

ÍNDICE DE FAVORABILIDADE DE TEMPERATURA PARA CULTURAS ANUAIS E PERENES

JOSÉ EDUARDO B. A. MONTEIRO¹

¹ Eng. Agrônomo, Doutor, Assessor de Pesquisa e Desenvolvimento, Instituto Nacional de Meteorologia, Eixo Monumental, Via S1, Sudoeste, Brasília, DF, (61) 3344-0834, eduardo.monteiro@inmet.gov.br

Apresentado no XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 22 a 25 de Setembro de 2009 – GranDarrell Minas Hotel, Eventos e Convenções – Belo Horizonte – MG.

RESUMO: Uma das principais funções da agrometeorologia é produzir informações com significado biológico ou agrônômico a partir de dados meteorológicos. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo matemático que simule a resposta quantitativa de uma cultura em função da temperatura. Dados de crescimento de algumas culturas foram utilizados para ajustar um modelo de resposta a temperatura. Crescimento foi subdividido em índices de fotossíntese bruta e respiração, ajustados por modelos baseados nas temperaturas cardinais. Um terceiro modelo foi gerado para simular o efeito de stress térmico. A soma dos três índices resultou no chamado índice de favorabilidade de temperatura (IFtemp).

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem, crescimento, temperaturas cardinais.

TEMPERATURE FAVOURABILITY INDEX FOR ANNUAL AND PERENIAL CROPS

ABSTRACT: One of the main purposes of agrometeorology is to translate meteorological data into biological and agronomic information, used as support on management decisions. The objective of this work was to develop a mathematical model to simulate a quantitative response of crops as function of temperature. Growth data of some crops were used to fit a response model to temperature. Crop growth was split on indexes of gross photosynthesis and respiration, both fit on models based on cardinal temperatures. A third model was developed to represent thermal stress effects. The sum of all 3 indexes resulted on what is called temperature favorability index (IFtemp).

KEYWORDS: Crop modeling, crop growth, cardinal temperatures.

INTRODUÇÃO: Uma das principais funções da agrometeorologia é produzir informações com significado biológico ou agrônômico a partir de dados meteorológicos. Uma grande variedade de modelos de simulação de cultivos tem sido empregada com esse objetivo. Tais modelos, baseados em processos ecológicos e fisiológicos, normalmente se utilizam de dados meteorológicos e são empregados para quantificar o efeito de diferentes fatores de produção no crescimento, desenvolvimento e produtividade vegetais. Sistemas de simulação da família DSSAT, entre os mais conhecidos, como CROPGRO e CERES, são pacotes de software que integram os efeitos de vários fatores de produção, como o solo, o genótipo da cultura, as condições do tempo e as opções de manejo. Tais modelos são bastante completos, permitindo simulações de alto nível e especificidade, mas requerem um grande número de parâmetros. Entre dados meteorológicos “brutos” e saídas de modelos de simulação existe uma grande

diferença. Uma posição intermediária pode ser ocupada por métodos de menor especificidade e que permitam traduzir as variáveis do ambiente físico – a oferta ambiental – em um índice que expresse desempenho vegetal. Por isso, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo matemático que simule a resposta quantitativa da cultura em termos de eficiência relativa, e que seja função de um fator físico qualquer. A temperatura está entre os mais importantes fatores ambientais que controlam o desenvolvimento das plantas, o crescimento e a produtividade. O efeito da temperatura no metabolismo e crescimento dos vegetais é um dos mais conhecidos. Por isso, esta variável foi considerada como um ponto de partida lógico e conveniente para o desenvolvimento conceitual deste método. Todos os processos biológicos respondem à temperatura e todas as respostas podem ser resumidas em termos das três temperaturas cardinais, denominadas de temperatura basal inferior (T_{bi}), temperatura ótima (T_{ot}) e temperatura basal superior (T_{bs}). A resposta à temperatura entre esses pontos cardinais tem sido testada em vários modelos (YAN; HUNT, 1999). Três premissas embasam a metodologia aqui proposta. Primeiro, a inexistência de um índice quantitativo simples e direto que permita estimar o efeito de uma variável meteorológica no crescimento de uma determinada cultura. Segundo, os resultados do método devem ser facilmente interpretáveis por não-especialistas que necessitem saber a situação de uma cultura face à variação meteorológica, sem ter que interpretar séries de dados ou conhecer as necessidades específicas da espécie. Terceiro, o índice de temperatura deve ser calculado em uma escala padronizada, para que seja possível analisá-lo isoladamente ou em interação com índices de outras variáveis meteorológicas (radiação solar, disponibilidade hídrica, vento), facilitando a comparação do desempenho da cultura entre locais, estações, cultivares e espécies.

