



METER

**TÉCNICA DA INVERSÃO DE
RADIAÇÃO
FOTOSINTETICAMENTE ATIVA
NO CÁLCULO DE ÍNDICE DE
ÁREA FOLIAR**

PROGRAMA

- O que é IAF?
- Para que medir o IAF?
- Como medir o IAF por inversão de RFA?
 - O que é RFA?
 - Parâmetros-chave
- Como funciona na prática
- Vantagens e desvantagens



O QUE É IAF?

O índice de área foliar (IAF) ou LAI – Leaf Area Index, representa a quantidade de material foliar em um dossel. Por definição, é a proporção da área foliar unilateral por unidade de área do solo.

IAF não tem unidade porque é uma proporção de áreas. Ex. 1 significa (1:1), 3 (3:1).

Referências possíveis:

- Ecossistemas desérticos <1
- Florestas tropicais mais densas até 9.
- Florestas de latitudes médias entre 3 e 6
- Milho pode variar de 0 a 6 (todas as fases)

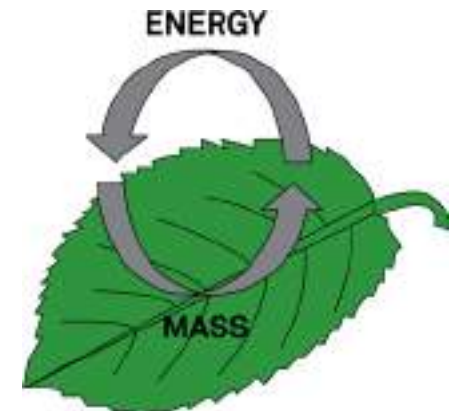


PARA QUE MEDIR O IAF?

Um simples número, mas amplamente conhecido e utilizado

Útil em modelos biogeoquímicos, hidrológicos e ecológicos porque muitas das trocas de massa e energia da biosfera-atmosfera ocorrem na superfície da folha (interceptação de radiação, conversão de energia, troca gasosa, interceptação de precipitação e evapotranspiração).

Também como medida de cultivo, crescimento e produtividade.

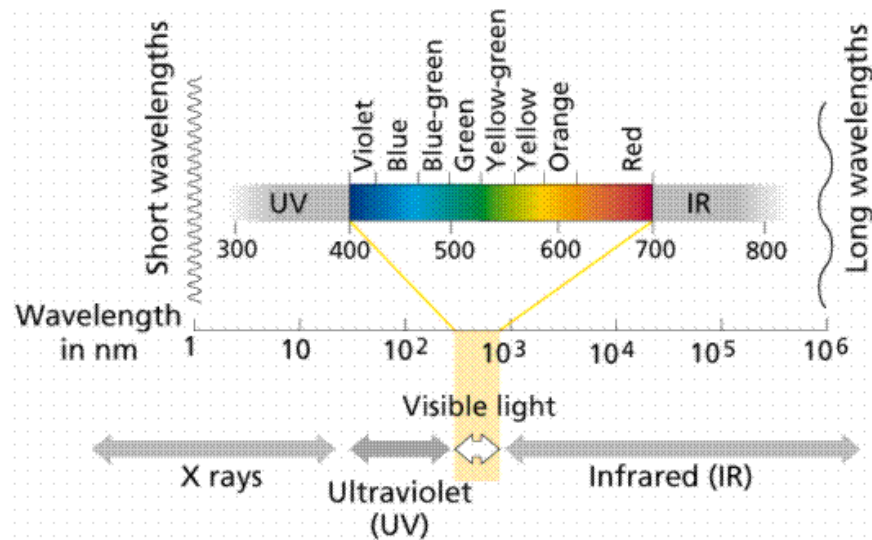


COMO MEDIR O IAF?

- Método direto
- Escaneamento
- Foto hemisférica
- Inversão de RFA (transmitância de radiação)



O QUE É O RFA?



Espectro Eletromagnético

- RFA (PAR em inglês) - Acrônimo para Radiação Fotossinteticamente Ativa
- Definida como a luz na faixa que vai de 400 a 700 nm (amplitude visível)
- Faixa utilizada pelas plantas para fotossíntese
- Unidade comum: $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, medida de densidade de fluxo de fótons

PARA QUE MEDIR O RFA?

Neste caso, usar na estimativa do IAF

Fotossíntese x Radiação

A luz varia nas copas tanto espacial quanto temporalmente

O nível médio de luz diminui mais ou menos exponencialmente para baixo através do dossel, conforme a quantidade de superfície foliar encontrada aumenta.

RFA também pode ser interceptado por partes não fotossintéticas de plantas (cascas, flores, etc).

As folhas verticais absorvem menos radiação quando o sol está em um ângulo alto e mais radiação quando o sol está em um ângulo baixo; o inverso é verdadeiro para folhas horizontais.

Folhas horizontais costumam ter IAF menor que folhas mais verticais.

