

MODELO AGROMETEOROLÓGICO GENÉRICO DE PRODUÇÃO VEGETAL (MAGé)

Murilo dos S. Vianna; Fábio R. Marin; Felipe G. Pilau

Departamento de Engenharia de Biosistemas – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (USP)

1. Apresentação

A agricultura é uma das atividades mais antigas e fundamentais da humanidade. Ao longo dos séculos, foram desenvolvidas diferentes técnicas de manejo em busca de um maior aproveitamento das terras, extração de substratos e produtos beneficiados provindos de origem vegetal. Embora o avanço tecnológico tenha desempenhado um importante papel no aumento da produtividade agrícola e eficiência de suas cadeias de produção, grande parte da agricultura mundial é dependente de fatores ambientais e meteorológicos.

O bom desempenho das culturas agrícolas é dependente da fertilidade e da disponibilidade de água dos solos e de variáveis meteorológicas como a radiação solar, umidade e a temperatura do ar, a chuva e o vento. A variabilidade climática faz da agricultura um dos setores econômicos de maior risco. De modo geral, em cultivos extensivos essas variáveis não podem ser controladas em larga escala, o que ressalta a importância de se conhecer e analisar detalhadamente o comportamento do clima e seu efeito sobre a atividade agrícola numa dada região para otimizar recursos e aumentar a produtividade dos empreendimentos.

A agrometeorologia é o ramo da meteorologia dedicado ao estudo dos processos envolvidos entre o desenvolvimento e crescimento vegetal e as condições meteorológicas. Os estudos agrometeorológicos são focados no sistema solo-planta-atmosfera, o que explica a forte interface com outras áreas do conhecimento, como a fisiologia vegetal, física do solo, a estatística e a fitotecnia. Com o avanço em pesquisa e tecnologia no último século, foi possível aprimorar medições e formular equações que representassem as relações e processos no sistema solo-planta-atmosfera. Atualmente diversas dessas equações e relações são amplamente utilizadas em sistema de previsão/monitoramento de tempo, previsão de safra, análises de riscos climáticos, sistemas de alerta fitossanitários etc.

Neste sentido, a junção ou conjunto de equações dedicadas a representar o desenvolvimento e crescimento vegetal baseando se nas condições de solo e clima pode ser chamada de modelo agrometeorológico de produção vegetal, ou modelo de cultura baseado em processos. Esse tipo abordagem busca representar ou “simular” o crescimento e desenvolvimento de uma cultura em uma dada condição meteorológica e pedológica. Este tipo de modelo desempenha um papel notável no auxílio à compreensão do desenvolvimento vegetal e sua relação com clima e solo, dentre outras aplicações como: i) sistematização e integração do conhecimento em diferentes áreas; ii) teste de hipóteses (quantitativamente); iii) extrapolação dos efeitos dos fatores além das condições experimentais; iv) revelação dos limites do conhecimento e guiar a pesquisa e; v) suporte

à tomada de decisão. Este último inclui análises de risco climático, otimização do uso de insumos, cenários de mudanças climáticas e mapas de eficiência de produção visando à intensificação agrícola.

Com o apoio computacional, a modelagem tornou-se uma ferramenta de extrema importância na compreensão do funcionamento dos fenômenos biológicos e físicos no sistema agrícola, dando suporte a solução de problemas que excedem a capacidade de síntese do cérebro humano.

Este documento apresenta um modelo agrometeorológico simples, adaptável a qualquer cultura anual ou semi-perene, desenvolvido em plataforma Microsoft Excel™ e incluindo conceitos básicos da modelagem baseada em processos. Além de descrever o modelo, busca-se neste texto fornecer instruções básicas para o uso prático da planilha, suas limitações e observar alguns exemplos de aplicação.

2. Modelagem e sua concepção básica

Um modelo é uma simples **representação** de um **sistema** real. Pode-se fechar os olhos e tentar imaginar o crescimento de uma planta, a tradução disto em forma gráfica, escrita, verbal, ou matemática é a **modelagem** do sistema. Existem duas definições que auxiliam na compreensão deste conceito, que são: i) **sistema** é um conjunto de objetos (componentes ou fatores) que interagem entre si de forma organizada e o extrato dessa interação resulta no comportamento, função ou propósito desse sistema; ii) quando um sistema é representado de uma forma mais simples, apenas focando nos aspectos principais, esta é conhecida como **modelo**, tornando-se uma ferramenta para compreender o sistema em questão (TEH, 2006).

Dentre as diversas formas gerais de modelos (gráfico, conceitual ou verbal, estrutural e matemática) este documento irá focar nos modelos matemáticos. Modelos matemáticos são aqueles capazes de representar sistemas quantitativamente nos possibilitando avaliar com precisão os resultados deste. Um exemplo pode ser dado pela representação matemática da força exercida por um corpo (eq. 2.1), ou uma típica curva de resposta do milho a dosagens de nitrogênio (eq. 2.2).

$$F = m \cdot a \quad (2.1)$$

$$Y = 651 + 28,9 \cdot N - 0,13 \cdot N^2 \quad (2.2)$$

em que, F é força, em Newtons; m é massa, em kg; a é aceleração, em $m \cdot s^{-2}$. Na equação 2.2, Y é a produtividade, em $kg \cdot ha^{-1}$; N é a dosagem de nitrogênio, em $kg \cdot ha^{-1}$. A segunda equação foi obtida pela relação entre produtividade e níveis de dosagem em um experimento de condições controladas (LUCENA *et al.*, 2000), descrevendo um incremento da produtividade do milho com aumento na dosagem de nitrogênio até um certo limite, $111,1 \cdot kg \cdot ha^{-1}$, a partir do qual ocorre o decaimento da produtividade.

Embora a eq. 2 tenha sido uma ótima representação para resposta do milho às doses de nitrogênio, com $r^2=0,98$ e alto nível de confiança, esta relação não explica por si só os processos bioquímicos, físicos e fisiológicos na produtividade do milho. Além

disso, somente é possível inferir que essa relação pode ser válida devido ao fato de ser de um experimento em condições controladas, onde somente as dosagens de nitrogênio variaram. Tal característica é típica de um modelo **empírico**, onde a relação entre os componentes do sistema é conhecida, mas não se entende os processos que regem seu comportamento. Outra principal característica de um modelo empírico é que ele somente pode ser aplicado para as condições de contorno nas quais foi derivado, no exemplo, somente seria válido para a mesma cultivar, tipo de solo, clima e manejo descritos por Lucena et al (2000).

Em contrapartida, na eq. 1, temos um modelo geral que descreve a força exercida em um corpo que pode ser aplicado em praticamente todas as condições naturais conhecidas, ou seja, pode ser utilizado além das condições de contorno nas quais fora derivado. Esta habilidade torna este modelo de extrema importância e aplicabilidade na solução do problema em questão. A capacidade de representar e explicar um ou mais fenômenos do sistema, por si só, classifica o modelo como **mecanístico**.

Conseqüentemente, modelos mecanísticos são mais robustos e aplicáveis a condições ambientais e de contorno mais amplas, por serem desenvolvidos com base nos mecanismos inerentes aos fenômenos que regem o sistema. Enquanto que em modelos empíricos, objetiva-se encontrar relações (estatísticas) entre os componentes do sistema, tornando assim sua aplicação restringida apenas às condições de contorno sem caráter explanatório dos fenômenos. Então, pode se considerar os modelos empíricos como ferramentas calibradas e customizada para trabalhar apenas em uma condição específica. Quando aplicado a esta condição, os modelos empíricos geralmente apresentam desempenho superior aos mecanísticos, sendo excelentes ferramentas de previsão para sistemas, porém, seu desempenho é muito inferior quando aplicado fora das condições específicas.

Independentemente do tipo, a concepção de um modelo parte sempre de uma ou mais hipóteses (modelo teórico) e são motivados pela necessidade de solucionar, identificar ou descrever um problema real. Logo, as hipóteses formam a base para o delineamento experimental e os resultados desses experimentos servem para testá-las, validando-a ou não, ou até auxiliando a elucidar ou reformular novas hipóteses. Desta forma, a concepção de um modelo geralmente segue os processos expostos pela Figura 1, onde a identificação do objetivo rege as hipóteses e cabe ao modelador traduzi-la e refina-la para linguagem matemática, em seguida testando experimentalmente para checar se o modelo descreve bem o sistema no qual foi programado.

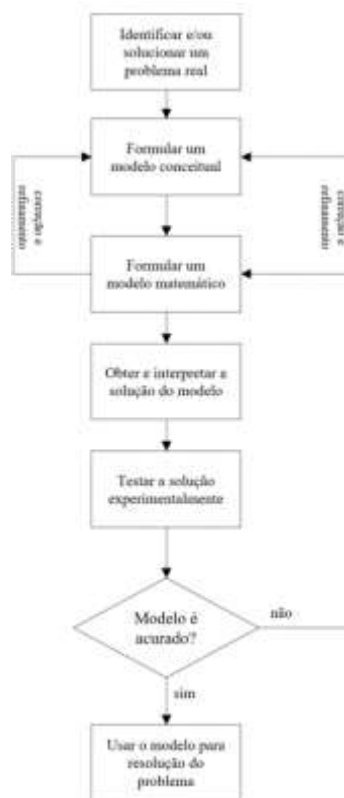


Figura 1. Representação esquemática dos principais passos para concepção de um modelo matemático.

