

Monitoramento

Irrigação deve maximizar eficiência no uso da água para garantir produtividade

Durval Dourado Neto, Quirijn de Jong van Lier, Klaus Reichardt e Marco Antonio Tavares Rodrigues*



RODRIGO ALMEIDA

Independentemente do ambiente de produção e da tecnologia utilizada, manejo da água é fundamental para otimização dos recursos naturais e absorção de nutrientes

A cultura de milho é explorada nos mais diversos ambientes— são cerca de 170 milhões de ha, no mundo —, estando cerca de 95% da sua produção nos seguintes países: Estados Unidos (principal produtor), China (principal consumidor), Brasil (terceiro produtor), Argentina, Índia, Indonésia, Ucrânia, México (país de origem do milho), França, África do Sul, Nigéria, Etiópia, Canadá, Tanzânia, Filipinas, Paquistão, Quênia, Malavi, Romênia e Zâmbia, segundo a Food and Agriculture Organization (FAO/ONU) (Allen et al., 1998). Estima-se que a área irrigada internacional pode ter atingido 270 milhões de ha (cerca de 2% no Brasil) e que a irrigável é de aproximadamente 295 milhões de ha (cerca de 10% no Brasil) (Allen et al., 1998). E, ainda, que a área semeada de milho no Brasil, nas safras de inverno (5%) (agricultura irrigada), verão (primeira safra) (38%) e outono (segunda safra) (57%) tenha sido de quase 16 milhões de ha na safra 2013/14 (Allen et al., 1998).

A produtividade do milho depende de uma série de fatores: em primeiro lugar, a adequação do genótipo, sendo que o híbrido simples apresenta o melhor desempenho. Em segundo lugar, menciona-se o ambiente físico de produção, incluindo os fatores que, juntamente com o genótipo, definem a taxa de assimilação de CO_2 e a produtividade potencial, quais sejam: a disponibilidade de radiação fotossinteticamente ativa, fotoperíodo, temperatura e teor de dióxido de carbono na atmosfera. A produtividade real, na prática, é menor do que a potencial, devido a fatores como: indisponibilidade de nutrientes e água, definição da densidade de população das plantas (Figura 1), e a presença de fatores bióticos deplecionadores de produtividade (plantas daninhas, doenças e pragas).

Independentemente do ambiente de produção e da tecnologia utilizada, o manejo da água é fundamental tanto para a otimização dos recursos naturais (a absorção de todos nutrientes está

relacionada à água) quanto dos insumos, nos quais o carbono, o oxigênio e o hidrogênio representam cerca de 96% da massa de matéria seca e mais de 99% da massa da matéria fresca da planta de milho. Carbono, oxigênio e hidrogênio são oriundos da água (do solo) e do dióxido de carbono (da atmosfera), pelo processo da fotossíntese.