TRANSMITÂNCIA DE RADIAÇÃO

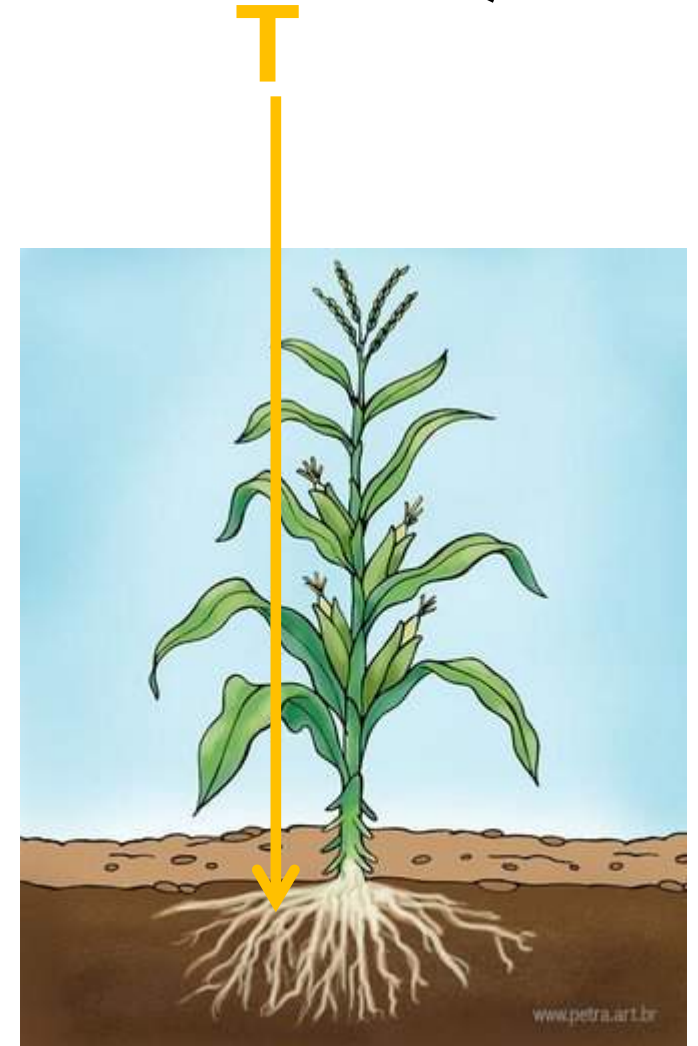
Transmitida

Baixo IAF → Alta transmissão de luz

Alto IAF → Baixa transmissão de luz

Exemplo de instrumento: AccuPAR LP-80

A Lei de Beer fornece a base teórica para essa relação (para efeitos de biofísica ambiental)



INVERSÃO DE RFA

$$PAR_t = PAR_i \exp(-kz)$$

Onde:

PAR_t é a radiação fotossinteticamente ativa transmitida (RFA) medida perto da superfície do solo

PAR_i é a RFA que é incidente no topo do dossel,

z é o comprimento do caminho dos fótons através de algum meio atenuante (aqui é o responsável pelo IAF)

k é o coeficiente de extinção

Se conhecermos k e medirmos PAR_t e PAR_i , invertemos para calcular z .

Na prática é mais complexo, então outros parâmetros precisam ser considerados.



INVERSÃO NO LP-80

O LP-80 usa uma versão modificada do modelo de difusão e transmissão de luz desenvolvido por Norman e Jarvis (1975). Cinco variáveis-chave usadas como entradas.

LP-80 LAI model

$$L = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K}\right) f_b - 1 \right] \ln \tau}{A(1 - 0.47 f_b)}$$

Extinction coefficient model

$$K = \frac{\sqrt{\chi^2 + \tan^2 \theta}}{\chi + 1.744 (\chi + 1.182)^{-0.733}}$$



INVERSÃO DE RFA

LP-80 LAI model

$$L = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K}\right) f_b - 1 \right] \ln \tau}{A(1 - 0.47 f_b)}$$

Extinction coefficient model

$$K = \frac{\sqrt{\chi^2 + \tan^2 \theta}}{\chi + 1.744 (\chi + 1.182)^{-0.733}}$$

- τ - Abaixo/acima – Leituras de RFA
- Z (ou θ) - Ângulo Zenital do Sol
- F_b - Fração de Radiação Direta
- χ - Parâmetro de Distribuição Foliar
- K – Coeficiente de Extinção



1) TAU – COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO DO DOSSEL

τ (razão de RFA transmitida e incidente): calculada usando medições de RFA transmitida perto da superfície do solo e PAR incidente acima do dossel.

IAF baixo → a maior parte da radiação incidente é transmitida através do dossel em vez de ser absorvida ou refletida, portanto, τ será próximo de 1.

IAF alto → aumento na quantidade de luz absorvida, e uma proporção decrescente de luz será transmitida à superfície do solo.

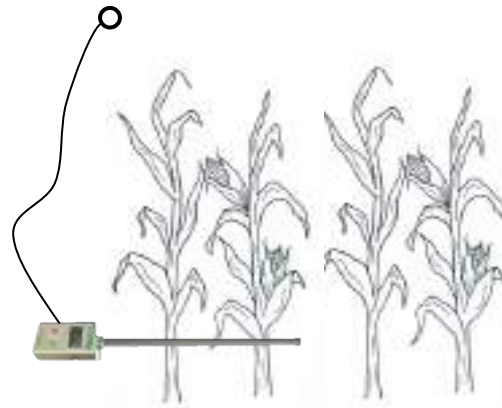
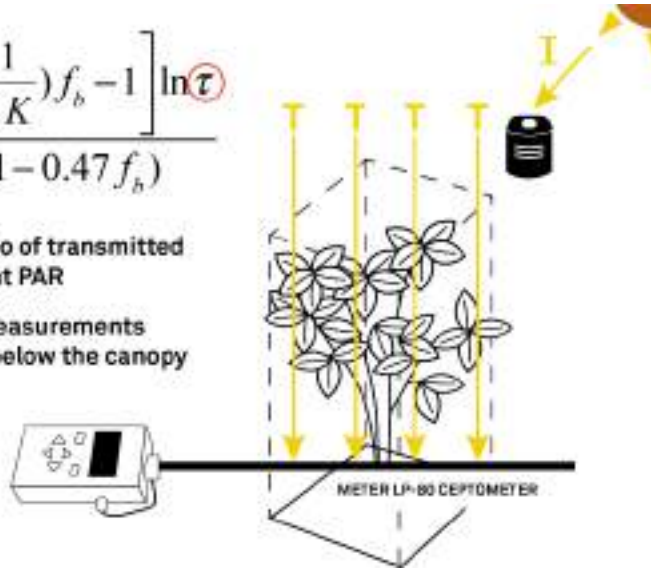
$$\text{TAU} = \frac{\text{RFA abaixo}}{\text{RFA Incidente}}$$



RFA INCIDENTE E TRANSMITIDA

$$L = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K}\right) f_b - 1 \right] \ln \tau}{A(1 - 0.47 f_b)}$$

- τ is the ratio of transmitted and incident PAR
- Requires measurements above and below the canopy