O foco no objetivo inicial no qual foi proposto é de fundamental importância para se evitar abordar o problema de modo muito simplista, negligenciando os processos e fenômenos fundamentais que regem o sistema no qual foi projetado, ou, conceber um refinamento excessivo na construção do modelo. Vale lembrar que modelos são simplificações da realidade e que auxiliam a entender e tomar decisões sobre problemas que excedem nossa capacidade subjetiva de o solucionar. Desta forma, nenhum modelo é perfeito e todos eles terão suas limitações que deverão ser claras para o usuário.

Até agora foi dado como exemplo modelo como uma única equação matemática descrevendo um sistema simples, sem muitos componentes. No entanto, para representar um sistema mais complexo é preciso combinar-se um conjunto de equações que descrevam os principais processos envolvidos nele, denominando-se modelo de **simulação** (ADDISCOTT, 1993). Este é o caso do modelo aqui apresentado, que é dedicado a representar (simular) o crescimento e desenvolvimento de culturas agrícolas com base em um conjunto de equações, buscando representar de modo simplificado os principais processos que explicam o crescimento e o desenvolvimento de uma cultura agrícola.

Antes de iniciar a próxima sessão, para auxiliar no entendimento e uso do modelo é importante ter em mente as seguintes definições:

- i) **Variável:** necessária para armazenar informações de estado, transição ou resultados. Ou seja, é todo valor que muda conforme o modelo é operado;

- ii) **Parâmetro:** valores constantes, previamente estabelecidos para o funcionamento de um modelo. São valores que não mudam durante a operação do modelo;
- iii) **Dados de entrada:** dados requeridos para os cálculos do modelo. Assemelha-se com os parâmetros pois também não varia conforme o modelo é operado;
- iv) **Dados de saída:** geralmente são as variáveis nas quais o modelo é dedicado a calcular;
- v) **Calibração:** é um ajuste feito nos parâmetros do modelo de forma que ele represente da forma mais próxima possível um determinado resultado ou condição medida experimentalmente;
- vi) **Validação ou avaliação:** quando os resultados do modelo são confrontados com dados medidos com objetivo de determinar a performance do modelo em simular o sistema em questão.

3. Modelando Culturas Agrícolas

Conforme visto na última sessão, os modelos são excelentes ferramentas no auxílio do entendimento e tomada de decisão de problemas complexos. Desta maneira, são e podem ser aplicados a diversas áreas do conhecimento. Em agronomia ou ciências ambientais, o uso dos modelos é amplamente difundido, e além de auxiliar no entendimento de processos ou fenômenos complexos, suas principais aplicações são otimizar recursos e operações (irrigação e insumos), planejamento agrícola (janelas de colheita), análises de viabilidade e risco climático ou ambiental, sistemas de alerta de pragas e doenças, cenários de mudanças climáticas, previsão de safra e mapas de eficiência (“*yield gap*”). Para cada aplicação existe um, ou mais modelos, capaz de computar uma solução, sendo alguns capazes de atender a um conjunto maior de aplicações, e outros somente em uma única aplicação, porém com alta eficiência.

O modelo agrometeorológico apresentado neste trabalho busca simular o crescimento e desenvolvimento de culturas agrícolas baseado nas relações hídricas do sistema solo-planta-atmosfera. Com isso, este modelo é capaz de simular o rendimento de culturas em sistema de sequeiro ou irrigado, auxiliando na otimização de recursos hídricos, análises de risco climático, planejamento agrícola e eficiência agrícola. Este modelo **não** é capaz de simular os efeitos de deficiências nutricionais ou de doses de fertilizantes, de pragas e doenças e de defensivos agrícolas que poderiam protegê-las. Ele tem como principal habilidade avaliar o efeito da variabilidade climática e da deficiência hídrica no solo na produtividade agrícola. Por ser um modelo genérico, alguns processos específicos e fundamentais para a simulação de determinada cultura podem ser negligenciados, cabendo ao usuário buscar entender e, se possível, adaptar o modelo de modo a incluir os efeitos desse fator em suas simulações.

3.1 Condições de contorno

As condições de contorno definem quais são os componentes e os limites nos quais o modelo trabalha. Para saber quais componentes e fatores devem ser considerados na construção de um modelo é preciso identificar quais deles são fundamentais e afetam

o indivíduo, no caso a cultura. O principal processo fisiológico que governa o **crescimento** vegetal é a fotossíntese, portanto os principais fatores que afetam o processo de fotossíntese devem ser considerados no modelo. Outro aspecto relevante que deve ser levado em conta é a fenologia, que corresponde ao **desenvolvimento** da cultura, definindo assim os períodos de crescimento vegetativo, floração e maturação. A fotossíntese depende, basicamente, de água, luz e dióxido de carbono (CO₂), enquanto que o processo fenológico é governado pela temperatura e fotoperíodo (exposição à luz). Em ambientes não controlados, a disponibilidade desses fatores é incerta e exerce diferentes efeitos na produção de terminada cultura.

Neste sentido, três níveis de produção e seus respectivos fatores (Figura 2) podem ser definidos (VAN ITTERSUM K *et al.*, 2003). Para o nível de produção **potencial**, os fatores são determinantes e definem o potencial produtivo ou a produção máxima que pode ser atingida por uma espécie em um determinado ambiente. Radiação solar, concentração de CO₂ atmosférico, temperatura e características genéticas da cultura (fisiologia, fenologia e arquitetura) são os principais fatores determinantes para este nível de produção. Neste cenário, a cultura deve estar bem suprida de água e nutrientes, e completamente livre de pragas, doenças, plantas invasoras ou qualquer fator que possa reduzir seu crescimento. No nível de produção **atingível**, os fatores são limitantes, correspondendo ao nível de produção de uma cultura em um ambiente com disponibilidade de água e nutrientes limitada. Para o nível de produção **real**, os fatores são considerados redutores, ou seja, causam danos à estrutura vegetal afetando assim o seu desenvolvimento. Neste nível os fatores podem ser bióticos, como pragas, doenças e plantas invasoras, ou abióticos, como poluentes ou salinidade do solo.

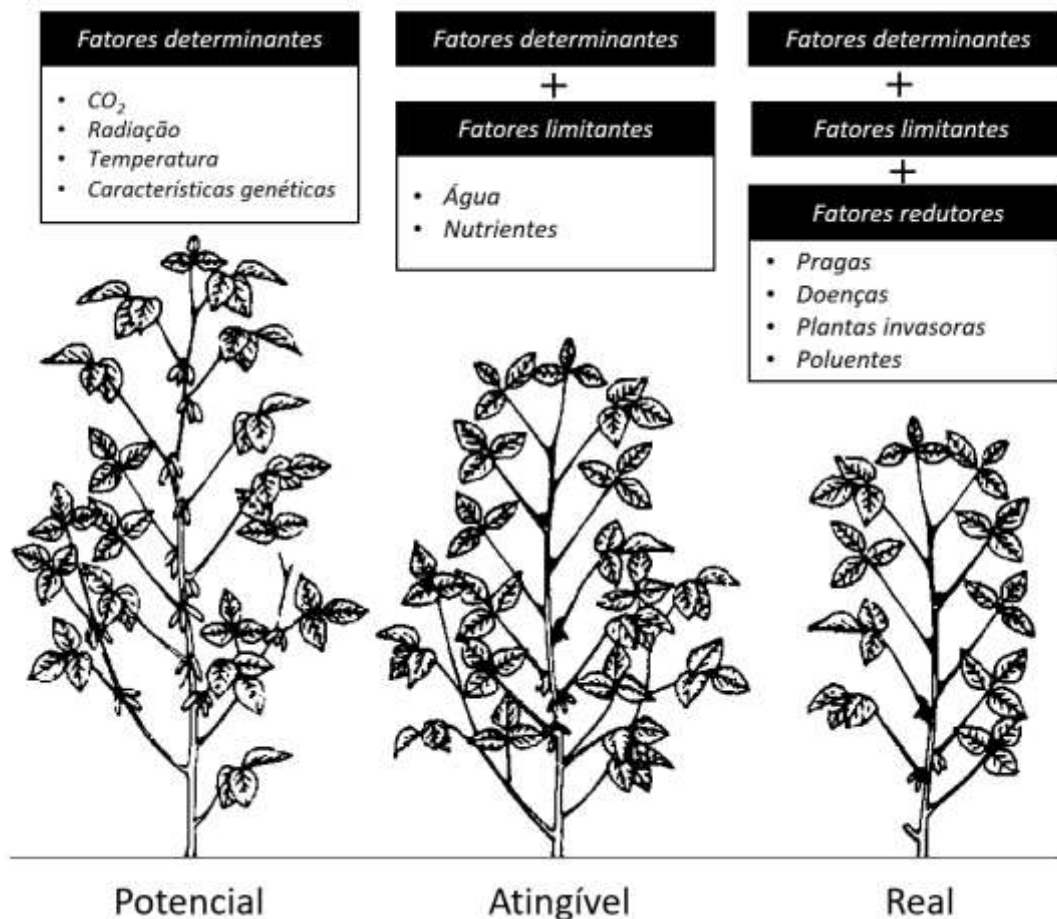


Figura 2. Hierarquia de fatores de crescimento e níveis de produção. Adaptado de (VAN ITTERSUM K et al., 2003).