MATERIAL E MÉTODOS: Uma abordagem lógica seria explorar conceitos básicos de fisiologia vegetal amplamente difundidos como crescimento, desenvolvimento, partição de fotoassimilados e absorção de água e nutrientes. Destes, crescimento, particularmente na forma de acúmulo de massa, parece ser o mais adequado, pois é, certamente, a melhor integração da maioria das atividades metabólicas da planta. Para o ajuste de dados de crescimento em função da temperatura, foi utilizada a função padrão de densidade de uma distribuição beta (BOCK; KRISCHNER, 1998, ou qualquer manual de fundamentos de matemática estatística). Esta função é caracterizada por uma resposta unimodal a uma variável independente x no intervalo $[0, 1]$ e apresenta densidade zero quando $x \leq 0$ ou $x \geq 1$, bem como uma densidade máxima em um dado x entre 0 e 1. A substituição da variável independente x pela temperatura (T) resulta em uma expressão que pode ser usada para descrever a variação do crescimento de uma cultura em função da temperatura (YIN et al., 1995), de acordo com a equação 1.

$$c = C_{\max} \left[\frac{(T_{bs}-T)}{(T_{bs}-T_{ot})} \left(\frac{(T-T_{bi})}{(T_{ot}-T_{bi})} \right)^{\frac{(T_{bs}-T_{ot})}{(T_{ot}-T_{bi})}} \right]^f \quad (1)$$

A equação 1, testada com sucesso em dados experimentais de várias culturas (YIN et al. 1995, YAN; HUNT, 1999), ajusta crescimento às três temperaturas cardinais, ao crescimento máximo C_{\max} , e a f , um parâmetro que determina a forma da curva. Para produzir uma representação mais exata do crescimento, este foi subdividido nos processos que provocam ganho e perda de massa, representados por fotossíntese bruta (FB) e respiração (R), respectivamente. Assim, FB e R foram tratados separadamente. Utilizou-se a mesma equação 1 para o ajuste de FB com parâmetros atualizados e uma nova equação para o ajuste de R, de modo que a diferença entre FB e R permanecesse igual à curva de crescimento da Equação 1, correspondendo, neste caso, à fotossíntese líquida (FL). Diversos modelos de respiração foram testados no software Table Curve (v2.03, Jandel Scientific, San Rafael, CA,