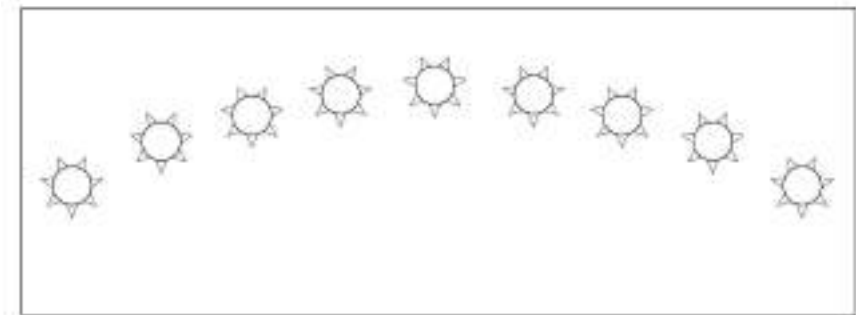
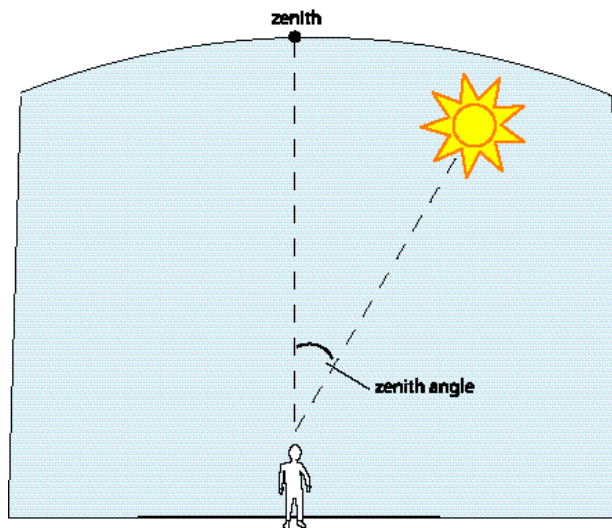


2) θ - ÂNGULO ZENITAL

θ é a elevação angular do sol no céu em relação ao zênite, ou o ponto diretamente sobre sua cabeça, em qualquer hora, data e localização geográfica .

Importante para descrever o comprimento do caminho dos fótons através do dossel (por exemplo, maior se o sol se aproxima do horizonte) e para determinar a interação entre a radiação do feixe e a orientação da folha .

Importante saber local, data e hora



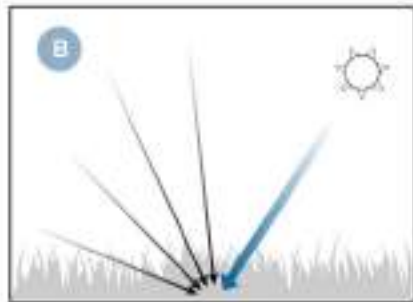
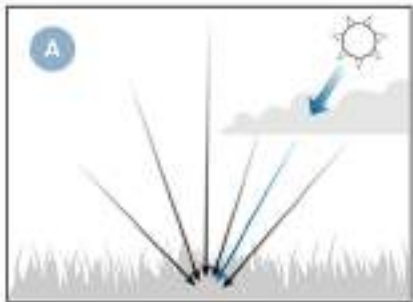
3) F_B – FRAÇÃO DE RADIAÇÃO DIRETA

Quando o céu está claro, a maior parte da radiação vem como um feixe direto do sol

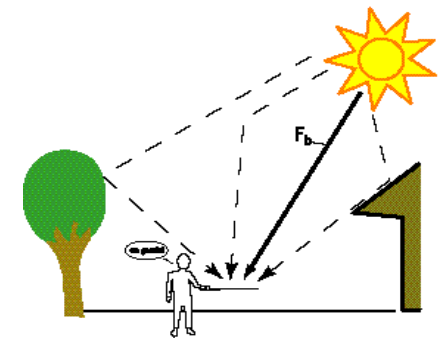
Na presença de nuvens ou neblina, no entanto, parte da radiação do feixe é espalhada por vapor d'água e aerossóis na atmosfera (radiação difusa).

f_b é a razão entre a radiação vinda direta do sol e a radiação vinda de todas as fontes (atmosfera ou refletida). Pode ser calculado comparando os valores medidos do RFA incidente com a constante solar, que é um valor conhecido da energia da luz do sol (assumindo condições de céu claro) em qualquer momento e local da superfície terrestre.

Em dias nublados, esta variável pode ser removida da equação.



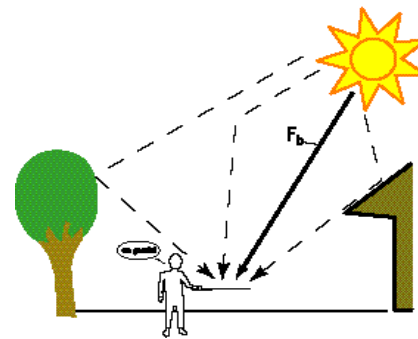
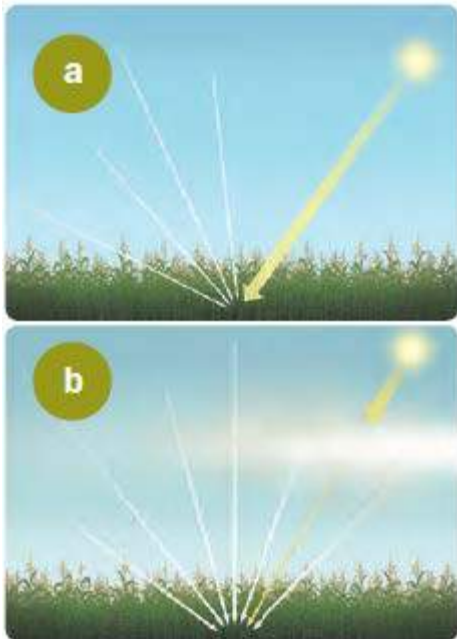
$$L = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K}\right) f_b - 1 \right] \ln \tau}{A(1 - 0.47 f_b)}$$



CÁLCULO DA FRAÇÃO DIRETA

A radiação pode vir diretamente do feixe solar ou ser espalhada do céu ou das nuvens.

Arquitetura do dossel recebe estas radiações de forma diferente, por isso é importante separar no modelo.



