

MODELAGEM DE CANA DE AÇÚCAR PARA PREVISÃO DE PRODUTIVIDADE DE CANAVIAIS NO BRASIL E NA AUSTRÁLIA

VALTER BARBIERI¹

FÁBIO CESAR DA SILVA²

CARLOS GREGORIO HERNANDEZ DIAS-AMBRONA³.

¹ESALQ-USP, Piracicaba, Brasil.

²Pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária & Professor da Fatec Piracicaba, Campinas, Brasil.

³ Universidad Politécnica de Madrid y Escuela Agrícola Panamericana, Madrid, España

Resumen: *Un modelo de previsión del rendimiento potencial de la productividad, sin restricciones de la nutrición y el agua, para la cultura de caña de azúcar ha sido construido para analizar la sostenibilidad de la nueva ampliación de zonas de cultivo, con el foco en la producción de etanol. Fueran ajustados los valores del rendimiento potencial en términos de masa seca (MS) de la caña de azúcar para estimar la absorción del dióxido de carbono (CO₂), en relación con la temperatura del aire y la radiación solar. Son estimados mensualmente la producción de MS, durante el ciclo de cultivo. La MS debe considerar una tasa fotosintética con pérdidas por la manutención de la respiración, la senescencia de hojas y sierpes que restarán en el campo durante el ciclo. El modelo BRCANE es compuesto por las ecuaciones que describen el comportamiento fisiológico debido a las condiciones del ambiente térmico promedio de las variables, constantes, que se obtuvo a través de la literatura y ajusta los resultados de acuerdo con los datos experimentales. El MS estimado por el modelo se contrasta con los datos obtenidos en el ciclo de experimentación sobre el terreno de regadío (variedades RB72 454, NA 56-79, CB 41-76, CB 47-355, CP 51-22, Q138 y Q141), en El Estado de São Paulo (Brasil) y en Bundaberg SES, de Queensland (Australia). Los resultados del total de MS se modificaron en el tallo de toneladas por hectárea a través de ecuación lineal para cada variedad, con coeficientes de regresión superiores a 0,88. El modelo se presentó coherente con las simulaciones MS durante el ciclo, así como en la predicción del rendimiento.*

Palabras Clave : *modelagem de cana, produtividade potencial, biomassa.*

Summary: *A model of sugarcane was constructed to predict the potential yield (without nutrition and water restrictions) to analyze the sustainability of new expanded cultivation areas to the ethanol production. The potential yield in terms of dry matter of sugarcane was adjusted to estimate the carbon dioxide absorption (CO₂), AS C4 plant, in relation with air temperature and solar radiation to calculate a monthly production of dry mass (DM), during the crop cycle. The DM take in account a gross photosynthetic rate subtracting loses by maintenance respiration, senescence of leafs and tillers during the cycle. The BRCANE model is composed by equations which describe the physiological behaviour due to environment conditions averaging the thermal variables, which constants was obtained through adjusts of literature results with experimental data. The estimated DM by the model was contrasted with data which obtained during the cycle from experimental irrigated field (varieties RB72 454, NA 56-79, CB 41-76, CB 47-355, CP 51-22, Q138 and Q141), in the São Paulo State (Brazil) and in Bundaberg SES, Queensland (Australia). The results of total DM were modified in stalk tons per hectare through linear equation for each variety, with regression coefficients higher than 0,88. The model showed consistent simulations with DM during the CROP cycle, as well as in the prediction of yield.*

