubaté, SP. Universidade de Taubaté.p.1-11. 2011. hdl.handle.net/2315/183.. 2011.
- Brun, L.J., E.T. Kanemasu, e W.L. Powers. 1972. Evapotranspiration from soybean and sorghum fields. *Agron. J.* **64**:145-148.
- Corte, J.F., Gregg, M.H., Targa, M.S., Rudorff, B.F.T., Moreira, M.A. Balanço Hídrico da cultura do trigo no município de Taubaté sob diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio.In: Encontro de Iniciação Científica, 5. Mostra de pós-graduação, 1: Resumos. Taubaté, 16-19 out. 2000. Taubaté: Universidade de Taubaté/PRPPG,. p. 66.
- Corte, J.F., Alvarenga, B.S., Gonçalves, E.A., TARGA, M.S., Almeida, J.C.R.. Balanço hídrico para a irrigação da cultura do girassol em Taubaté-SP. In: Encontro de Iniciação Científica, 5. Mostra de pós-graduação, 1: Resumos. Taubaté, 16-19 out. 2000. Taubaté: Universidade de Taubaté/PRPPG,. p. 60.
- Fisch, G. Caracterização climática e balanço hídrico em Taubaté (SP). *Revista Biociências da UNITAU*, v. 1, n.1, p. 81 – 90, 1995.
- Fisch, G. Distribuição da precipitação em Taubaté, Vale do Paraíba – SP. *Revista Biociências da UNITAU*, v. 5, n. 2, p. 7- 11, 1999.
- Doorembos, J. & Pruitt, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd ed. , Rome, 179p. 1977.
- Gadioli, J.L.e Targa, M.S. Análise de alguns métodos climatológicos para a estimativa da evapotranspiração potencial. In: Reunião Paulista de Iniciação Científica em Ciências Agrárias, 3, Taubaté-SP, 1992. Resumos, Taubaté, Universidade de Taubaté p.2.
- Jensen, M.E. Water consumption by agricultural plants. In: T.T. KOSLOWSKY, Water Deficits and Plant Growth, Vol. 2, Academic Press New York. 1968.
- Kristensen, K.J. 1974. Actual evapotranspiration in relation to leaf area. *Nordic Hydrol.* **5**:173-182.
- Lemos, C.F. e Fisch, G. Análise Espacial dos sistemas frontais que atuam sobre a região do Vale do Paraíba entre 1981-1998. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, Outubro de 2000, Anais CD-ROM, p. 680- 685, 2000.
- LI-COR. LAI-2000 plant canopy analyzer: Instruction Manual. Lincoln, Nebraska: Li-Cor Inc., 1992. 182p.
- Monteith, J.L. Evaporation and environment. *Symposium Society Exploratory Biology*, v. 19, p. 205 – 234, 1965.
- Pereira, A.R., Villa Nova, N.A., Sedyama, G.C. Evapo(transpi)ração. Editora FEALQ, 183 p., 1997.
- Pereira, A.R., Villa Nova, N.A., Sentelhas, P.C. O parâmetro de Priestay-Taylor para estimativa da evapotranspiração de referência na escala mensal. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 5, n. 1, p. 83 – 87, 1997.

- Priestley, C.H.B., Taylor, R.J.. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, v. 100, p.81-92, 1972.
- Ritchie, J.T. e E. Burnett. 1971. Dryland evaporative flux in a subhumid climate: II. Plant influences. *Agron. J.* :-**63**:56-62.
- Rosenberg, N.J., B.L. Blad, e S.B. Verma. 1983. *The biological environment*, 2<sup>a</sup>. Edição. John Wiley and Sons, Nova York, 495 p.
- Rudorff, B.F.T., Moreira, M.A., Freitas, J.G, Targa, M.S. Projeto: Radiometria de campo em trigo submetido a diferentes níveis de irrigação e nitrogênio. Processo FAPESP: 1997/11075-7.
- Running, S.W., R.R. Nemani, L.E. Peterson,. D.F. Potts, L.L. Pierce, e M.A. Spanner. 1989. Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by coupling satellite data with ecosystem simulation. *Ecology*, **70**(4):1090-1101.
- Soares, J.V., A.C. Xavier, e A.C. de Almeida. 2001. Balanço de água em Eucaliptus com a caracterização do dossel por técnicas de Sensoriamento Remoto. Anais em CD-ROM do X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, 21 a 26 de abril de 2001.
- Soma, N.T. Determinação do consumo de água na cultura do arroz por método lisimétrico. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.
- Sousa C. L. de, e Ponzoni F. J. Considerações sobre Transformação de Dados Orbitais para Estimativas do Índice de Área Foliar (IAF). São José dos Campos, INPE, 1996. 4p. 1996.
- Xavier, A.C. Estimativa de propriedades biofísicas de plantações de *Eucaliptus* a partir de dados Landsat-TM. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.