CÁLCULO DA FRAÇÃO DIRETA

AccuPAR - Modificado de Spitters et al. (1986) - correlaciona a fração de feixe com a razão entre a radiação total global medida e a potencial em uma superfície horizontal fora da atmosfera da Terra.

A medição acima do dossel de RFA com o AccuPAR é o valor RFA global total. Uma vez que a latitude e a hora do dia são conhecidas, o RFA potencial (RFA em uma superfície horizontal fora da atmosfera da Terra) pode ser calculado.

- Ângulo zenital
- Leitura acima do dossel

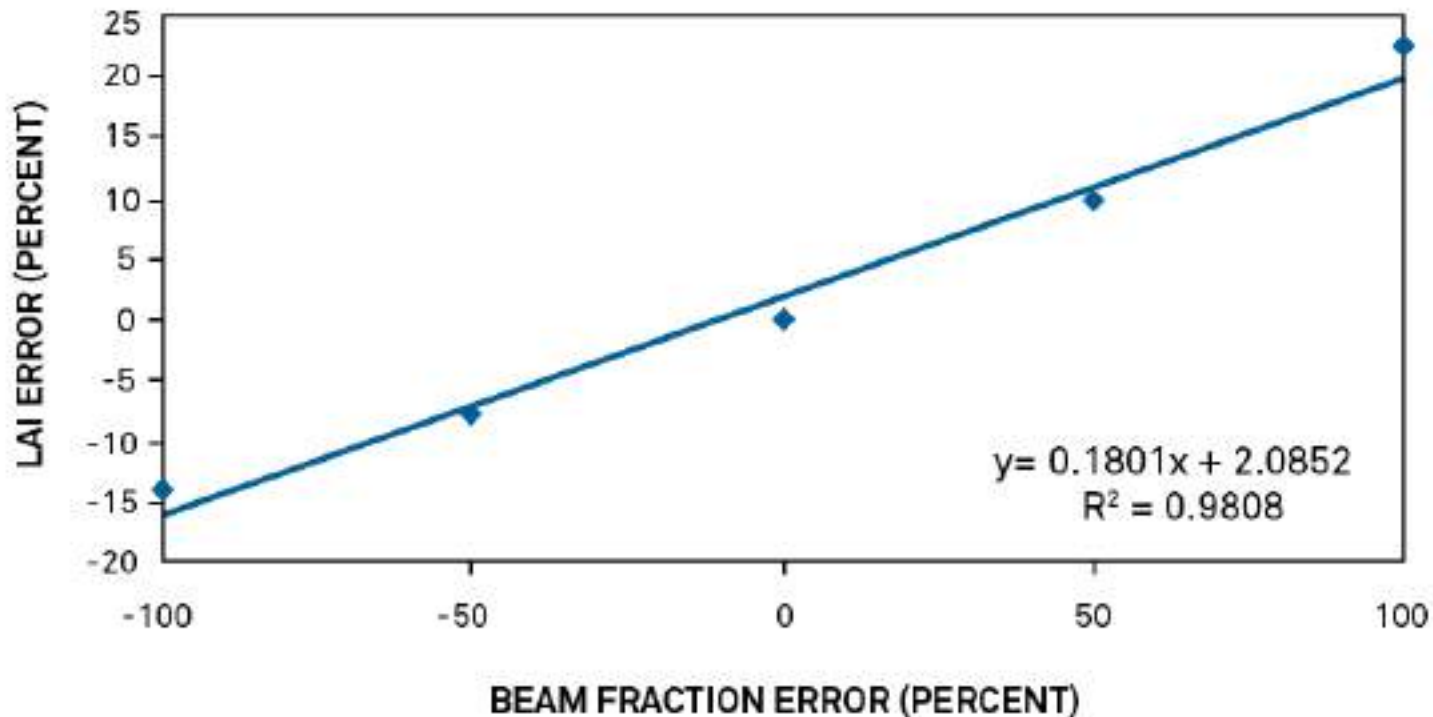


ERRO DA FRAÇÃO DIRETA

Fração constante do feixe de 0,4

Ângulo zenital de 30 graus (ângulos zenitais maiores têm erros menores)

Erros de cálculo de Fb de 10 a 20% introduz no cálculo do IAF erro na faixa de 2 a 4%



4) χ – PARÂMETRO DE DISTRIBUIÇÃO ANGULAR DA FOLHA

Descreve a projeção da área da folha em uma superfície.

Relação com quanto de luz é absorvida ao longo do dia.

Folhas de orientação misturada: distribuição esférica, $\chi = 1$.

Folhas de orientações predominantemente horizontais, como morangos, têm valores $\chi > 1$

Folhas com orientações predominantemente verticais, como algumas gramíneas, têm valores $\chi < 1$.

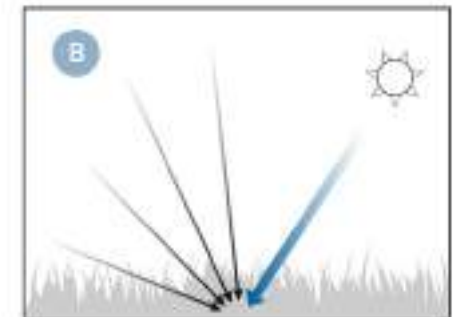
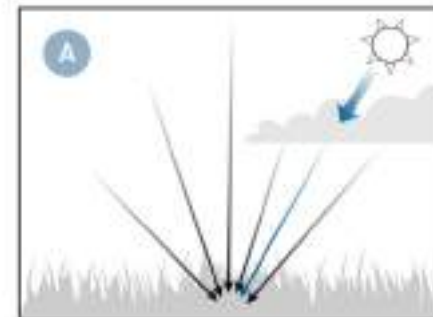
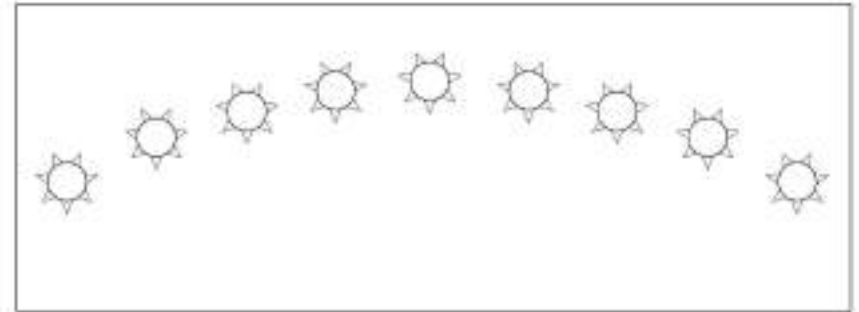
Não influencia tanto na técnica de inversão, principalmente em condições de céu coberto. (Garrigues et al., 2008).