USA) através de análises de regressão. Testou-se, também, uma adaptação da equação beta simplificada de Yan e Hunt (1999), intervalo $[-1/3FB, R_{residual}]$ (Equação 2, em Resultados). O ajuste se baseou em curvas típicas para este processo fisiológico (WHITE; REYNOLDS, 2001), e em dados experimentais de respiração em algumas espécies (BUNCE, 2005, AL-HAMDANI; TODD, 1990). Testou-se, ainda, um modelo que permitisse simular os efeitos do stress térmico (S) que ocorre em temperaturas extremas, em temperaturas acima da T_{bs} e abaixo da T_{bi} . Para isso, foi utilizada uma segunda adaptação da função de distribuição beta, como função de T, cujo valor numérico, ou índice, varia no intervalo $[-\infty, 0]$, em que $-\infty$ representa morte da planta. O índice de favorabilidade de temperatura é então calculado como a soma dos índices produzidos pelos modelos de FB, com valores positivos, de R e S, estes últimos com valores sempre negativos. Os resultados gráficos dos modelos propostos foram gerados a partir das temperaturas cardinais (10°C, 27°C, 36°C), apenas como exemplo, já que as curvas de resposta podem ser geradas para qualquer espécie ou variedade, desde que se tenham as respectivas temperaturas cardinais. Para o modelo do índice de stress, adotou-se a temperatura crítica inferior $T_{ci} = 0^\circ\text{C}$ e a superior $T_{cs} = 45^\circ\text{C}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A Figura 1 mostra as curvas geradas pelos modelos de FB, R, S e ainda, a diferença entre FB e R, representada por FL. Yin et al. (1995) propôs e testou o método aqui apresentado com sucesso para o ajuste de dados experimentais da cultura de arroz. Posteriormente, o mesmo modelo descreveu com sucesso a relação da temperatura com o crescimento observado de milho, sorgo, trigo, centeio, feijão e *Chenopodium album* L. (YAN; HUNT, 1999). Comparada a modelos anteriores, a expressão de Yin e co-autores tem a vantagem de produzir curvas mais realistas, com melhores correlações e, além disso, todos os parâmetros, exceto f, têm significado biológico (Figura 1). O crescimento, quando considerado como o aumento da massa das plantas, necessariamente depende de um saldo positivo da taxa fotossintética líquida (FL), o que ocorre sempre que a fotossíntese bruta (FB) (assimilação de CO_2) é maior que a respiração (R) (perda de CO_2). Por isso, pareceu conveniente subdividir o processo de crescimento em duas fases, pois permitiu considerar apropriadamente as respostas fisiológicas bastantes distintas entre o dia e a noite. A Equação 2 apresenta o modelo adaptado a partir da Equação 1, e utilizado para respiração, em que R_{res} é a respiração residual, componente de manutenção da respiração que se mantém mesmo em temperaturas baixas; R_{max} é a respiração máxima; Trx é a temperatura em que ocorre a R_{max} ; f_r é um fator de forma da curva.

$$r = R_{res} + (R_{max} - R_{res}) \left[1 + \left(\frac{Trx - T}{Trx * f_r} \right) \left(\frac{T}{Trx} \right)^{\frac{Trx}{Trx * f_r}} \right] \quad (2)$$

Taxas respiratórias normalmente aumentam exponencialmente com a temperatura até um certo limite, provocando um ponto de inflexão na curva (Trx), quando vários efeitos deletérios começam a reduzir o metabolismo como um todo (LOOMIS; CONNOR 1992; SMITH et al. 1999). Tais respostas são atribuídas principalmente ao aumento da respiração de manutenção, e não ao componente da respiração utilizado para crescimento (LOOMIS; CONNOR 1992). Diferenças na resposta da respiração à temperatura são frequentemente associadas a diferenças adaptativas, levando Smith et al. (1999) a sugerir que essas respostas possam ser melhor indicador de adaptação do que aquelas encontradas na fotossíntese. A Equação 3 apresenta o modelo adaptado utilizado para o índice de stress térmico.

$$S = - \left[\frac{T_{bs}}{T_{cs} - T_{ot}} \right]^{(T - T_{cs})} - \left[\frac{T_{ot}}{T_{bi}} \right]^{(T_{ci} - T)} \quad (3)$$