Introdução

A importância econômica da cana-de-açúcar para o país é incontestável, seja na produção de biocombustível renovável ou na geração de divisas pela exportação de açúcar. Na safra brasileira 2005/06, a área plantada perfaz 6,5 milhões de hectares, sendo processados 425 milhões de toneladas de colmos m cana-de-açúcar, com

produção de 27,2 milhões de toneladas de açúcar e 16,7 bilhões de litros de álcool hidratado e anidro. Do total anual produzido, mais da metade da produção de açúcar é exportada, significando um acréscimo na balança comercial de 1,4 bilhões de dólares por ano (UNICA, 2007). O aprimoramento do setor da agroenergia necessita de ferramentas que auxiliem na previsão de produtividade, em escalas regionais e locais, considerando-se os parâmetros de solo e de clima na modelagem de agrossistema. Existem dois clientes para esse tipo de informação estratégica: a) a empresa sucroalcooleira para aperfeiçoar suas programações operacionais da época ideal de corte e planejamento agrícola da lavoura canavieira, o que é fundamental na otimização da rentabilidade do empreendimento (SCARPARI & BEAUCLAIR, 2004); e b) o governo que utiliza o zoneamento edafoclimático da cultura para minimizar o risco de sinistro no sistema de financiamento bancário, ou seja, oferecer crédito ao produtor em local e o período de plantios adequados, cujos quais tenham uma probabilidade de mais 80% de obter uma produtividade em nível econômico na propriedade (ROSSETTI, 2001).

Do ponto de vista governamental, o conhecimento de informações do zoneamento de riscos climáticos, associados aos aspectos edáficos para cultura de cana-de-açúcar possibilitaria restringir o acesso ao financiamento de crédito bancário oficial às regiões tradicionais ou em expansão, as quais não satisfaçam os critérios técnicos e econômicos sustentáveis.

A produtividade média nacional para a cultura está na ordem de 73 toneladas por hectare (AGRIANUAL, 2005), a qual é influenciada pelo número de cortes, condições edafoclimáticas, variedades e manejo cultural. A produtividade pode ser modelada em três níveis, onde cada nível é influenciado por vários fatores, os quais condicionam a cana-de-açúcar (De WIT, 1965 e 1982):

a. produtividade potencial - Fatores que definem a capacidade fotossintética da planta para transformar energia solar em biomassa vegetal, tais como CO_2 , radiação, temperatura e características da cobertura vegetal; essa produtividade potencial é definida pela capacidade assimilação do dióxido de carbono (CO_2), para a fotossíntese dessa planta C_4 , em relação à temperatura e a radiação solar com base na metodologia descrita por HEEMST (1986). As variedades cultivadas de cana-de-açúcar são selecionadas com base nos atributos de biomassa, a produção de colmos poderia chegar a $400 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{Ano}^{-1}$ (ALEXANDER, 1985), sendo que valores próximos a esse são considerados como sendo o potencial genético da cultura.

b. Produtividade real - fatores que limitam o potencial, sendo a água e os nutrientes os de maior importância e ocorrência; a água é o primeiro fator de restrição à produção potencial, cuja contabilidade no solo é mais utilizada para fins climatológicos. Uma metodologia prática de balanço hídrico é a de THORNTHWAITE & MATHER (1955), que consiste da avaliação entre a precipitação e a evapotranspiração estimado por PENMAN-MONTEITH (método padrão - FAO, 2000) que foi ajustado para cana-de-açúcar por BARBIERI & SILVA (2007) e de DOOREMBOS & KASSAN (1994), considerando a capacidade de retenção de água no solo, segundo as características físicas dos solos, bem como em função do tipo de cobertura vegetal. Já no cálculo simplificado de PRIESTLEY-TAYLOR requer apenas a temperatura do ar, que é um alternativo para o modelo Cropsyst. O estresse hídrico causa nas plantas a redução nas taxas de assimilação de dióxido de carbono, no tamanho das células foliares, na taxa de transpiração, no potencial de água na planta, na taxa de crescimento e abertura estomática (HSIAO, 1973). Outro aspecto importante é a interferência do déficit hídrico sobre o florescimento, alongação dos perfilhos e altura final dos colmos em cana-de-açúcar (GASCHO & SHIH, 1983). Próximo ao "ponto de murcha permanente", a fotossíntese pode ser reduzida de 30% a 50% (HARTT & BURR, 1967).