O modelo agrometeorológico é capaz de simular o nível de produção potencial e atingível. Portanto, os principais fatores determinantes considerados são radiação, temperatura e características genéticas da cultura. A concentração de CO_2 atmosférico é considerada constante. Os efeitos da disponibilidade de nutrientes podem ser variados para diferentes tipos de culturas, combinar esses efeitos ao de indisponibilidade hídrica exige um nível mais detalhado sobre a dinâmica de absorção e sintetização destes nutrientes pela cultura. Portanto, para as simulações, o modelo considera que a cultura está bem suprida de nutrientes e único fator limitante é a disponibilidade hídrica.

Desta forma, para simular os diferentes níveis de produção o modelo agrometeorológico necessita simular as condições atmosféricas (radiação solar, temperatura, CO_2) e de disponibilidade hídrica no solo. A seguir serão abordados os principais conceitos utilizados no modelo para sua execução.

3.2 Desenvolvimento da cultura

O termo desenvolvimento vegetal refere-se a um conjunto de processos de produção e diferenciação de tecidos e estruturas ao longo de sua vida. A partir deste

conjunto de processos são produzidas novas estruturas diferenciáveis (caules, raízes, folhas, flores etc) que são criadas a partir de aglomerados de células indiferenciadas chamados meristemas. O desenvolvimento vegetal normalmente apresenta padrões, que se refletem no crescimento da cultura e, com bases nestes padrões, a fenologia classifica as fases de desenvolvimento de acordo com o tipo de mudança morfológica e sua periodicidade. A identificação das fases fenológicas é muito útil no planejamento agrícola, sendo seu acompanhamento de fundamental importância no auxílio de tomadas de decisões operacionais no campo.

Embora seja possível encontrar diferentes fases fenológicas expressas em dias para diversas culturas (Tabela 1), a periodicidade das fases fenológicas não costuma seguir o tempo cronológico. Diferentemente dos mamíferos, as espécies vegetais não possuem a capacidade de controlar sua própria temperatura e, como consequência, as reações que governam seu metabolismo são diretamente relacionadas à temperatura do ambiente. Além disso, algumas de suas estruturas são sensíveis às alterações no ambiente que desencadeiam processos fisiológicos conforme a duração do dia, disponibilidade hídrica, impacto ou ataque por pragas e doenças.

Tabela 1. Fases fenológicas de diferentes culturas expressas em dias.

Cultura	Emerg.	D. Inicial	Cres. Veg.	Flo. /Mat.	Total
Soja	15-20	15-35	40-60	15-25	85-140
Algodão	30-45	50-90	45-60	45-55	180-225
Milho	20-30	35-50	40-60	30-50	125-180
Sorgo	20-20	35-35	40-45	30-30	130-140
Arroz	30-30	30-30	60-80	30-40	150-180
Cana (planta)	35-75	60-105	190-330	120-210	405-720
Cana (soca)	25-35	50-105	135-210	50-70	280-420
Batata	25-45	30-35	40-70	20-30	125-165
Trigo	15-40	25-60	40-65	20-40	120-200

Fonte: FAO (<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0b.htm>)

Uma das formas de considerar os efeitos do ambiente no desenvolvimento da cultura e obter uma boa estimativa de sua duração é pelo computo do somatório térmico (cuja unidade é °C dia e daí o termo graus-dias). Esta medida leva em conta a temperatura ambiente em que cultura está descontando um limiar no qual o desenvolvimento é estacionário. Este limiar é denominado temperatura base inferior, sendo um valor de temperatura no qual abaixo dele não há desenvolvimento da cultura. O para se computar os graus-dias de um período é pela equação 3.1, quando a temperatura média do ar é maior ou igual à temperatura base (T_b). Desta forma o somatório térmico é determinado pela integração de todos graus-dias contabilizados durante o desenvolvimento da cultura (eq. 3.2).

$$GD_i = T_{med_i} - T_b \quad \text{Quando } T_{med_i} \geq T_b \quad (3.1)$$

$$GDT = \sum_{i=1}^n (GD_i) \quad (3.2)$$

em que GD_i e T_{med_i} é, respectivamente, o total de graus-dias ($^{\circ}C$ dia) no período e a temperatura média ($^{\circ}C$) do período i ; GDT é o somatório térmico ($^{\circ}C$ dia) e; T_b é a temperatura base inferior da cultura ($^{\circ}C$).

Existem diferentes métodos para o computo dos graus-dias para diferentes culturas, alguns ponderam as temperaturas mínimas e máximas e/ou consideram temperaturas ótimas e máximas para desenvolvimento da cultura (BONHOMME, 2000; CAICEDO *et al.*, 2012; LOGAN & COFFEY, 1995). Como este modelo agrometeorológico opera em escala decendial (dez dias), amenizando a variabilidade meteorológica, o método simples (eq. 3.1) é empregado no computo da soma térmica.

Dessa forma o modelo agrometeorológico considera as diferentes fases fenológicas nas simulações. Essas fases são informadas como parâmetros podendo ser expressas em número de dias ou em graus-dias. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é possível obter alguns valores médios de temperatura base para diferentes culturas.

Tabela 2. Temperatura base de desenvolvimento para diferentes culturas.

Cultura	T_b ($^{\circ}C$)
Milho	8,0
Trigo, cevada, aveia	4,5
Batata	7,0
Girassol	6,0
Cana	9,5
Arroz	9,0
Canola	5,0
Pastagem	5,0
Tomate	13,0
Espinafre	2,2
Amendoim	11,5
Algodão	12,5
Sorgo	8,0

*Valores podem variar entre diferentes cultivares.

De forma geral, pode-se considerar temperaturas bases entre 0 a $3^{\circ}C$ para culturas originárias de climas temperados, e de 9 a $14^{\circ}C$ para culturas de origem tropical (KROES *et al.*, 2009). Além disso, a duração do dia (fotoperíodo) deve ser levada em consideração para algumas espécies e cultivares. O fotoperiodismo afeta a taxa de desenvolvimento da cultura na fase de crescimento vegetativo, atrasando ou adiantando o florescimento, normalmente. Para incluir o efeito do fotoperíodo na taxa de desenvolvimento da fase vegetativa é possível usar a correção proposta pela equação 3.3.

$$Fcd_i = \frac{Cd_i - Cdc}{Cdm - Cdc} \quad (3.3)$$

em que Fcd_i é o fator de correção (adimensional) do desenvolvimento pelo fotoperiodismo no período i ; Cd_i é comprimento (horas) do dia i ; Cdc é o comprimento mínimo do dia (horas) para ocorrer desenvolvimento e; Cdm é o comprimento mínimo do dia (horas) para ocorrer o desenvolvimento ótimo. Vale ressaltar que para cultivares modernas o efeito do fotoperiodismo é pouco pronunciado, ou totalmente suprimido, podendo ser ignorado quando escolhidas as somas térmicas apropriadamente (KROES *et al.*, 2009).

3.3 Crescimento da cultura

Crescimento de uma cultura é o termo que designa o acúmulo de biomassa por meio da fotossíntese. Para uma planta desempenhar o processo de fotossíntese eficientemente é preciso que esta esteja bem suprida de água, luz e CO₂. Nessas condições a cultura é capaz de sintetizar os substratos (CH₂O) necessários para manutenção, crescimento estrutural e reservas. Pode se diferenciar três tipos de fotossíntese, C₃, C₄ e CAM (ou MAC, “Metabolismo do Ácido das Crassuláceas”). Os três tipos possuem como base o metabolismo C₃, que sintetiza as moléculas de glicose por meio da proteína RuBisCO (ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase).

O que diferencia as plantas de metabolismo C₄ é a mudança morfológica que ocorreu nas folhas (anatomia Kranz), aumentando a eficiência do processo de fotossíntese. Após anos de evolução as plantas C₄ desenvolveram uma camada adicional de células envolvendo os feixes vasculares, denominada bainha vascular. O CO₂ então é captado nas células do mesófilo pela enzima fosfoenolpiruvato carboxilase (PEP-carboxilase) a qual forma um composto de 4 carbonos que poderá ser descarboxilado a 3PGA e usado pela RuBisCO no interior das células da bainha vascular. Desta forma, as plantas de metabolismo C₄ concentram dez vezes mais CO₂ em torno da RuBisCO, suprimindo a fotorrespiração e aumentando assim a eficiência da fotossíntese.