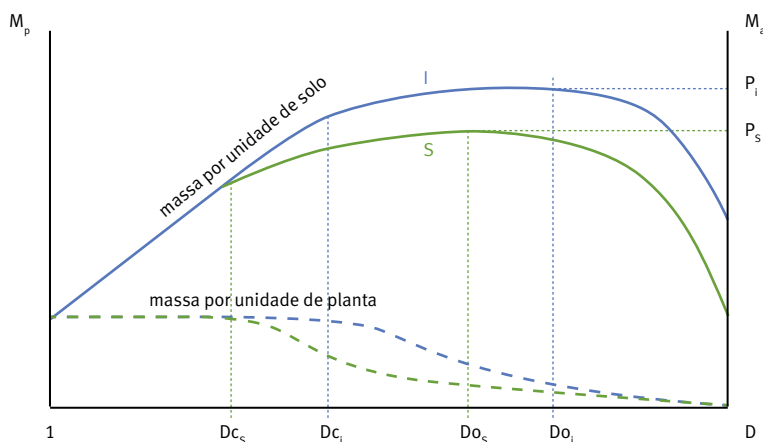
FENOLOGIA

O conhecimento dos estádios fenológicos da cultura de milho é de fundamental importância para seu manejo, especialmente no que diz respeito ao uso consuntivo de água, que afeta o manejo da irrigação. A fase mais sensível ao estresse (abiótico — falta ou excesso de água e/ou alta ou baixa temperatura — ou biótico) ocorre durante o pré-florescimento e o pós-florescimento, porque coincide a máxima evapotranspiração (quando ocorre o máximo índice de área foliar) com a máxima sensibilidade à falta de água, devido à inversão do dreno fisiológico de forma abrupta (na partição de carbono, os órgãos raiz, folha e colmo deixam de ser fortes drenos fisiológicos no final da fase vegetativa; já os órgãos reprodutivos passam a ser fortes drenos fisiológicos no início da fase reprodutiva).

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA

Alguns parâmetros físico-hídricos do solo são importantes para o entendimento do manejo da irrigação. Tem-se o conteúdo de água do solo (também denominado umidade ou teor de água), que pode ser expresso à base de massa (u , kg kg^{-1}) e, neste caso, é dado pela massa de água (m_w , kg), dividida pela massa do solo seco (m_s , kg). Alternativamente, o conteúdo de água no solo pode ser expresso à base de volume (θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), sendo, nesse caso, o volume de água do solo (V_w , m^3) normalmente determinado por meio de sua massa, dividido pelo volume de solo (V , m^3), tomado como o volume do anel coletor quando se trata de uma determinação direta, por amostragem.

FIGURA 1 | MASSA POR UNIDADE DE PLANTA (M_p , KG PLANTA^{-1}) E POR UNIDADE DE ÁREA (M_a , KG HA^{-1}), EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DE POPULAÇÃO (D , PLANTAS HA^{-1})*



* Mostra a definição da densidade crítica e ótima para agricultura de sequeiro (S) (Dc_s e Do_s) e para agricultura irrigada (I) (Dc_i e Do_i), e a densidade ótima corresponde à produtividade máxima (P_i e P_s).

Fonte: Dourado Neto et al., 2015.

FREEMAGES / LOTUS HEAD



Manejo da irrigação pode ser feito com base na observação do estado hídrico do solo, ou, alternativamente, pela estimativa da evapotranspiração potencial da cultura

TABELA 1 | EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DO COEFICIENTE DE CULTURA (Kc), NAS DIFERENTES FASES FENOLÓGICAS DA CULTURA DO MILHO*

FASE	TEMPO APÓS SEMEADURA (d)	COEFICIENTE DE CULTURA (Kc)
A	$0 \leq t < 15$	$Kc_i = Kc_A$
A/B	$15 \leq t < 45$	$Kc_i = Kc_B - \frac{(Kc_B - Kc_A)}{30} (45 - t)$
B	$45 \leq t < 60$	$Kc_i = Kc_B$
B/C	$60 \leq t < 90$	$Kc_i = Kc_C - \frac{(Kc_C - Kc_B)}{30} (90 - t)$
C	$90 \leq t \leq 120$	$Kc_i = Kc_C$
A	Período de estabelecimento da cultura de milho, que inicia na semeadura	
B	Período de florescimento da cultura de milho (máxima evapotranspiração potencial da cultura – ETC – e máxima sensibilidade à deficiência hídrica – DH)	
C	Período de secagem do grão no campo, que se inicia no ponto de maturidade fisiológica e termina na colheita	

* Fases A, A/B, B, B/C e C, fases fenológicas entre os instantes t_0 e t_1 , t_1 e t_2 , t_2 e t_3 , t_3 e t_4 , t_4 e t_5 – tempo após a semeadura, respectivamente.