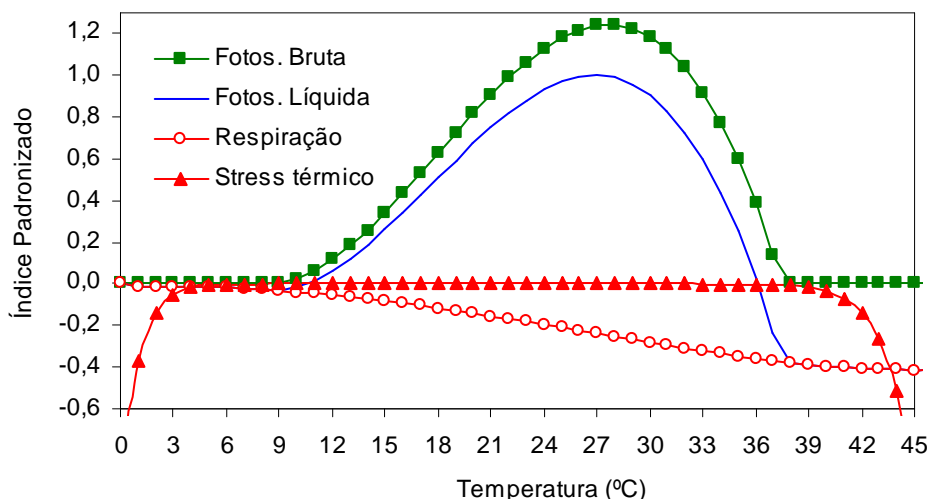


Figura 1. Índices térmicos padronizados de fotossíntese bruta, respiração, fotossíntese líquida e stress térmico, considerando temperatura ótima (T_{ot}) de 27°C para crescimento vegetativo, temperaturas basal inferior (T_{bi}) de 10°C e superior (T_{bs}) de 36°C, temperatura crítica ou letal inferior (T_{ci}) de 0°C e superior (T_{cs}) de 45°C.

Na Figura 1, é possível observar um decréscimo progressivo no valor do índice de stress, tendendo a um valor infinito negativo ao atingir a temperatura crítica ou letal. Esse decréscimo antecipado parece realista ao simular o efeito provável do stress térmico, já que muitas culturas têm seu crescimento prejudicado ou retardado durante algum tempo, até dias, após expostas a temperaturas estressantes. No entanto, somente a partir de dados experimentais seria possível propor um modelo com parâmetros melhor ajustados. A soma dos índices de FB, R e S resultam no Índice de Favorabilidade de Temperatura (IFtemp). Este é um índice quantitativo e relativo (no intervalo de 0,0 a 1,0). É relativo à condição de temperatura ideal que resultaria em crescimento ótimo ou ideal, ou seja $IFtemp = 1,0$. O extremo oposto, $IFtemp = 0$, ocorre em qualquer condição de temperatura tão desfavorável que resulte em crescimento nulo. O IFtemp tem correlação linear direta com a taxa de crescimento da cultura, permitindo estimar a resultante biológica da variação da temperatura ao longo de um dia. Em outras palavras, significa transformar temperatura (°C) em desempenho ou eficiência vegetal, ajustável para qualquer espécie e variedade, alterando-se apenas os parâmetros da equação, baseados em temperatura ótima, basal inferior e superior, e crítica superior e inferior. Na ausência de dados de radiação solar que permitam estimar um índice de eficiência que expresse a taxa de FB proporcional à disponibilidade de luz, pode-se utilizar um método simplificado. Esta simplificação consiste em dividir o cálculo em dois períodos, o diurno e o noturno. No primeiro, diurno, considera-se o índice de FB, descontado dos índices de respiração e stress, podendo apresentar saldo positivo ou negativo. No segundo, noturno, na ausência de luz e fotossíntese, consideram-se somente os índices de respiração e stress, cujo saldo é sempre negativo. Seguindo essa simplificação, a Figura 2 exibe a variação da temperatura e do IFtemp, observados em dois dias que apresentaram a mesma temperatura média. De modo geral, durante o dia, sempre que a temperatura se afasta da T_{ot} , o IFtemp diminui. Durante a noite, quando a temperatura diminui o índice aumenta, devido à redução na taxa respiratória.