As plantas de metabolismo CAM também possuem a proteína PEP-carboxilase, operando de maneira similar às C₄. Entretanto, em contraste às C₄ e C₃, as plantas com fotossíntese CAM abrem os seus estômatos e fixam o gás carbônico à noite, sob a forma de ácido málico. Durante o período de luminosidade, os estômatos permanecem fechados, e o CO₂ é liberado mesófilo foliar e fixado pela RuBisCO. Além de aumentar a eficiência da fotossíntese, esse mecanismo trata-se de um meio altamente eficaz de conservação de água, sendo pertencente a plantas de clima semiárido (TAIZ *et al.*, 2015).

Além de água, luz e CO₂, a fotossíntese sofre influência da temperatura, que age diretamente na velocidade das reações das enzimas e metabolismo da planta além de diminuir a solubilidade de CO₂ com seu aumento. Desta forma, os quatro fatores agem simultaneamente sobre o processo de fotossíntese, afetando diretamente a taxa de crescimento da cultura.

No modelo agrometeorológico, a concentração de CO₂ atmosférica é considerada constante. Para simular o nível de produção potencial considera-se a intensidade luminosa e temperatura, e para o nível de produção atingível adiciona-se o fator hídrico na simulação. A intensidade luminosa é computada pela quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (RFA, ou do inglês PAR) interceptada pelo dossel da cultura.

A radiação PAR, que corresponde a radiação na faixa do espectro visível (400-700nm), é determinada como aproximadamente a metade da radiação solar global (eq. 3.5), que por sua vez, pode ser inserida como dado de entrada ou estimada pelo método de Hargreavs-Samani (MONTEITH & UNSWORTH, 2012; SAMANI, 2000). Este método leva em conta a amplitude térmica (ΔT) e um fator de correção (a), sendo em torno de 0,16 para regiões situadas no interior do continente e 0,19 para localidades litorâneas ou próximas a grandes corpos d'água (eq. 3.4).

$$Qg_i = Qo_i \cdot a \cdot \sqrt{\Delta T_i} \quad (3.4)$$

$$PAR_i = Qg_i \cdot 0,5 \quad (3.5)$$

em que, Qg_i e Qo_i é, respectivamente, a radiação solar global e extraterrestre ($MJ m^{-2} d^{-1}$) do período i ; ΔT_i é a diferença entre a temperatura máxima e mínima do período i ; “ a ” é coeficiente de ajuste do método e; PAR_i é a radiação fotossinteticamente ativa do período i . Qo_i é determinado com base na latitude e dia do ano por meio de cálculos astronômicos de relação Terra-Sol (MONTEITH & UNSWORTH, 2012).

O principal componente vegetal responsável pela interceptação da radiação é o dossel vegetativo. Sua descrição quantitativa é essencial para compreensão dos processos vegetais, uma vez que suas características explicam em grande parte como ocorrem as trocas de massas e energia entre as plantas e atmosfera. A maneira mais comum de se quantificar o dossel vegetativo de uma cultura é por meio do índice de área foliar (IAF), que é a medida de área de foliar por unidade de espaço (por exemplo, m^2 [folha]/ m^2 [solo]).

Outro aspecto de importância neste contexto é o ângulo de inserção foliar, regulando a quantidade de energia retida pela folhagem. Uma descrição precisa do padrão de distribuição da radiação na copa é difícil porque o aspecto randômico da distribuição das folhas, seu ângulo de inserção em relação ao ângulo zenital e as propriedades espectrais das folhas são fatores complexos para serem representados matematicamente. Há, contudo, algumas simplificações que não acarretam em perda de qualidade das simulações e viabilizam a compreensão e estimativa das relações radiativas na vegetação. A principal delas é uso do coeficiente de extinção (k), que pode ser descrito como a habilidade do dossel em barrar a radiação que o atravessa. Assim, em dosséis compostos por folhas com ângulos de inserção mais elevados (vertical), o valor de k é menor e sua capacidade de absorção é menor, comparada a dosséis vegetativos compostos por folhas horizontais, com coeficiente k elevado.

Desta forma, o modelo agrometeorológico computa a quantidade de radiação PAR absorvida pela cultura com base no seu índice de área foliar e coeficiente extinção. A quantidade de PAR absorvida pode ser determinada pela relação exponencial negativa entre a quantidade de radiação PAR efetiva (descontada a fração refletida) e o IAF da cultura, conforme a lei de Beer (eq. 3.6).

$$aPAR_i = PAR_i (1 - r) \cdot (1 - e^{-k \cdot IAF}) \quad (3.6)$$

em que $aPAR_i$ é a radiação absorvida pelo dossel da cultura ($MJ m^{-2} d^{-1}$) no período i ; PAR_i é a radiação PAR que chega ao topo do dossel vegetativo ($MJ m^{-2} d^{-1}$) no período i ; r corresponde à fração refletida (albedo) pelo dossel vegetativo (0-1); k e IAF são, respectivamente, o coeficiente de extinção e o índice de área foliar do dossel da cultura (MONTEITH & UNSWORTH, 2012).

Os valores de IAF são parâmetros que devem ser informados no modelo agrometeorológico, variando conforme as fases de desenvolvimento da cultura. Os parâmetros k e r também devem ser informados no modelo, sendo considerados fixos durante as simulações. Alguns valores médios de k e r são expressos na Tabela 3, porém vale ressaltar que estes valores podem variar entre cultivares da mesma espécie e tipo de manejo (espaçamento ou cobertura do solo), e quando utilizados na escala horaria devem variar conforme o ângulo zenital. Além disso, uma das premissas do uso da lei de Beer

(eq. 3.6) é de que o dossel vegetativo da cultura deve ser homogêneo, portanto este método não representa o padrão de absorção para culturas esparsas ou desuniformes.

Tabela 3. Coeficiente de extinção (k) e reflectância (r) do dossel vegetativo para diferentes culturas.

Cultura	k	r
Milho	0,50	0,14
Girassol	0,85	0,10
Trigo	0,50	0,10
Soja	0,55	0,18
Cana	0,60	0,15
Pasto	0,70	0,20

Desta forma, com o montante de energia radiante absorvida (aPAR) pela cultura é então possível obter uma boa estimativa da quantidade biomassa acumulada pela planta. A maneira mais simples de se determinar esta variável é por meio da razão entre medidas de massa de matéria seca da cultura, geralmente da parte aérea, e a quantidade de radiação PAR absorvida. Esta relação representa a eficiência do uso da radiação (EUR ou mais comumente RUE, do inglês “*Radiation Use Efficiency*”) que é dada pela unidade de massa por energia absorvida (g MJ^{-1}). Sua determinação deve ser feita para nível de produção potencial, ou seja, com a cultura sem limitação nutricional, hídrica ou por pragas e doenças. Com isto, fica fácil de se determinar o crescimento potencial de uma cultura, apenas multiplicando a quantidade absorvida de radiação pela eficiência de conversão em biomassa.

No modelo agrometeorológico é preciso informar o parâmetro de eficiência do uso da radiação para cultura em questão. A Tabela 4 reúne alguns valores médios de RUE para diferentes culturas. Lembrando que este parâmetro deve ser derivado para o nível potencial e considerando somente radiação PAR efetivamente absorvida. Com objetivo de se simular os outros níveis de produção (Figura 2) é possível encontrar trabalhos que incluam alguns fatores de correção ao RUE conforme manejo ou condições ambientais.

Tabela 4. Eficiência do uso da radiação para diferentes culturas.

Cultura	RUE ($\text{g}_{\text{MS}} \text{MJ}_{\text{IPAR}}^{-1}$)
Algodão	1,61
Arroz	2,20
Cana (planta)	1,80
Cana (soca)	1,65
Girassol	2,20
Milho	3,30
Soja	1,76
Sorgo	2,80
Trigo	2,80

*Unidade em $[\text{Massa seca}] / [\text{Radiação interceptada}]$.

Até este ponto, o modelo agrometeorológico simula a condição potencial de crescimento com base apenas na radiação PAR absorvida pelo dossel, sendo a RUE um parâmetro. No entanto, é preciso incluir o efeito da temperatura no crescimento, já que a RUE foi determinada para condições favoráveis de crescimento e o modelo deve ser capaz de simular seu crescimento em diferentes condições. Para isso, o modelo faz uso de um fator de correção empírico (fT) baseado na abordagem de graus-dias. Desta forma, o fator de correção térmico reduz a taxa de crescimento da cultura em condições de baixas ou

muito elevadas temperaturas. Para tanto, o usuário deve informar os parâmetros que definem os intervalos ótimos de crescimento conforme Figura 3. Em que T_b é a temperatura base para desenvolvimento, To_1 e To_2 é o intervalo de temperatura ótima para crescimento, e TB é a temperatura base máxima para crescimento.