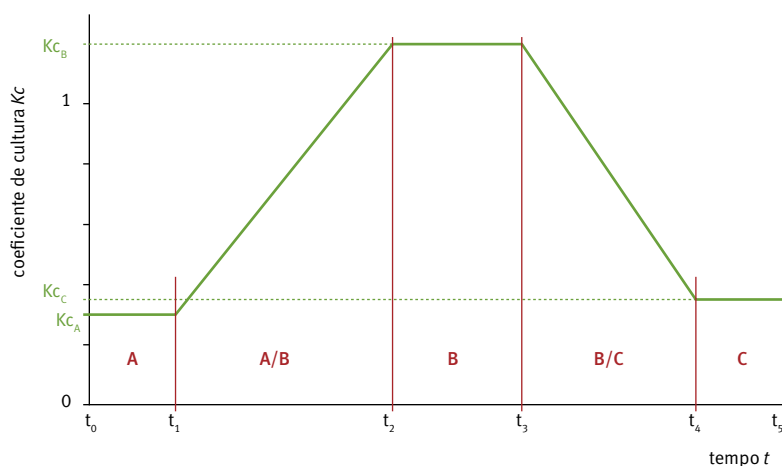
Fonte: Allen et al., 1998.

O volume total de poros no solo V_p é igual à soma do volume de água V_w e do volume de ar V_a . A relação entre esses volumes é de importância, na irrigação, uma vez que promove um aumento de V_w e, conseqüentemente, diminuição do volume de ar V_a .

A porosidade total do solo (P , $m^3 m^{-3}$) pode ser calculada em função da massa específica do solo (ρ , $kg m^{-3}$) e dos sólidos do solo (ρ_s , $kg m^{-3}$) pela expressão $P = (1 - \rho / \rho_s)$. P equivale ao conteúdo de água no solo na saturação θ_s ($m^3 m^{-3}$) quando todos os poros estão cheios de água. Para o manejo da irrigação, os conceitos de capacidade de campo CC (θ_{cc} , $m^3 m^{-3}$) e ponto de murcha permanente PMP (θ_{pmp} , $m^3 m^{-3}$) são fundamentais. Representam, respectivamente, os limites superior e inferior da água disponível às plantas, definindo a capacidade de água disponível (CAD, $m^3 m^{-3}$).

$$CAD = 10 (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) Z_e, \quad (1)$$

FIGURA 2 | FUNÇÃO LINEAR EM TRECHO UTILIZADO PARA DESCREVER O COEFICIENTE DE CULTURA (K_c), NAS DIFERENTES FASES FENOLÓGICAS DA CULTURA DE MILHO*



* A, A/B, B, B/C e C – fases fenológicas definidas em função dos tempos t_0 (0 dias = semeadura), t_1 (15 dias), t_2 (45 dias), t_3 (60 dias), t_4 (90 dias) e t_5 (120 dias).

Fonte: Allen et al., 1998.

em que Z_e é a profundidade (cm) efetiva do sistema radicular e o fator 10 representa a conversão entre as unidades mm e cm. Z_e é definida como a profundidade do solo que, considerando todas as raízes presentes entre a superfície e Z_e , contribui com 90% da evapotranspiração potencial da cultura durante o período após o florescimento, em que coincide a máxima demanda por água com a máxima sensibilidade à deficiência hídrica. A determinação pode ser feita medindo a evapotranspiração do milho, no estágio citado e em condições ótimas de água no solo.

Presume-se que a água entre θ_s e θ_{cc} é perdida por drenagem e que valores de θ menores que θ_{pmp} representam a água não extraível pelas plantas. Na prática da agricultura irrigada, é comum considerar a CC correspondente a um determinado potencial matricial, e valores de potencial de $-1/3$ atm (-330 cm ou $-33,3$ kPa), $0,1$ atm (-100 cm ou -10 kPa) e $-0,06$ atm (-60 cm ou -6 kPa) são os mais comuns; e, para o PMP, um único valor de -15 atm (-15000 cm, ou -1500 kPa) é geralmente adotado.

POTENCIAL MATRICIAL DE ÁGUA

O potencial matricial de água no solo (h ; atm, m ou kPa) representa a diferença de energia da água entre os estados-padrão (o solo saturado com água, todos seus poros preenchidos com água, cujo valor é tomado igual a zero) e o estado considerado (o solo num determinado conteúdo de água, não saturado, poros preenchidos com ar e com água, com valores negativos de h). A relação entre h (geralmente tomado em módulo) e θ (mas também podendo ser u) é denominada de curva de retenção de água no solo; às vezes, é chamada também de curva característica. A construção experimental da curva de retenção de água no solo é feita em laboratório (utilizando amostras deformadas no caso de θ ou indeformadas de solo no caso de u).

EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Convencionou-se designar “transpiração” o processo de vaporização da água presente em seres vivos (plantas ou animais), e “evaporação” os demais processos de vaporização inanimada, como os da superfície dos solos ou de

uma superfície de corpo hídrico para a atmosfera. Evapotranspiração é o termo utilizado para designar as vaporizações conjuntas, evaporação e transpiração, no sistema solo-planta-atmosfera. A evapotranspiração potencial de referência (ET_0 , mm d^{-1}) refere-se às perdas de água quando se trata da grama batatais (*Paspalum notatum*) sem falta de água, que pode ser estimada por diferentes métodos – sendo o proposto por Penman-Monteith o mais recomendado. Outras equações alternativas, especialmente interessantes quando não se dispõe de todos os dados necessários à equação 3, são as de Thornthwaite, Priestley e Taylor e Hargreaves (Pereira et al., 1997).

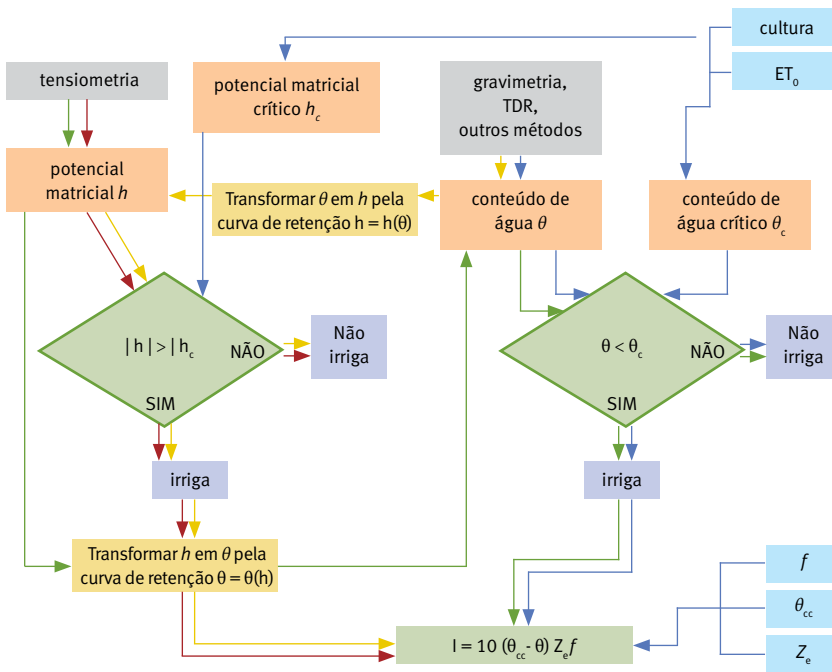
A evapotranspiração potencial de uma cultura (ET_c , mm d^{-1}) é análoga à evapotranspiração potencial de referência, porém, em lugar da grama, tem-se a cultura de interesse – no caso, o milho – estimada por:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (2)$$

Nesta equação, o fator de proporcionalidade K_c é chamado de coeficiente de cultura. K_c varia em função do tempo, referente ao ciclo da cultura de milho e, conforme proposta da FAO (Allen et al., 1998), pode ser calculado com as equações lineares apresentadas na Tabela 1. Para a cultura de milho, adotam-se os valores $K_{cA} = 0,3$, $K_{cB} = 1,2$ e $K_{cC} = 0,35$ (para milho em grão colhido a 18% de umidade) ou $K_{cC} = 0,60$ (para grão colhido com alta umidade). A Figura 2 representa, graficamente, o K_c para milho colhido, a 18% de umidade, ao longo do ciclo.