TERUEL et al. (1997) estimaram a influência da deficiência hídrica sobre o índice de área foliar (IAF) verificaram que os efeitos da deficiência de água no solo não são lineares, variando conforme o nível de água no solo. Até o somatório de 600 e 400 graus dias não houve efeito pronunciado na porcentagem de crescimento do IAF não realizado devido à deficiência hídrica na cana planta e na soca, respectivamente. Após esses

valores de somatório térmico a porcentagem foi de 12,4% e 5,1% na cana-planta e na soca, respectivamente.

O segundo fator restritivo seria deficiência de nutriente no sistema solo-planta, que se baseia no balanço de N e na carência de K disponível no solo (SILVA *et al.*, 2005). A maioria dos softwares que integram a família de modelos CERES apresenta o nitrogênio como principal nutriente modelado.

c. Produção atual ou realizada - Fatores de redução, tais como pragas, doenças e contaminação. No caso da cana-de-açúcar praticamente não se tem pesquisa nesse enfoque, mas a literatura é abundante para restrições por fator biótico para culturas. Na literatura internacional em modelagem da cultura de cana existem três modelos mais conhecidos de simulação (APSIM-Sugarcane, CANEGRO-DSSAT e QCANE) para predição de produtividade de biomassa e de sacarose na cana-de-açúcar (O'LEARY, 2000). Tais modelos se limitam a avaliar os estágios do desenvolvimento vegetativo e da maturação, mas não simulam o balanço do nitrogênio no solo e nem do carbono orgânico, os quais são necessários para o entendimento dos processos dinâmicos no agrossistema (SILVA & BERGAMASCO, 2001).

No Brasil, os trabalhos de modelagem do crescimento da cana-de-açúcar são encontrados em MACHADO (1981), BARBIERI (1993) e BARBIERI & SILVA (2007), que utilizaram o conceito de graus-dia baseado em temperatura; há outros fatores de clima que afetam a produtividade, como radiação solar e umidade com importância preponderante, são os que afetam mais diretamente a produção e influenciam desde o preparo do solo, aplicação de herbicidas, até a colheita, o transporte e o armazenamento dos produtos (PEREIRA *et al.*, 2002). Recentemente, a análise de VAN DEN BERG *et al.* (2000) aborda as limitações quanto à absorção de água pelo sistema radicular da cana e as características climáticas (DOOREMBOS & KASSAN, 1994). Estudos que relacionam físicas e químicas do solo são úteis para determinação do potencial produtivo de determinada cultura (BERNARDES *et al.*, 2002; TERAMOTO, 2003; BARBIERI & SILVA, 2007), sendo que as características de solo são tradicionalmente determinadas nas unidades produtoras.

Há fortes evidências de que os modelos de simulação de culturas têm um papel importante na investigação científica, a decisão de plantar e analisar os fatores que podem aumentar a produção de culturas e de transferência de tecnologia para sistemas de produção. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo para permitir a prospecção, para efeitos de clima Zoneamento novas áreas para expansão Produção de etanol da cana de açúcar. que nenhuma informação detalhada a utilização de modelos complexos que requerem muitos parâmetros e foi testado em duas regiões Contratante produção de plantas diferentes no Brasil e na Austrália.

MATERIAL E MÉTODOS

En este trabajo, se construye un modelo de estimativa de la productividad potencial mensual en biomasa seca basado en asimilación de CO₂ en carbohidrato, en función de la temperatura del aire, radiación solar e insolación, que está representada esquemáticamente na Figura 1, que será detallado as equações integrantes no fluxograma no decorrer do artigo.