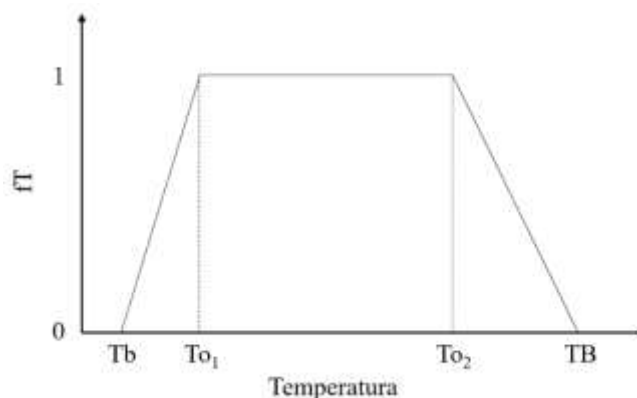


Figura 3. Descrição gráfica do fator de temperatura do ar determinante para o crescimento de culturas.

Com isto, a simulação do crescimento da cultura em nível potencial inclui radiação e temperatura, enquanto que o CO_2 atmosférico, como dito anteriormente, é considerado constante e seu efeito é negligenciado. A biomassa total acumulada deve ser então corrigida por um fator denominado índice de colheita (IC), que corresponde à fração da biomassa total da planta que possui valor comercial (grãos, frutos, colmos, etc.). Para se obter o valor de produção final ainda é preciso incluir a umidade da biomassa, pois a RUE da cultura é determinada para base de matéria seca. Finalmente, a equação que descreve a taxa de crescimento da cultura no modelo é dada por:

$$\frac{dPp_i}{dt} = \frac{RUE \cdot APAR_i \cdot fT_i \cdot IC}{100(1-u)} \cdot NDP_i \quad (3.7)$$

Em que dPp_i é a taxa de crescimento potencial expressa em produtividade ($t \text{ ha}^{-1}$) para o período i ; RUE é a eficiência do uso de radiação da cultura ($g_{ms} \text{ MJ}_{IPAR}^{-1}$); IC é o índice de colheita (0-1); u é a fração de umidade da matéria-prima (0-1) e; $APAR_i$, fT_i e NDP_i são, respectivamente, a radiação PAR absorvida ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), fator de correção por temperatura (0-1) e número de dias do período i , o valor 100 foi adicionado para conversão de unidades ($g \text{ m}^{-2}$ para $t \text{ ha}^{-1}$). O índice de colheita e a umidade da matéria prima, também são parâmetros que devem ser informados previamente pelo usuário no momento da simulação.

Os parâmetros de umidade da matéria-prima (u) e índice de colheita (IC) devem ser fornecidos pelo usuário. De acordo com as datas de plantio e colheita os valores de crescimento são integrados ao longo do ciclo da cultura resultando no valor final de produtividade potencial. A produção em nível atingível é simulada de maneira similar (eq. 3.7), porém, adiciona-se o componente hídrico que é determinado em função do balanço hídrico sequencial do solo.

3.4 Balanço hídrico sequencial

Para simular a disponibilidade de água no solo para a cultura, o modelo agrometeorológico utiliza o método de balanço hídrico sequencial de Thornthwaite e Mather (1955). Este método busca determinar a variação do armazenamento de água vertical do solo (ARM) com base no extrato hídrico (eq. 3.8), considerando precipitação e irrigação como principal entrada de água e a evapotranspiração e drenagem profunda como saída do solo.

$$\frac{dARM_i}{dt} = P_i + I_i - (ETR_i + EXC_i) \quad (3.8)$$

em que $dARM_i$ é a variação do armazenamento de água no solo (mm) no período i ; P é a precipitação total (mm); I é a irrigação total (mm); ETR é a evapotranspiração real da cultura (mm) e; EXC é o excedente hídrico total (mm) do período, representando a percolação abaixo do sistema radicular, todos referentes ao período i (dt).

Para se determinar o armazenamento (ARM) é imprescindível conhecer a máxima quantidade de água que o solo pode armazenar sendo está efetivamente disponível para absorção pelas raízes. Esta quantidade, comumente denominada CAD (Capacidade de Água Disponível), é determinada pela diferença entre o ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de campo (CC) do solo. O PMP é definido como o teor de água no solo no qual as plantas murcham e não mais recuperam a turgidez, mesmo que sejam colocadas em câmara escura e úmida (TAIZ), ou como o teor de água no solo cujo potencial mátrico seja inferior à -1,5 Mpa, impossibilitando a absorção de água pelas raízes. A CC é o teor de água no solo no momento em que as forças do potencial mátrico do solo superam a força gravitacional, cessando a drenagem do solo, ou seja, qualquer volume de água adicionada a um solo na capacidade de campo é drenado para camadas mais profundas. Com base na análise física do solo, pode se determinar sua CAD pela seguinte equação (3.9):

$$CAD = (CC\% - PMP\%) \cdot ds \cdot z_r \cdot 10 \quad (3.9)$$

em que CAD é a capacidade de água disponível para planta (mm); $CC\%$ e $PMP\%$ são respectivamente a capacidade campo e ponto de murcha permanente do solo, em porcentagem com relação a massa da amostra (0-1); ds é a densidade do solo ($g\ cm^{-3}$) e; z_r é a profundidade efetiva (cm) do sistema radicular da cultura, onde se concentram 80% das raízes (Tabela 5); 10 é o fator de conversão de volume (cm para mm). Quando os valores de CC e PMP são expressos em relação ao volume, não é necessário o uso da densidade do solo na equação 3.9.

Tabela 5. Profundidade efetiva de sistemas radiculares para diferentes culturas (ALFONSI et al., 1990).

Cultura	Zr (cm)
Hortaliças	10 - 20
Arroz, batata, feijão	20 - 30
Trigo	30 - 40
Milho e soja	40 - 50
Amendoim	50 - 60
Cana, citrus, cafeeiro	70 - 100

De maneira geral, solos mais arenosos possuem CAD menor que solos argilosos devido a sua maior fração de macroporos, em contrapartida, apesar de apresentar maior CAD, solos mais argilosos possuem PMP elevados exigindo maior volume de água atingir a quantidade disponível para cultura (Tabela 6).

Tabela 6. Densidade, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e capacidade de água disponível (CAD) para plantas com profundidade efetiva do sistema radicular igual a 60 cm determinada para diferentes texturas de solo.

Textura do solo	Densidade (g cm ⁻³)	CC (%)	PMP (%)	CAD* mm
Arenoso	1,65 (1,55 - 1,8)	9 (6 - 12)	4 (2 - 6)	50 (37 - 65)
Franco arenoso	1,5 (1,4 - 1,6)	14 (10 - 18)	6 (4 - 8)	72 (50 - 96)
Franco	1,4 (1,35 - 1,5)	22 (18 - 26)	10 (8 - 12)	101 (81 - 126)
Franco argiloso	1,35 (1,3 - 1,4)	27 (23 - 31)	13 (11 - 15)	113 (94 - 134)
Siltoso argiloso	1,3 (1,25 - 1,35)	31 (27 - 35)	15 (13 - 17)	125 (105 - 146)
Argiloso	1,25 (1,2 - 1,3)	35 (31 - 39)	17 (17 - 19)	135 (101 - 156)

*Considerando um sistema radicular com profundidade efetiva de 60 cm.

No modelo agrometeorológico, o valor da CAD é considerado um parâmetro. Com isto, é possível simular a extração e reposição de água do solo de acordo com o balanço entre precipitação e evapotranspiração da cultura. A evapotranspiração da cultura, definida como o montante de água evaporada e transpirada pela cultura, é determinada pelo método proposto por Doorenbos & Kassam (1979), no qual a evapotranspiração da cultura (ET_c, ou ETP) é estimada com base na evapotranspiração de referência (ET_o) e um coeficiente de ajuste (K_c), conforme equação 3.10. A ET_c é o volume máximo de água evapotranspirado pela cultura sem restrições hídricas, nutricionais ou por pragas e doenças. Enquanto que a ET_o é a evapotranspiração de uma extensa superfície com vegetação rasteira (normalmente gramado), cobrindo totalmente o solo, com altura de 8 a 15 cm e IAF próximo à 3, sem restrições hídricas, nutricionais ou por pragas e doenças. Esta variável foi convencionalmente adotada como referência por ser o padrão de vegetação proposto em todas estações meteorológicas e, portanto, pode ser considerada uma variável meteorológica que expressa o potencial de evapotranspiração para as condições meteorológicas vigentes.

$$ETc_i = ETo_i \cdot kc_f \quad (3.10)$$

Em que ET_c_i e ET_o_i são, respectivamente, a evapotranspiração da cultura e de referência (mm) no período i e; K_c_f é o coeficiente de cultivo (adimensional) da cultura para fase desenvolvimento f. No modelo agrometeorológico é possível informar os valores de ET_o_i, caso esses valores não forem informados, é utilizado o método empírico de Camargo (1983) para estimar a Eto em períodos de 10 ou 30 dias (eq. 3.11), e o método modificado de Priestley e Taylor (1972), para períodos diários (RITCHIE, 1998).

$$ETo = F \cdot \frac{Q_o}{\lambda} \cdot 0,36(3Tmax - Tmin) \cdot NDP \quad (3.11)$$

em que Q_o é a radiação solar global extraterrestre (MJ m⁻² d⁻¹); Tmax e Tmin são, respectivamente, a temperatura máxima e mínima do período; λ é o calor latente de vaporização da água (2,45 MJ kg⁻¹); NDP é o número de dias do período e; F é o fator de

ajuste igual à 0,011 proposto por Camargo (1983). Vale ressaltar que inúmeros métodos para estimar a ETo estão disponíveis na literatura (PEREIRA & VILLA NOVA & SEDIYAMA, 1997), sendo a parametrização do método de Penman-Monteith considerado a metodologia padrão pela FAO (ALLEN *et al.*, 1998). No entanto, o método de Camargo foi selecionado por ser relativamente simples, requerendo apenas a temperatura e latitude do local, além de ter sido desenvolvido para as condições brasileiras.