A evapotranspiração real (ET_r , mm d^{-1}) da cultura de milho pode ser igual à ET_c em condições ótimas ($\theta_c < \theta \leq \theta_{cc}$). Em condições hídricas adversas ($\theta_{pmp} \leq \theta \leq \theta_c$), a ET_r é reduzida. Ocorrendo falta de água no solo próximo às raízes, a resistência estomática da planta é aumentada pelo fechamento de estômatos, reduzindo a transpiração. Em consequência, aumenta também a

FIGURA 3 | FLUXOGRAMA DO MANEJO NA CULTURA DO MILHO



* Com base na tensiometria por potencial (setas vermelhas); por conteúdo de água crítico (setas verdes); com base na determinação do conteúdo de água no solo por potencial (setas amarelas); com base no conteúdo de água crítico (setas azuis). θ_{cc} é a capacidade de campo, Z_e é a profundidade efetiva do sistema radicular, f é o fator de déficit sem deficiência hídrica, h é o potencial matricial, θ é a umidade atual, θ_c e h_c são os conteúdos de água e potencial matricial críticos, respectivamente, e I é a lâmina líquida de irrigação.

Fonte: Dourado Neto et al., 2015.

resistência ao fluxo de gás carbônico, bem como a absorção de água e nutrientes pelas raízes. Nestas condições, as taxas fotossintéticas e respiratórias não se realizam em valores máximos e a quantidade de água disponível à planta torna-se fator limitante ao seu crescimento.

Definem-se valores críticos θ_c e h_c como valores limítrofes entre a fase de taxa de transpiração máxima (na qual $ETr = ETc$ e $\theta_c \leq \theta \leq \theta_{cc}$ ou $h \geq h_c$) e a fase de transpiração decrescente (quando $ETr < ETc$, porque $\theta < \theta_c$ ou $h < h_c$) por falta de água no solo. Valores críticos de θ_c podem ser encontrados, por exemplo, utilizando a metodologia proposta por Doorenbos e Kassam, em 1986 (Allen et al., 1998), conforme:

$$\theta_c = \theta_{pmp} + (\theta_{cc} - \theta_{pmp})(1-p) \quad (3)$$

Nesta equação, o parâmetro p é chamado de fator de depleção, representando a fração da capacidade de água disponível que pode ser consumida pela cultura sem haver redução da transpiração por estresse hídrico. O valor de p é tabelado em função da sensibilidade da cultura à seca. Considera-se que a cultura de milho pertence ao grupo de culturas de alta resistência à seca, para qual o valor de p é calculado conforme:

$$p = 0,875 - 0,075 (ETc_{:,} - 2), \text{ se } ETc \text{ está entre } 1 \text{ e } 3 \text{ mm d}^{-1}$$

$$p = 0,8 - 0,1 (ETc_{:,} - 3), \text{ se } ETc \text{ está entre } 3 \text{ e } 5 \text{ mm d}^{-1}$$

(4)

$$p = 0,6 - 0,05 (ETc_{:,} - 5), \text{ se } ETc \text{ está entre } 5 \text{ e } 8 \text{ mm d}^{-1}$$

$$p = 0,45 - 0,025 (ETc_{:,} - 8), \text{ se } ETc \text{ está entre } 8 \text{ e } 10 \text{ mm d}^{-1}$$

Alternativamente, valores do potencial crítico (h_c) foram tabelados para diversas culturas. Para a cultura de milho, recomenda-se o valor de $h_c = -500$ cm, durante o período vegetativo, e $h_c = -8000$ cm (sob alta demanda atmosférica, $ETc = 5 \text{ mm d}^{-1}$) e $h_c = -12000$ cm (sob baixa demanda atmosférica, $ETc = 1 \text{ mm d}^{-1}$), durante a fase de maturação fisiológica.

MANEJO DA IRRIGAÇÃO

O manejo da irrigação pode ser feito com base na observação do estado hídrico do solo, ou, alternativamente, pela estimativa da evapotranspiração potencial da cultura (ETc). No primeiro caso, mede-se θ ou u (ou, ainda, h) comparando-os com o valor crítico, estimado pelas equações 3 e 4. A medição deve ser feita com frequência diária, com um mínimo de três repetições e na profundidade efetiva da cultura de milho, que deve ser medida no campo. Um conteúdo de água inferior ou próximo ao θ_c (ou um potencial matricial mais negativo que o h_c) indica a necessidade de irrigar. Diversos tipos de sensores podem ser utilizados para monitorar θ ou h . Os instrumentos mais comuns são os tensiômetros (medem o potencial matricial da água, podendo ser utilizado diretamente ou ser convertido para conteúdo de água, por meio da curva de retenção) e os sensores de capacitância (medem propriedades elétricas do meio, com boa correlação ao conteúdo de água).