4) χ – PARÂMETRO DE DISTRIBUIÇÃO ANGULAR DA FOLHA

$$K = \frac{\sqrt{\chi^2 + \tan^2 \theta}}{(\chi + 1.744)(\chi + 1.182)^{-0.733}}$$

χ = leaf angle distribution



4) χ – PARÂMETRO DE DISTRIBUIÇÃO ANGULAR DA FOLHA



Dossel vertical
 $\chi = 0,5$
(cebolas)



Dossel esferóide
 $\chi = 1$
(maioria dos dosséis)



Dossel horizontal
 $\chi = 3$
(morangos)



VARIABILIDADE DOS DOSSÉIS

Além do esférico, podemos ter dosséis mais horizontais ($x > 1$) ou verticais ($x < 1$)

Valores podem variar entre espécies e fases, portanto é importante saber calculá-lo.

X é difícil de estimar exatamente, mas pode não influenciar tanto no cálculo do IAF.

Cultura	χ	Cultura	χ
Azevém	0.67 à 2.47	Colza	1.92 à 2.13
Milho	0.76 à 2.52	Pepino	2.17
Centeio	0.80 à 1.27	Tabaco	1.29 à 2.22
Trigo	0.96	Batata	1.70 à 2.47
Cevada	1.2	Fava-de-cavalo	1.81 à 2.17
Rabo-de-gato	1.13	Girassol	1.81 à 2.31
Sorgo	1.43	Trevo branco	2.47 à 3.26
Alfafa	1.54	Morango	3.03
Beterraba Sacarina	1.46 à 1.88	Alcachofra Jerusalem	2.16



ESTIMAR χ

Separar uma porção representativa do dossel de mesma profundidade e largura.

Determinar τ_0 – porcentagem de luz/sombra vista verticalmente através da porção

Determinar τ_{90} – porcentagem de luz vista horizontalmente através da porção

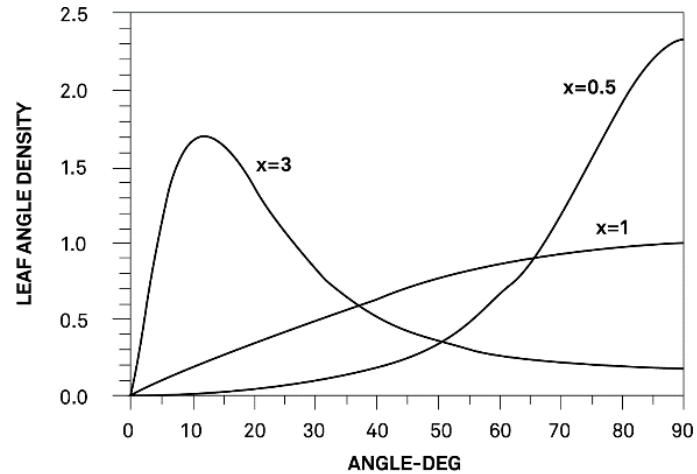
$$\chi = \left[\frac{\ln(\tau_0)}{\ln(\tau_{90})} \right]$$

Usar um painel (pode ser de 1m x 1m) para analisar a luz que atravessa o dossel – a porção representativa) horizontal e verticalmente.

Não se preocupar em ser exato!!



COMPREENSÃO DO X



VERTICAL CANOPIES

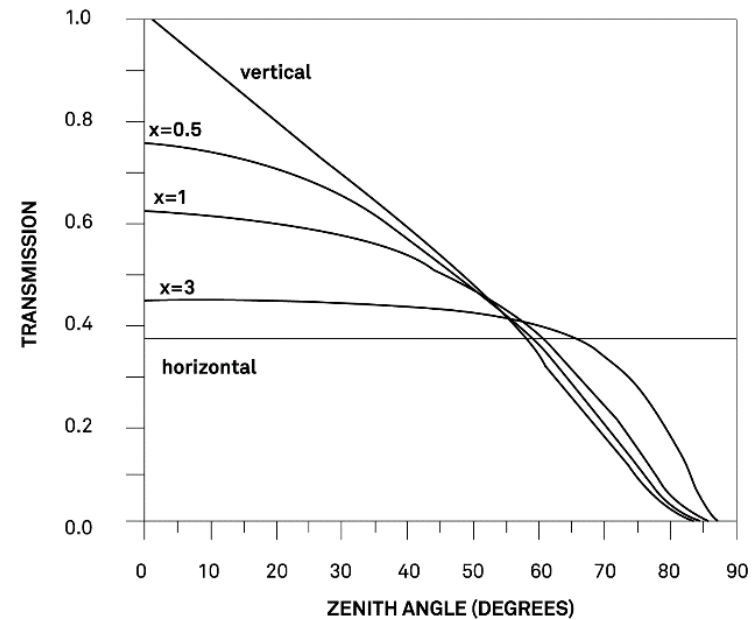
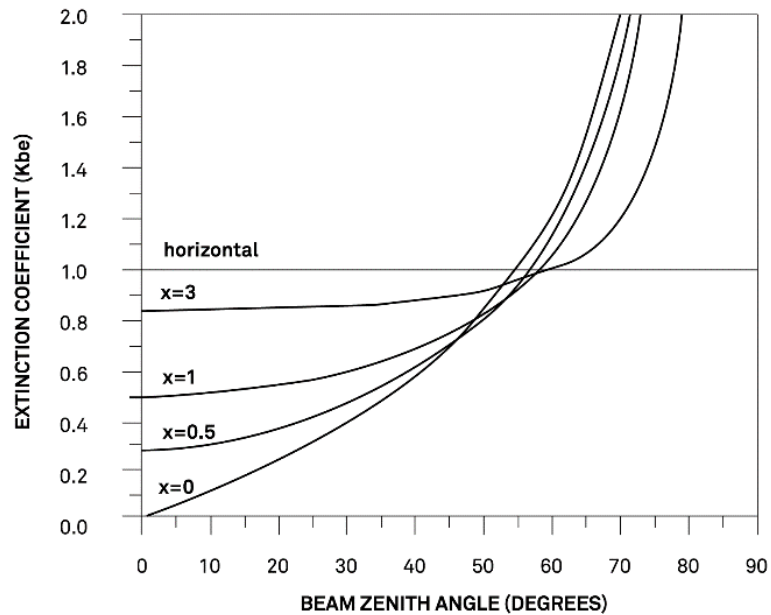
$$\chi < 1$$