O Kc integra o efeito de diversos fatores na evapotranspiração de uma superfície, variando conforme o tipo de cultura, seu estágio de desenvolvimento e práticas de manejo (cobertura do solo, espaçamento). Sua determinação é dada pela razão entre ETc e ETo, portanto, as condições de sua determinação devem ser para a cultura sem restrições hídricas, nutricionais ou por pragas e doenças. A FAO apresenta uma compilação dos valores de Kc para as principais culturas ao longo de seu ciclo (DOORENBOS & KASSAN, 1979), que vem sendo utilizados para determinação da ETc quando não se tem dados determinados no local de interesse (Tabela 7).

Tabela 7. Coeficiente de cultura (Kc) nos vários estádios de seu desenvolvimento. Adaptado de (DOORENBOS & KASSAN, 1979) ⁽¹⁾

Cultura	Estádios de desenvolvimento da cultura ⁽²⁾					Período total de crescimento
	I	II	III	IV	V	
Alfafa	0,3-0,4				1,05-1,2	0,85-1,05
Algodão	0,4-0,5	0,7-0,8	1,05-1,25	0,8-0,9	0,65-0,7	0,8-0,9
Amendoim	0,4-0,5	0,7-0,8	0,95-1,1	0,75-0,85	0,55-0,6	0,75-0,8
Arroz	1,1-1,15	1,1-1,5	1,1-1,3	0,95-1,05	0,95-1,05	1,05-1,2
Banana						
- tropical	0,4-0,5	0,7-0,85	1,0-1,1	0,9-1,0	0,75-0,85	0,7-0,8
- sub-tropical	0,5-0,65	0,8-0,9	1,0-1,2	1,0-1,15	1,0-1,15	0,85-0,95
Batata	0,4-0,5	0,7-0,8	1,05-1,2	0,85-0,95	0,7-0,75	0,75-0,9
Beterraba	0,4-0,5	0,75-0,85	1,05-1,2	0,9-1,0	0,6-0,7	0,8-0,9
Cana	0,4-0,5	0,7-1,0	1,0-1,3	0,75-0,8	0,5-0,6	0,85-1,05
Cebola						
- seca	0,4-0,6	0,7-0,8	0,95-1,1	0,85-0,9	0,75-0,85	0,8-0,9
- verde	0,4-0,6	0,6-0,75	0,95-1,05	0,95-1,05	0,95-1,05	0,65-0,8
Ervilha	0,4-0,5	0,7-0,85	1,05-1,2	1,01-1,15	0,95-1,1	0,8-0,95
Feijão						
- verde	0,3-0,4	0,65-0,75	0,95-1,05	0,9-0,95	0,85-0,95	0,85-0,9
- seco	0,3-0,4	0,7-0,8	1,05-1,2	0,65-0,75	0,25-0,3	0,7-0,8
Fumo	0,3-0,4	0,7-0,8	1,0-1,2	0,9-1,0	0,75-0,85	0,85-0,95
Girassol	0,3-0,4	0,7-0,8	1,0-1,2	0,7-0,8	0,35-0,45	0,75-0,85
Melancia	0,4-0,5	0,7-0,8	0,95-1,05	0,8-0,9	0,65-0,75	0,75-0,85
Milho						
- verde	0,3-0,5	0,7-0,9	1,05-1,2	1,1-1,15	0,95-1,1	0,8-0,95
- grãos	0,3-0,5	0,8-0,85	1,05-1,2	0,8-0,95	0,55-0,6	0,75-0,9
Pimenta (fresca)	0,3-0,4	0,6-0,75	0,95-1,1	0,85-1,0	0,8-0,9	0,7-0,8
Repolho	0,4-0,5	0,7-0,8	0,95-1,1	0,9-1,0	0,8-0,95	0,7-0,8
Soja	0,3-0,4	0,7-0,8	1,1-1,15	0,7-0,8	0,4-0,5	0,75-0,9
Sorgo	0,3-0,4	0,7-0,75	1,1-1,15	0,75-0,8	0,5-0,55	0,75-0,85
Tomate	0,4-0,5	0,7-0,8	1,05-1,25	0,8-0,95	0,6-0,65	0,75-0,9
Trigo	0,3-0,4	0,7-0,8	1,05-1,2	0,65-0,75	0,2-0,25	0,8-0,9
Videira	0,35-0,55	0,6-0,8	0,7-0,9	0,6-0,8	0,55-0,7	0,55-0,75

(1) Primeiro número: sob alta umidade relativa ($UR_{min} > 70\%$) e vento fraco ($V < 5\text{m/s}$). Segundo número: Sob baixa umidade relativa ($UR_{min} < 20\%$) e vento forte ($V > 5\text{m/s}$).

(2) Caracterização dos estádios

Estádio I: Da germinação até 10% de cobertura solo

Estádio II: De 10 a 80% de cobertura do solo

Estádio III: De 80% da cobertura do solo até o início do amadurecimento

Estádio IV: Do início do amadurecimento até a colheita

Estádio V: Colheita

Com isto, uma função exponencial é adotada para representar a extração de água do solo, ao passo que a reposição é direta, simplesmente somando-se o saldo positivo do balanço entre precipitação (P), irrigação (I) e evapotranspiração (ETc) ao armazenamento de água do solo (ARM). A extração de água no solo é computada em períodos onde ocorre saldo negativo ($P + I - ETc < 0$), sendo o ARM função do negativo acumulado (eq. 3.12). Quando o saldo hídrico é positivo ($P + I - ETc \geq 0$), o montante é somado diretamente ao ARM e o negativo acumulado é recalculado conforme equação 3.13 e 3.14. A evapotranspiração real (ETr) é então calculada de acordo com a disponibilidade hídrica do solo (ARM). Quando o saldo hídrico do período é maior ou igual a evapotranspiração da cultura, a ETr é considerada igual à Etc. Em contrapartida, quando o saldo hídrico é negativo, a ETr é o valor mínimo entre a CAD e a soma da precipitação, irrigação e alteração no armazenamento (eq. 3.15).

$$ARM_i = CAD \cdot e^{-|NAC_i/CAD|} \quad \text{Quando } (P + I - ETc < 0) \quad (3.12)$$

$$ARM_i = P_i + I_i - ETc_i \quad \text{Quando } (P + I - ETc \geq 0) \quad (3.13)$$

$$NAC_i = CAD \cdot \ln\left(\frac{ARM_i}{CAD}\right) \quad \text{Quando } (P + I - ETc \geq 0) \quad (3.14)$$

$$ETr_i = \min(CAD, P_i + I_i + |ARM_i - ARM_{i-1}|) \quad \text{Quando } (P + I - ETc < 0) \quad (3.15)$$

em que ARM_i é o armazenamento de água (mm) disponível para cultura no período i ; CAD é a capacidade de armazenamento disponível do solo (mm); NAC_i é o negativo acumulado (mm) do período i ; P e I são respectivamente a precipitação e a irrigação total do período i (mm) e; ETr_i é a evapotranspiração real da cultura (mm).

Desta forma, é possível simular o volume de água consumido pela cultura em nível potencial (ETc) e com restrição hídrica (ETr). Em 1979, Doorenbos e Kassan propuseram uma equação simples que relaciona a redução relativa da taxa de crescimento da cultura com seu consumo hídrico relativo (eq. 3.16). A redução relativa é função da evapotranspiração potencial e real da cultura e de um coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico, denominado Ky . Desta forma pode se estimar a taxa de crescimento a nível atingível de uma cultura pela equação 3.17.

$$\left(1 - \frac{Pa}{Pp}\right) = ky \left(1 - \frac{ETr}{ETc}\right) \quad (3.16)$$

$$\frac{dPa_i}{dt} = \frac{dPp_i}{dt} \left[1 - ky_f \left(1 - \frac{ETr_i}{ETc_i}\right)\right] \quad (3.17)$$

em que P_{a_i} e P_{p_i} são, respectivamente, as taxas de crescimento atingível e potencial da cultura ($t\ ha^{-1}$) no período i ; E_{Tr_i} e E_{Tc_i} são, respectivamente, a evapotranspiração real e potencial da cultura no período i e; ky_f é o coeficiente de sensibilidade de estresse hídrico (adimensional) da cultura para o estágio de desenvolvimento f . De forma similar ao K_c , o K_y varia conforme a cultura e seus respectivos estágios de desenvolvimento. Alguns valores de K_y médios para o ciclo de algumas culturas comerciais podem ser encontrados na Tabela 8. De forma geral, pode se interpretar os valores de K_y como: $K_y > 1$, cultura com alta sensibilidade ao estresse hídrico; $K_y = 1$, redução da taxa de crescimento da cultura é proporcional a redução do seu consumo hídrico e; $K_y < 1$, cultura com maior tolerância ao estresse hídrico e melhor capacidade de se recuperar de períodos de estresse hídrico (SMITH & STEDUTO, 2012).