A Figura 3 mostra um fluxograma do manejo da irrigação, com base na tensiometria, para determinar o conteúdo de água no solo, utilizando o conteúdo de água crítico ou o potencial matricial

crítico como critérios para a irrigação. No manejo da irrigação com base na ET_c (Figura 4), utilizam-se os valores estimados de evapotranspiração. Inicialmente, a estimativa de ET_o pode ser feita pelas equações mencionadas ou através de evaporímetros, como o tanque Classe A, dentre outros (Pereira et al., 1997). A partir da ET_o , obtém-se a evapotranspiração potencial da cultura (ET_c), como indicado. A partir do conteúdo de água do solo no dia anterior (θ_p) e da ET_c , estima-se θ pela equação:

$$\theta = \theta_p + \frac{I - ET_c}{10 \cdot Z_e}, \quad (5)$$

Da mesma forma que no item anterior, um θ inferior a θ_c indica a necessidade de irrigar.

LÂMINA LÍQUIDA DE IRRIGAÇÃO

Para o cálculo da lâmina líquida de irrigação (I , mm), utiliza-se a equação 6, com dois fatores de correção:

$$I = 10 \cdot (\theta_{cc} - \theta_a) \cdot Z_e \cdot f \cdot (1 + L_R), \quad (6)$$

TABELA 2 | CENÁRIOS DAS CONDIÇÕES DE IRRIGAÇÃO POR LÂMINA LÍQUIDA

CENÁRIO	CONDIÇÃO	LÂMINA LÍQUIDA DE IRRIGAÇÃO	CONSEQUÊNCIA
1	$f = 0$	$I = 0$	Não irriga
2	$0 < f < 1$	$I = 10 \cdot (\theta_{cc} - \theta_a) \cdot Z_e \cdot f$	Irriga com lâmina reduzida pelo fator f
3	$f = 1$	$I = 10 \cdot (\theta_{cc} - \theta_a) \cdot Z_e$	Irriga para chegar na CC

Fonte: Dourado Neto et al., 2015.

em que θ_a se refere à equação 5, f a uma fração da lâmina necessária para atingir a CC e L_R ao fator de incremento da lâmina calculada com $f = 1$ para lixiviação de sais. No caso de $f = 1$, a lâmina de irrigação aplicada elevará o conteúdo de água do solo até seu valor de capacidade de campo. O fator f define a fração da lâmina líquida de irrigação a ser repostada, para não se correr o risco de, na prática, ultrapassar a capacidade de campo e perder água por drenagem quando se irriga, com $f = 1$, e logo após chove. No caso hipotético de $f = 0$, a lâmina de irrigação seria igual a zero (quando há grande probabilidade de chover). Sendo assim, ter-se-iam os cenários apresentados na Tabela 2.

O cenário 2 propicia a obtenção de maior eficiência do uso de água, pelo fato de otimizar a aeração (maior disponibilidade de oxigênio em profundidade), maximizando a profundidade efetiva do sistema radicular. Além disso, maximiza também a eficiência do uso de nutrientes, por propiciar maior volume de solo por planta, minimizando os efeitos de estresse por competição intra e interespecífica (por água e nutrientes) nas plantas. Nestes casos, sugere-se utilizar $f = 0,5$.