SPHERICAL CANOPIES

$$\chi \approx 1$$

HORIZONTAL CANOPIES

$$\chi \rightarrow \infty$$



5) K – COEFICIENTE DE EXTINÇÃO

O coeficiente de extinção do dossel, K, descreve quanta radiação é absorvida pelo dossel em um dado ângulo zenital solar e parâmetro χ .

Para a estimativa do IAF, é suficiente saber que a probabilidade de um fóton ser interceptado por uma folha depende do ângulo do feixe de luz e o posicionamento das folhas.

$$K = \frac{\sqrt{\chi^2 + \tan^2 \theta}}{\chi + 1.744 (\chi + 1.182)^{-0.733}}$$

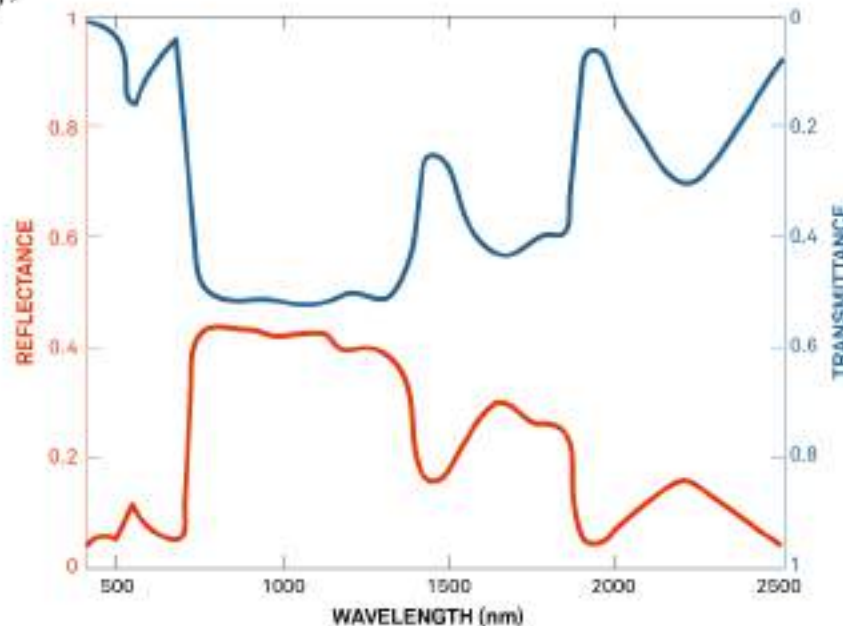


6) A – ABSORÇÃO FOLIAR DO RFA

$$L = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K}\right) f_b - 1 \right] \ln \tau}{A(1 - 0.47 f_b)}$$

A = leaf PAR absorptance

- 0.9 is a good estimate for most canopies
- May change in extreme cases (very young or senescent leaves)



0,9 é uma boa aproximação para folhas maduras e saudáveis

Em casos extremos (por exemplo, folhas extremamente jovens, folhas altamente pubescentes ou cerosas, folhas senescentes), A pode desviar-se de 0,9.



INVERSÃO DO RFA

$$L = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K} \right) f_b - 1 \right] \ln \tau}{A(1 - 0.047 f_b)}$$

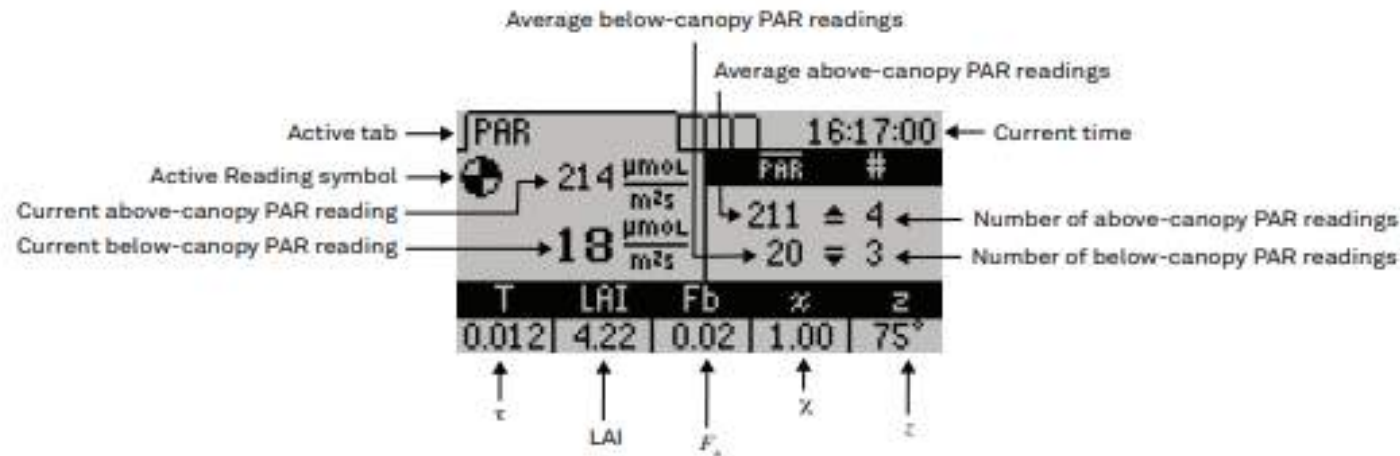


NA PRÁTICA

- Configurar: data, hora, latitude e longitude
- Definir χ
- Tirar leituras acima e abaixo do dossel