Tabela 8. Coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico (K_y) para diferentes culturas (DOORENBOS & KASSAN, 1979)

Cultura	K_y	Cultura	K_y
Alfafa	1,1	Batata	1,10
Banana	1,27	Sorgo	0,90
Feijão	1,15	Soja	0,85
Repolho	0,95	Trigo precoce	1,15
Algodão	0,85	Trigo tardio	1,00
Amendoim	0,70	Beterraba	1,20
Milho	1,25	Cana-de-açúcar	0,95
Cebola	1,10	Girassol	1,05
Ervilha	1,15	Tomate	1,10
Pimenta	1,10	Melancia	1,05

Estes níveis de sensibilidade hídrica (K_y) variam conforme as fases de desenvolvimento da cultura (Figura 4). Durante período de maturação, a sensibilidade ao estresse hídrico é reduzida, devido ao fato da planta estar em período final de ciclo e baixa taxa de acúmulo de biomassa. Enquanto em estágios vegetativo, de florescimento e formação de grãos, a sensibilidade ao estresse hídrico é superior, pois a cultura está em pleno estágio de crescimento e desenvolvimento de estruturas e tecidos complexos (flores, grãos, frutos) que demandam elevado suprimento de substratos.

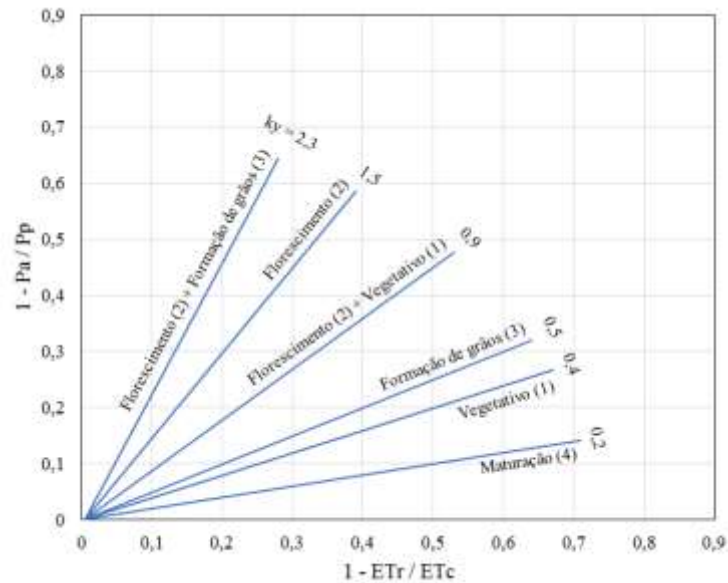


Figura 4. Coeficientes de sensibilidade ao estresse hídrico (K_y) expressos para diferentes fases desenvolvimento de culturas.

No modelo agrometeorológico, os parâmetros de K_c e K_y para cada fase de desenvolvimento da cultura devem ser informados pelo usuário. Para culturas não perenes, também deve ser informado um valor de K_c para a simulação do balanço hídrico na entre safra. O modelo ainda conta com a opção de irrigação automática, onde o usuário deve selecionar um fator p (0-1) para o controle da irrigação. Este fator é definido como a porcentagem do armazenamento máximo (CAD) na qual o sistema de irrigação deve ser acionado, elevando o teor de água no solo novamente para a capacidade de campo (CC). As lâminas brutas de irrigação são então contabilizadas de acordo com o fator de eficiências do sistema de irrigação (E_i) informado pelo usuário. Alguns valores de referência são informados na Tabela 9.

Tabela 9. Eficiência de diferentes sistemas de irrigação

Sistema de Irrigação	E_i
Inundação	30 – 50%
Sulcos de infiltração	40 – 60%
Aspersão convencional	75 – 85%
Auto-propelido	75 – 80%
Pivot-central	80 – 90%
Localizada	80 – 95%

3.5 Limitações do modelo agrometeorológico

Como dito anteriormente, um modelo é uma simplificação da realidade. Este modelo agrometeorológico foi desenvolvido para simular as produções potenciais e atingíveis de uma cultura, dentro das condições de contorno já mencionadas na sessão anterior. Dentro das condições de contorno, no entanto, existem algumas limitações que devem ser elucidadas ao usuário antes do uso deste modelo.

Por operar em escala decendial, este modelo não é capaz incluir perdas ou danos na cultura por adversidades climáticas, tais como geada, granizo, ou excedente hídrico. Estes eventos ocorrem na escala temporal horaria ou diária e, portanto, não podem ser identificados em escala decendial. Desta forma, nenhum dano ou possível morte da cultura por temperatura ou estiagem é incluída na simulação deste modelo. Embora o modelo utilize um fator empírico de correção para temperatura (fT), este fator busca apenas representar o efeito da temperatura do crescimento da cultura devido à redução da fotossíntese em baixas temperaturas ou altas temperaturas, incluídas aí a taxa de respiração de manutenção das estruturas vegetais e os efeitos sobre o processo fotossintético. Além disso, o uso do índice de colheita (IC) e umidade da matéria prima (u) como valores fixos, é uma abordagem muito simples para descrever o particionamento de biomassa da cultura e a dinâmica da água em seu crescimento.

A profundidade efetiva do sistema radicular é considerada constante e consequentemente a quantidade de água disponível (CAD) para cultura pode ser superestimada nas fases iniciais de seu desenvolvimento. Ao passo que a cultura se desenvolve a profundidade do sistema radicular aumenta, atingindo a máxima profundidade efetiva durante a fase vegetativa, desta forma, a quantidade disponível de água no solo para sua absorção aumenta ou diminui de acordo com a profundidade efetiva das raízes (BENTO *et al.*, [S.d.]). Além disso, diferentes camadas e horizontes do solo são negligenciados assumindo assim que o solo é homogêneo. Os teores de matéria orgânica, granulometria e compactação podem alterar o valor de ponto de murcha permanente e capacidade campo para as diferentes camadas de solo, alterando assim a CAD em cada camada e a dinâmica de evaporação do solo e absorção de água pelas raízes.

Apesar da sólida abordagem utilizada na formulação da relação entre consumo hídrico e produção da cultura (eq. 3.6), o uso dos coeficientes K_c e K_y para integrar os diversos efeitos na produção e consumo hídrico da cultura limitam o seu uso para aplicações que requerem maior acurácia dos resultados. Analisando uma extensa base de trabalhos dedicados a determinar o coeficiente K_y , Smith & Steduto (2012) encontraram alta variação nestes valores, sugerindo que a variação nos valores de K_y podem ser maiores entre cultivares da mesma espécie do que entre diferentes espécies. Da mesma forma, o coeficiente K_c possui alto nível de incerteza em sua determinação podendo variar conforme a demanda hídrica da cultura (MARIN *et al.*, 2016).

Integrar e isolar esses efeitos ainda é um grande desafio, pois cada componente do sistema pode interagir entre si (nutrientes, estrutura do solo, características genéticas etc) potencializando ou diminuindo o efeito no crescimento e desenvolvimento da cultura. Apesar das limitações em sua acurácia, este modelo é muito útil para planejamento, delineamento e operação de sistemas de irrigação e para uma rápida avaliação dos impactos na produção sob condições hídricas limitadas (SMITH & STEDUTO, 2012). Sendo exemplos de sua aplicação encontrados em estudos de risco climático (BATTISTI & SENTELHAS, 2015; MONTEIRO & SENTELHAS, 2014), na escala de bacias hidrográficas (XIAOJUAN & TONG & KANG, 2011) e campo (YACOUBI *et al.*, 2010), e em sistema de auxílio a tomada de decisão (GASTÉLUM & VALDÉS & STEWART, 2009).

3.6 Dados de entrada, parâmetros gerais e operação

Ao abrir a interface do modelo agrometeorológico (versão.1), o usuário terá duas abas, uma com instruções gerais (Instruções) e outro com a interface do modelo em si (Modelo). Existem três tipos de campos na interface do modelo agrometeorológico, os campos na cor bege, é onde devem ser inseridos os dados e parâmetros pelo usuário; os de cor roxa, é onde as variáveis de estado e resultados são calculadas e; os campos de cor azul são apenas o cabeçalho informando o tipo de dado da coluna.

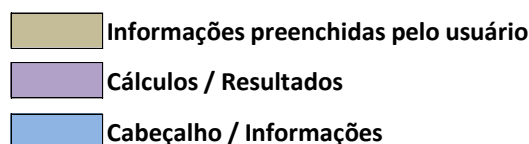


Figura 5. Tipos de campos encontrados na interface do modelo agrometeorológico.