Em áreas propensas à salinização é necessário irrigar em excesso. Assim, tem-se $f = 1$ e calcula-se a lâmina para lixiviação de sais L_R conforme:

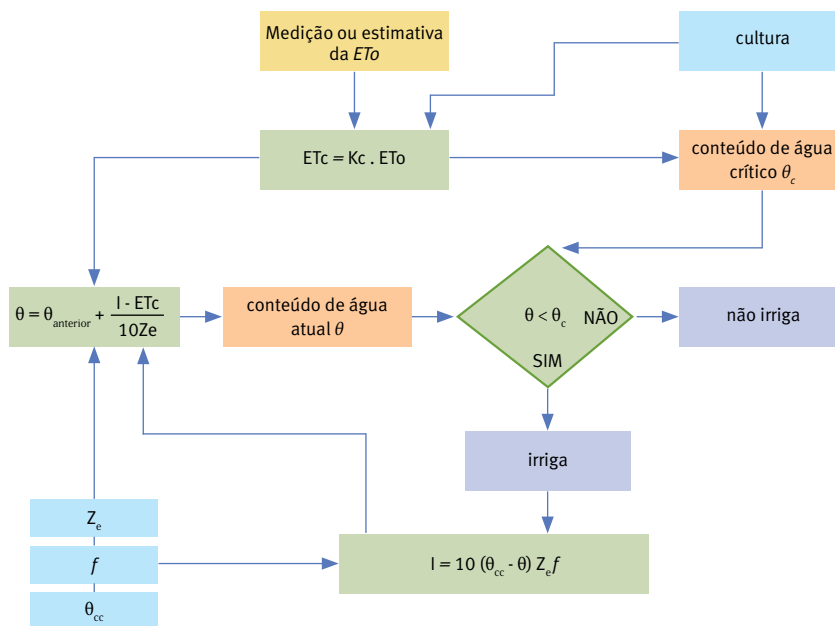
$$L_R = \frac{CE_w}{CEd}, \quad (7)$$

em que CE_w é a condutividade elétrica da água de irrigação ($dS m^{-1}$) e CEd , a condutividade elétrica ($dS m^{-1}$) da solução do solo, quando na capacidade de campo, correspondente à produtividade relativa nula (Figura 5). Através da inclinação da reta B, pode-se observar que CEd é dado por:

$$CEd = \frac{200 + 2 \cdot F_A \cdot F_B}{F_B}, \quad (8)$$

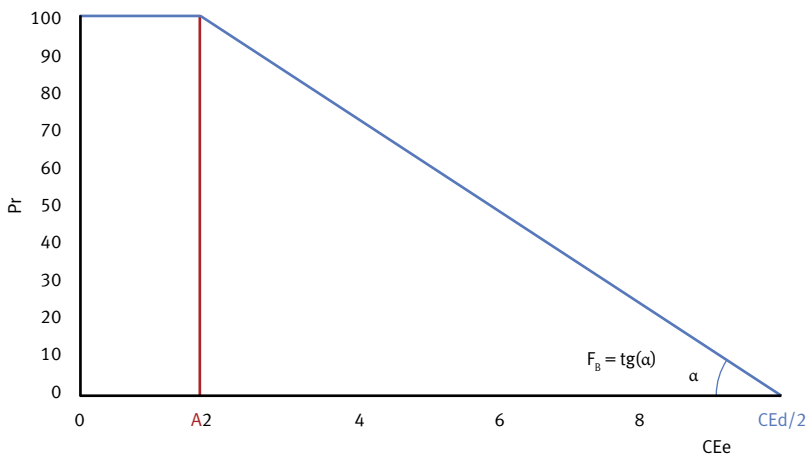
em que F_A é a condutividade elétrica limítrofe ($1,7 dS m^{-1}$), acima da qual inicia redução da produtividade relativa, e F_B é a taxa de perda de produtividade relativa de milho, por unidade de condutividade elétrica que excede ao valor A (12% [$dS m^{-1}$]).

FIGURA 4 | FLUXOGRAMA DO MANEJO DO MILHO, COM BASE NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DA CULTURA



Fonte: Dourado Neto et al., 2015.