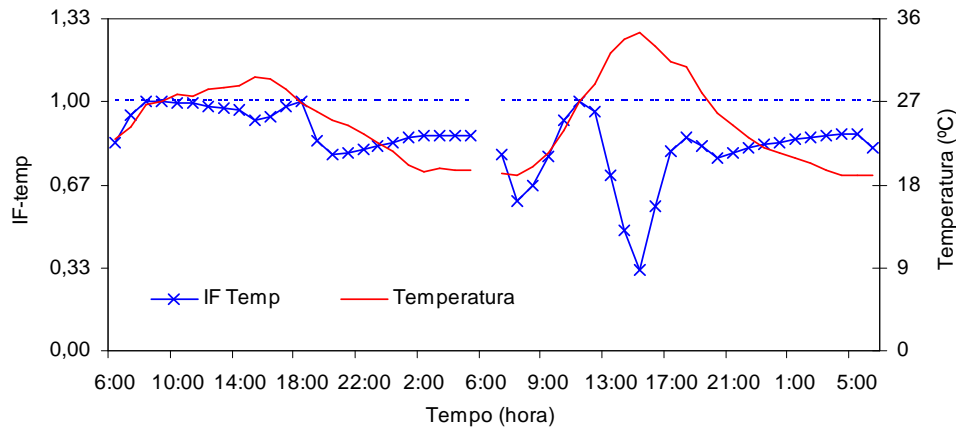


Figura 2. Variação da temperatura em dois dias com temperatura média de 24,5°C, e respectivos Índices de Favorabilidade de temperatura (IF-temp) para *Glycine Max L.*, considerando as temperaturas cardinais $T_{card} = 0, 10, 27, 36, 45^{\circ}\text{C}$; IF-temp médio de 0,90 e 0,75, respectivamente, no primeiro e no segundo dia.

Um Índice de Favorabilidade (IF) pode ser definido como um indicador proporcional ao crescimento esperado de uma cultura sem outros fatores limitantes. É expresso na forma de uma relação entre o valor atual e o ideal, por isso o IF será sempre um número entre o crescimento nulo (0) e o crescimento máximo (1) ou, no intervalo entre infinito negativo e 1, quando o índice de stress estiver acoplado. Pode ser analisado tanto em termos de valores instantâneos quanto pela média de um período (dia, mês, ciclo), sem perda de informações. Assim, pode-se dizer que o IF indica o quanto o ambiente foi propício ao crescimento de uma espécie, num dado período. Portanto, é essencialmente uma variável do ambiente físico, mas equacionada em relação a parâmetros biológicos, em relação às necessidades da cultura. Modelos de simulação baseados em processos são amplamente utilizados para analisar a resposta de uma cultura para as condições do ambiente, principalmente onde as variações de temperatura têm efeitos importantes sobre o crescimento. Exemplos de aplicação incluem caracterização de ambientes de produção (incluindo zoneamento), resposta de cultivos a datas de plantio, identificação de tecnologias adequadas a cada região e aquecimento global (WHITE et al., 2005).

CONCLUSÕES: O IFtemp é uma representação simplificada dos efeitos da temperatura no crescimento vegetal. É um índice útil a medida que permite transformar dados de temperatura em um indicador quantitativo, proporcional ao crescimento esperado de uma cultura sem outros fatores limitantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- AL-HAMDANI, S.; TODD, G.W. Effect of Temperature Regimes on Photosynthesis, Respiration, and Growth in Alfafa. **Proceedings of Oklahoma Academy of Science**, v. 70, p. 1-4, 1990.
- BUNCE, J.A. Response of respiration of soybean leaves grown at ambient and elevated CO_2 concentrations to day to day variations in light and temperature under field conditions. **Annals of Botany**, v. 95, n. 6, p. 1059-1066, 2005.

- LOOMIS, R.S.; CONNOR, D.J. **Crop ecology: Productivity and management in agricultural systems**. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1992
- SMITH, B.N.; JONES, A.R.; HANSEN, L.D.; CRIDDLE, R.S. Growth, respiration rate, and efficiency responses to temperature. *In*: PESSARAKLI, M. (ed.), **Handbook of Plant and Crop Stress**. New York: Marcel Dekker, Inc. 199. p. 417-440.
- WHITE, J.W.; REYNOLDS, M.P. A Physiological Perspective on Modeling Temperature Response in Wheat and Maize Crops. *In*: WHITE, J.W. (ed.). **Modeling Temperature Response in Wheat and Maize: Proceedings of a Workshop**, CIMMYT, El Batán, Mexico, 23-25 Abril 2001. p. 8-17.
- WHITE, J.W.; HOOGENBOOM, G.; HUNT, L.A. A Structured Procedure for Assessing How Crop Models Respond to Temperature. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 426–439, 2005.
- YAN, W.; HUNT, L.A. An Equation for Modelling the Temperature Response of Plants using only the Cardinal Temperatures. **Annals of Botany**, v. 84, p. 607-614, 1999.
- YIN, X.; KROPFF, M.J.; McLAREN, G.; VISPERAS, R.M. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 77, p. 1-16, 1995.