INFORMAÇÕES CALCULADAS

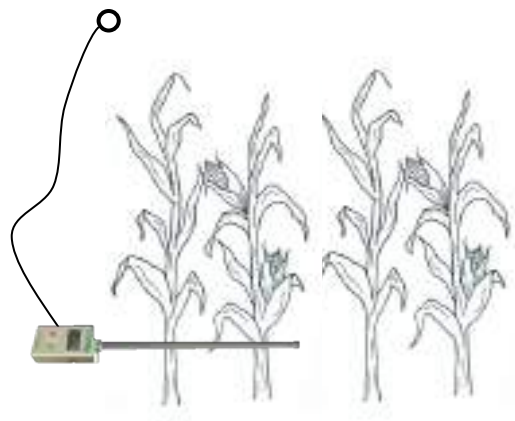


TÉCNICA PARA COPAS BAIXAS

Ex: plantações de cereais, pastagens

Orientação: uso do sensor externo para referência atualizada, pode ser usado um tripé

Se for mais baixo e fácil, a própria barra pode ser usada



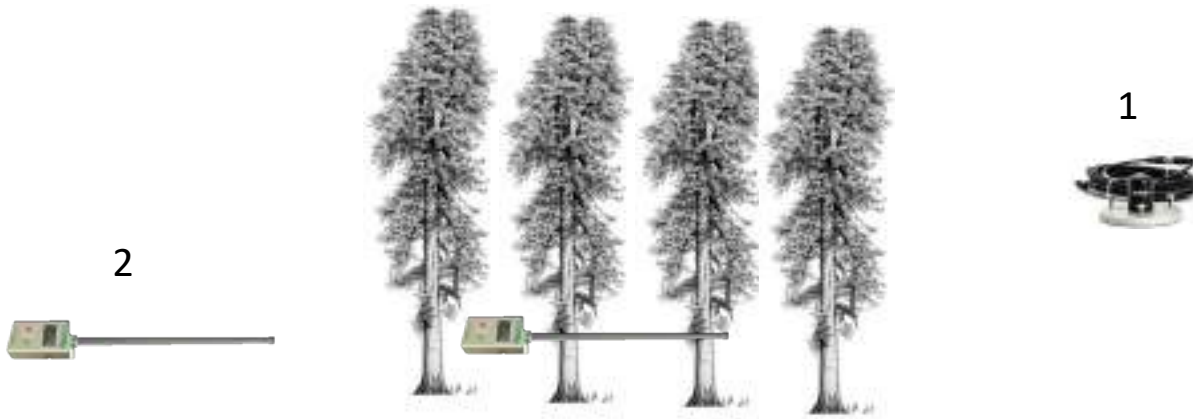
TÉCNICA PARA COPAS ALTAS

Ex. florestas

Dificuldade: medir a radiação incidente acima do dossel

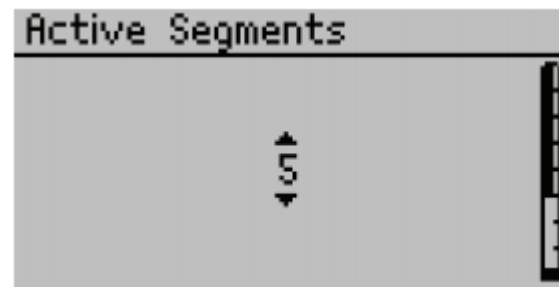
Alternativas:

- 1) Sensor RFA imóvel em clareira ou fora do dossel – requer pós-processamento dos dados
- 2) Usar o ceptômetro fora do dossel para registrar a incidente e depois entrar para tirar as leituras transmitidas



PLANTAS ISOLADAS OU MENORES

Seleção de segmentos ativos



AMOSTRAGEM E AGLOMERAÇÃO

Dosséis não são homogêneos no espaço (culturas em linha, bosques menos densos)

Causas: espaçamento artificial ou natural, características de ramificação, arranjo de folhas

Efeito: pontos no dossel com maior ou menor densidade de folhas

Solução: Usar coletores de radiação maiores (com vários sensores); adequar o número de amostragem (Lang e Yueqin, 1986)

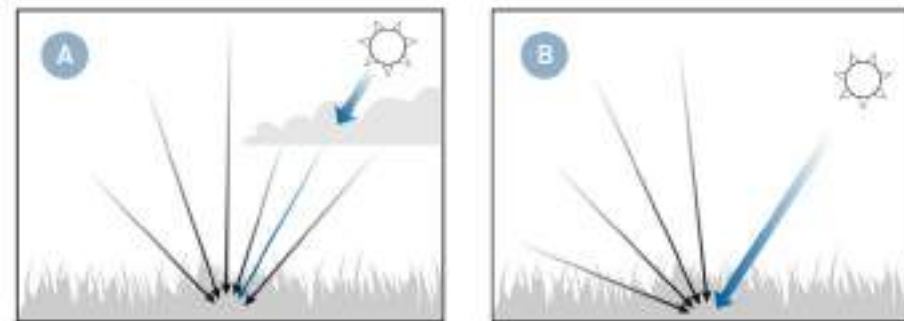
Em geral, dosséis mais heterogêneos exigirão mais medições de IAF no espaço para obter um valor que seja representativo de todo o dossel.



CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS

Pode ler em condições diferentes desde que:

- Considere mudanças na fração direta (difusa e direta)
- Considere o ângulo zenital (θ)
- Meça instantaneamente a radiação incidente e a transmitida
- Se céu aberto, cuidar com χ



ELEMENTOS NÃO FOTOSSINTÉTICOS

Todos os elementos sombreiam – folhas ou galhos

Alguns interpretam como PAI (plant area index), mas PAI e LAI geralmente não são muito diferentes porque:

- Área da folha é geralmente maior
- A folha sombreia os galhos (Kucharik et al., 1998).