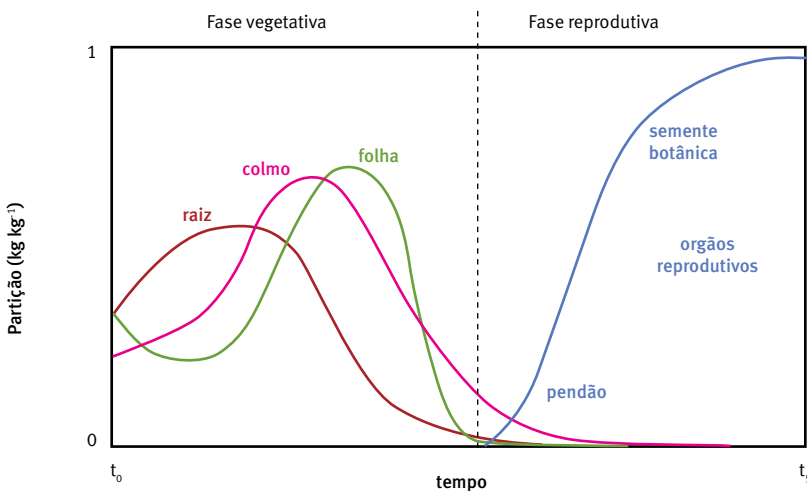
FIGURA 5 | PRODUTIVIDADE RELATIVA DE MILHO EM FUNÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO EXTRATO DE SATURAÇÃO DO SOLO*



* Produtividade relativa (Pr, %) do milho ($F_A = 1,7 \text{ dS m}^{-1}$, $F_B = 12\% [\text{dS m}^{-1}]^{-1}$ e $CEd = 20,07 \text{ dS m}^{-1}$ para $\theta_s/\theta_{cc} = 2$); função da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEe , dS m^{-1}).

Fonte: Bernardo et al., 2006.

FIGURA 6 | PARTIÇÃO DE CARBOIDRATOS DURANTE AS FASES VEGETATIVA E REPRODUTIVA DA CULTURA DE MILHO*



* $\text{kg CH}_2\text{O}$ alocado por $\text{kg CH}_2\text{O}$ da fotossíntese líquida.

Fonte: Dourado Neto et al., 2015.

A base para se entender como manejar a água, para maximizar a profundidade efetiva do sistema radicular, é a partição dos carboidratos (Figura 6). A irrigação deve propiciar oxigenação do sistema radicular nos 2/3 iniciais da fase vegetativa.

Um dos principais fatores de aumento de produtividade, na cultura de milho sob irrigação, é a utilização de alta densidade de população de plantas, próxima à máxima teórica, que depende do balanço de carboidrato na planta, índice de área

foliar e interceptação de radiação. Estima-se uma densidade teórica máxima da ordem de 150.000 plantas ha^{-1} , com índice de área foliar da ordem de $4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e interceptação relativa de radiação de 95%. Em ambientes de produção favoráveis ao cultivo de milho, ocorrem densidades desde 85.000 (Argentina) até 125.000 (Estados Unidos) plantas por hectare, com consequentes altas produtividades.

A profundidade efetiva do sistema radicular é fundamental para o manejo da irrigação, para a construção e manutenção (adubação, calagem e gessagem), assim como para o monitoramento (histórico e amostragem) da fertilidade química do solo (a extração de 90% de toda água transpirada e incorporada na matéria seca representa mais que 90% da extração de nutrientes). O manejo da irrigação tem o objetivo de maximizar a eficiência de uso de água e de nutrientes, mantendo o conteúdo de água sempre atual, na zona de suficiência hídrica. A produtividade máxima econômica define a tecnologia a ser utilizada. ☺

* **Durval Dourado Neto** é professor do Departamento de Produção Vegetal da USP/ESALQ (ddourado@usp.br). **Quirijn de Jong van Lier** é professor do Laboratório de Física do Solo da USP/Cena (qjulier@usp.br). **Klaus Reichardt** é professor sênior do Laboratório de Física do Solo da USP/Cena (klaus@cena.usp.br) e **Mareo Antonio Tavares Rodrigues** é pesquisador da Basf (mareo-antonio.tavares-rodrigues@basf.com).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO, 1998 (2013). cap. 6. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56). Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e0b.htm#crop coefficients>. Acesso em: 26 set. 2015.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. *Manual de irrigação*. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. *Evapotranspiração*. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.