Os dados de entrada obrigatórios para este modelo são temperatura do ar mínima e máxima média (°C) e precipitação (mm) total decendial ou diários. O modelo é capaz de operar em escala decendial (dez dias) ou diária, basta selecionar a opção desejada no campo “Escala Temporal” (1 para diária ou 2 para decendial). Além disso, o usuário pode informar a radiação solar global média ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$), a irrigação bruta total (mm) e a evapotranspiração de referência total ($mm\ decêndio^{-1}$). Obrigatoriamente, devem ser informados os anos e os decêndios ou dias correspondentes aos dados de entrada (Figura 6).

Ano*	Dia do Ano*	Tmax*	Tmin*	Qg	Precipitação*	Irrigação Bruta	Eto
		°C	°C	$MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$	mm	mm	mm
1978	1	30.7	19.8		0.0	0.0	
1978	2	27.2	17.4		6.0	0.0	
1978	3	21.4	13.6		0.5	0.0	
1978	4	23.2	14.3		0.0	0.0	
1978	5	28.8	17.2		0.0	0.0	
1978	6	31.5	19.0		16.4	0.0	
1978	7	29.0	17.5		0.0	0.0	
1978	8	30.1	19.2		3.8	0.0	
1978	9	32.4	19.2		2.2	0.0	
1978	10	30.6	19.4		3.7	0.0	
1978	11	29.7	18.4		0.0	0.0	

Figura 6. Dados de entrada para o modelo agrometeorológico de produção vegetal. Os campos com asterisco vermelho (*) são obrigatórios.

Dois botões estão disponíveis para ajustar o número de linhas e limpar os dados. Neste caso, o usuário deve informar no campo correspondente o número de decêndios ou dias total que terá em sua série histórica. Com este valor informado, o botão “Ajustar Linhas” irá estender ou diminuir o número de linhas dos campos de cálculos do modelo agrometeorológico. Ao clicar no botão “Limpar Dados” o usuário poderá limpar a série de dados de entrada, exceto parâmetros.

De forma similar aos dados de entrada, os parâmetros devem ser informados pelo usuário nos campos correspondentes. Existe dois campos principais de parâmetros, o de parâmetros correspondentes à simulação (Figura 7), que não variam com as fases de desenvolvimento da cultura, incluindo a opção de irrigação automática (“Sim/Não”).

Parâmetros do modelo	Valor	Unidade
Local	Piracicaba, SP	-
Latitude*	-22.7080	decimais
Longitude	-47.4170	decimais
Altitude	580	m
Temperatura base inferior (Tb)	6	°C
Temperatura ótima 1 (TO1)	18	°C
Temperatura ótima 2 (TO2)	32	°C
Temperatura base superior (TB)	40	°C
Dia do plantio*	62	decendio
Ciclo Cultura	120	dias
Kc (entre safras)*	0.4	adimensional
Eficiência do uso de Radiação [PAR]*	3.3	g MJ ⁻¹
Índice de Colheita (IC)*	0.33	0-1
Umidade matéria prima*	0.13	0-1
Coef. Extinção (k)*	0.55	adimensional
Refletividade da cultura (r) [Qg]*	0.16	0-1
CAD do solo*	100	mm
Neg. Acum. período Anterior*	0	mm
Coefficiente k - Qg (Eq. de Hargreaves)*	0.16	adimensional
Coefficiente de perda por colheita	0.05	0-1
Irrigação Automática	Não	Sim/Não
Fator P	0.8	0-1
Eficiência do sistema de irrigação	0.75	0-1
Escala Temporal	1	1 = dias; 2 = decendio
Número de dias ou decendios	12053	dias ou decendios

Figura 7. Parâmetros de simulação do modelo agrometeorológico

O campo dos parâmetros específicos para até 15 fases de desenvolvimento da cultura, incluindo a duração das fases (em dias ou graus-dias), os valores de IAF, Kc e Ky é representado pela Figura 8. A função que simula a duração do ciclo considera automaticamente os valores de graus-dias com base na equação 3.2, quando não disponíveis são considerados os valores em dias. Não é aconselhado permutar hora uma fase de desenvolvimento em graus-dias e outra em dias na mesma simulação.

Fase	Descrição da Fase	Duração (dias)*	Ciclo (dias)	Duração (Graus.dias)	Ciclo (Graus.dias)	IAF*	Kc*	Ky*
1	V1	10	10			1	0,6	0,4
2	V2	20	30			1,5	0,85	0,4
3	F1	10	40			2,5	1	0,9
4	F2	10	50			2,2	1,2	1,5
5	R1	20	70			2,5	1,3	2,3
6	R2	20	90			3	1,05	0,5
7	M	60	150			1,8	0,75	0,2
8	-		150					
9	-		150					
10	-		150					
11	-		150					
12	-		150					
13	-		150					
14	-		150					
15	-		150					

Figura 8. Parâmetros específicos para fases de desenvolvimento da cultura.

Os resultados são automaticamente computados ao inserir os dados de entrada e parâmetros do modelo. Um campo e um gráfico com a integração dos resultados de produção potencial ($t\ ha^{-1}$), atingível ($t\ ha^{-1}$) e irrigação bruta (mm) de cada ciclo está disponível para auxiliar nas análises dos resultados. Outro campo com os resultados gerais da simulação sumariza estas três variáveis pela média e desvio padrão da série.

4. Referências

- ADDISCOTT, T. M. Simulation modelling and soil behaviour. v. 60, p. 15–40, 1993.
- ALFONSI, R. R. *et al.* Métodos agrometeorológicos para controle da irrigação. (Boletim Técnico, 133). . Campinas: [s.n.], 1990.
- ALLEN, R. G. *et al.* Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO*, n. 56, p. 300, 1998. Disponível em: <<http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>>.
- BATTISTI, B. R.; SENTELHAS, P. C. DROUGHT TOLERANCE OF BRAZILIAN SOYBEAN CULTIVARS SIMULATED BY A SIMPLE. v. 51, p. 285–298, 2015.
- BENTO, M. *et al.* Perda de produtividade potencial da cultura do sorgo no estado de são paulo (1). p. 157–162, [S.d.].
- BONHOMME, R. Bases and limits to using “ degree . day ” units. v. 13, p. 1–10, 2000.
- CAICEDO, D. R. *et al.* Comparison of eight degree-days estimation methods in four agroecological regions in Colombia. 2012.
- DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. *Yield response to water*. [S.l: s.n.], 1979. v. 33.
- GASTÉLUM, J. R.; VALDÉS, J. B.; STEWART, S. A Decision Support System to Improve Water Resources Management in the Conchos Basin. p. 1519–1548, 2009.
- KROES, J. G. *et al.* SWAP version 3.2. Theory and user manual. *Update*, n. August, p. 284, 2009. Disponível em: <<http://www.swap.alterra.nl/>>.
- LOGAN, S. Y. J.; COFFEY, D. L. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 1923, n. 94, 1995.
- LUCENA, L. DE F. C. *et al.* RESPOSTA DO MILHO A DIFERENTES DOSAGENS DE NITROGÊNIO RESPONSE OF CORN TO DIFFERENT DOSES OF NITROGEN AND PHOSPHORUS APPLIED TO SOIL. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 4, n. 3, p. 334–337, 2000.
- MARIN, F. R. *et al.* Crop coefficient changes with reference evapotranspiration for highly canopy-atmosphere coupled crops. *Agricultural Water Management*, v. 163, p. 139–145, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.010>>.
- MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Potential and Actual Sugarcane Yields in Southern Brazil as a Function of Climate Conditions and Crop Management. v. 16, n. 3, p. 264–276, 2014.
- MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. *Principles of Environmental Physics: Plants , Animals , and the Atmosphere*. 4th Editio ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2012.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ, 1997.

RITCHIE, J. T. Soil water balance and plant water stress. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Org.). . *Understanding Options for Agricultural Production*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1998. p. 41–54. Disponivel em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_3>.

SAMANI, Z. Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 126, n. 4, p. 265, 2000.

SMITH, M.; STEDUTO, P. The original FAO water. *Yield response to water*, p. 1–10, 2012.

TAIZ, L. *et al. Plant Physiology and Development*. 6st. ed. [S.l.]: Sinauer Associates, Inc., 2015.

TEH, C. B. S. *Introduction to Mathematical Modeling of Crop Growth: How the Equations are Derived and Assembled into a Computer Program*. [S.l.: s.n.], 2006.

VAN ITTERSUM K, M. *et al.* On approaches and applications of the Wageningen crop models. v. 18, 2003.

XIAOJUAN, L.; TONG, L.; KANG, S. Comparison of spatial interpolation methods for yield response factor of winter wheat and its spatial distribution in Haihe basin of north China. p. 455–468, 2011.

YACOUBI, S. *et al.* Day and night time sprinkler irrigated tomato: Irrigation performance and crop yield. v. 7, 2010.