Em ecossistemas decíduos, dá para separar as componentes (medindo na época de desfolha)



USO EM AGRICULTURA

Gerenciamento de irrigação

Decisão de ligar ou desligar a irrigação com base na água aplicada, capacidade de armazenamento do solo e a demanda evaporativa

$ET_c = ET_o \times K_c$ (coeficiente de cultura)

K_c é diretamente proporcional à radiação interceptada, que o ceptômetro mede

Outros fatores influenciam mas a interceptação se mostra mais importante, até 85% da variação do K_c (L.E. Williams, 2001; Johnson, 2000).



INVERSÃO DE RFA



- Não-destrutivo
- Preciso
- Relativamente barato
- Não consome muito tempo
- Instrumentos leves



- Precisa de leituras acima e abaixo do dossel simultaneamente em dias parcialmente nublados
- Dosséis altos podem ser problemáticos para atualizar os dados de RFA acima do dossel
- Alta densidade pode perder sensibilidade

PUBLICAÇÕES

- Anapalli, Saseendran S., Daniel K. Fisher, Srinivasa Rao Pinnamaneni, and Krishna N. Reddy. “Quantifying **evapotranspiration** and **crop coefficients** for **cotton** (*Gossypium hirsutum* L.) using an eddy covariance approach.” *Agricultural Water Management* 233 (2020): 106091. ([Article link](#)).
- Chang, Christine Y., Luis Guanter, Christian Frankenberg, Philipp Köhler, Lianhong Gu, Troy S. Magney, Katja Grossmann, and Ying Sun. “Systematic assessment of retrieval methods for canopy far-red solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) using high-frequency automated field spectroscopy.” *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2020): e2019JG005533. ([Article link](#)).
- Shao, Liping, Gang Li, Qiannan Zhao, Yabing Li, Yutong Sun, Weinan Wang, Chuang Cai et al. “The **fertilization effect** of global dimming on **crop yields** is not attributed to an improved light interception.” *Global Change Biology* 26, no. 3 (2020): 1697-1713. ([Article link](#)).
- Alam, Muhammad Shahinur, David W. Lamb, and Muhammad Moshir Rahman. “In-situ partitioning of evaporation and transpiration components using a portable evapotranspiration dome—A case study in Tall Fescue (*Festuca arundinacea*).” *Agricultural Water Management* 213 (2019): 352-357. ([Article link](#)).
- Bogie, N. A., R. Bayala, I. Diedhiou, R. P. Dick, and T. A. Ghezzehei. “Intercropping with two native woody shrubs improves water status and **development** of interplanted groundnut and pearl millet in the Sahel.” *Plant and Soil* 435, no. 1-2 (2019): 143-159. ([Article link](#)).
- Carter, David R., Robert A. Slesak, Timothy B. Harrington, and Anthony W. D’Amato. “Effects of irrigation and phosphorus fertilization on physiology, growth, and nitrogen-accumulation of Scotch broom (*Cytisus scoparius*).” *Plant Physiology Reports* 24, no. 3 (2019): 410-421. ([Article link](#)).
- Carter, David R., Robert A. Slesak, Timothy B. Harrington, and Anthony W. D’Amato. “Comparative effects of soil resource availability on **physiology and growth** of Scotch broom (*Cytisus scoparius*) and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) seedlings.” *Forest Ecology and Management* 453 (2019): 117580. ([Article link](#)).
- Comas, Louise H., Thomas J. Trout, Kendall C. DeJonge, Huihui Zhang, and Sean M. Gleason. “Water productivity under strategic growth stage-based deficit irrigation in **maize**.” *Agricultural Water Management* 212 (2019): 433-440. ([Article link](#)).
- Nogueira, Carla, Christiane Werner, Ana Rodrigues, and Maria C. Caldeira. “A prolonged dry season and nitrogen deposition interactively affect CO₂ fluxes in an annual Mediterranean grassland.” *Science of The Total Environment* 654 (2019): 978-986. ([Article link](#)).
- Sonkar, Ickkshaanshu, Hari Prasad Kotnoor, and Sumit Sen. “Estimation of root water uptake and soil hydraulic parameters from root zone soil moisture and deep percolation.” *Agricultural Water Management* 222 (2019): 38-47. ([Article link](#)).
- Anapalli, Saseendran S., Timothy R. Green, Krishna N. Reddy, Prasanna H. Gowda, Ruixiu Sui, Daniel K. Fisher, Jerry E. Moorhead, and Gary W. Marek. “Application of an energy balance method for estimating **evapotranspiration** in **cropping systems**.” *Agricultural Water Management* 204 (2018): 107-117. ([Article link](#)).
- Fahey, Catherine, Christine Angelini, and S. Luke Flory. “Grass invasion and drought interact to alter the diversity and structure of native plant communities.” *Ecology* 99, no. 12 (2018): 2692-2702. ([Article link](#)).



GRATIDÃO
E FIQUEM BEM!

DÚVIDAS?

Tel: (12) 3307-1003 – Ramal 32
E-mail: agraria@metergroup.com
Site: www.metergroup.com.br



Você sabia?

Washington State University disponibiliza videoaulas em Física Ambiental!

Acesso aqui: environmentalbiophysics.org/environmental-biophysics-lectures/

PRÓXIMO SEMINÁRIO

Técnica da Inversão de Radiação Fotossinteticamente Ativa no Cálculo de Índice de Área Foliar

10hs até 11hs | 21-MAR-2021 (quarta-feira)



Você sabia

QUE O STATUS HÍDRICO DA PLANTA PODE SER ACESSADO PELA SUA ATIVIDADE ESTOMÁTICA?

www.youtube.com/MeterGroupLatam

Acompanhe nossas redes sociais



[instagram.com/metergrouplatam](https://www.instagram.com/metergrouplatam)



[youtube.com/metergrouplatam](https://www.youtube.com/metergrouplatam)



[facebook.com/metergroupbr/](https://www.facebook.com/metergroupbr/)



[linkedin.com/company/metergrouplatam](https://www.linkedin.com/company/metergrouplatam)



twitter.com/metergrouplatam

COMO OS SENSORES DE UMIDADE PODEM AJUDAR NO MONITORAMENTO DA ÁGUA NO SOLO?

METER

VOCÊ SABIA?

Que capacidade de campo do solo não é a mesma coisa que solo saturado?