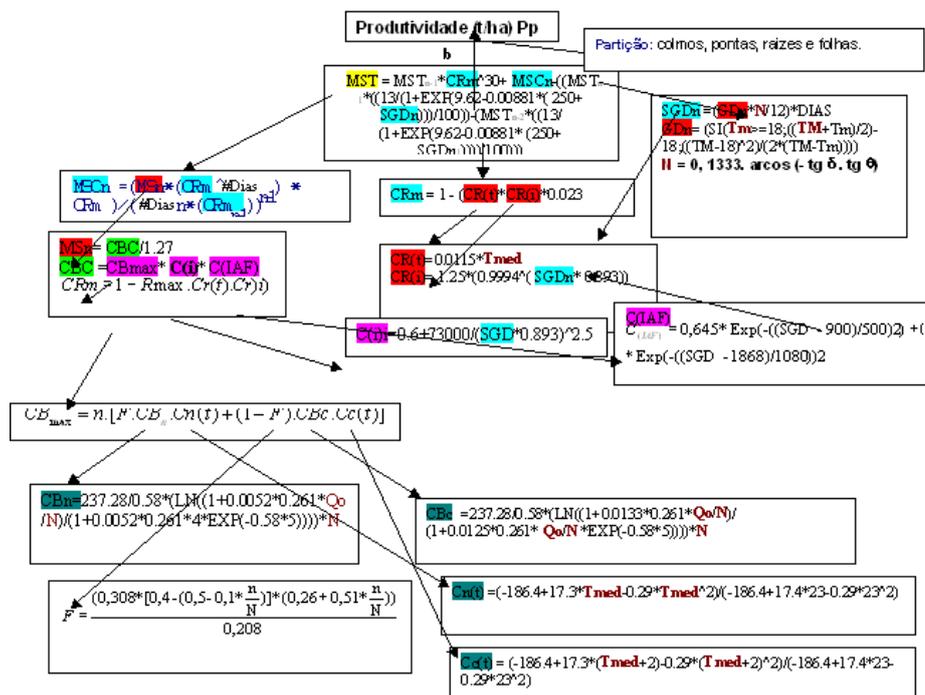


Figura 1. Fluxograma do modelo BRCANE proposto para estimar a produtividade potencial da cana-de-açúcar em função do clima.

- Modelo construção e parametrização

O modelo proposto para estimativa da produtividade de cana-de-açúcar (p), expresso em massa seca total (MST) mensal e ao final do ciclo de n dias, em kg matéria seca (MS) por hectare, obtido pela equação 1, para antes e depois da formação da 9ª folha do colmo, não se subtrai a palhada depositada no solo (MP):

$$MST = MS_0 * Cr + \sum MS \quad (1)$$

Sendo, que:

MST = matéria seca acumulada no fim do mês em questão (kg/ha);

MS₀ = mat. seca (MS) remanescente no início do mês (kg MS./ha)(considerando as perdas de folhas e colmos)

$$\sum MS = \frac{\overline{MS} * (Cr^{day} - 1)}{(Cr - 1)} \quad (2)$$

Cr = coeficiente de respiração de manutenção (g MS/g MS. dia)

Para a matéria seca produzida dia a dia (CBC x 0,79/ day), a correção será feita em função do n° de dias da seguinte forma:

MS = MS / day = matéria seca média diária produzida (kg/ ha dia)

day = n° de dias do mês

No decorrer do ciclo da cultura, as folhas mais velhas são substituídas continuamente, o material remanescente é denominado de palhada. Uma vez, fora da planta não consome mais energia, Istoé, não respira mais, requerendo a subtração de um termo relativo à palhada depositada (MP), considerada a partir da formação da 9ª folha do colmo. O

coeficiente energético de 0,79 vem da razão de 1 g de CH₂O de m.s. são necessários consumidos 1,27 g de CH₂O fotossintetizado (HEEMST, 1988).

Produção de carboidrato líquida: mensal e acumulado:

A correção da respiração é multiplicativa e deve ser aplicada diariamente, requerendo para o seu uso o estabelecido o valor de MSC_n.

MSC_n = massa de matéria seca (m.s.) corrigida ao fim de n dias do mês (kg m.s. /ha.mês).

Considerando-se MS₀ como os valores de CBC transformados em matéria seca, através do fator de respiração de crescimento (eficiência da conversão), igual a 0,79 g m.s./ g CH₂O (MACHADO, 1981), ao final de n dias do mês, tem-se a matéria seca inicial corrigida:

$$MSC_n = MS_0 * CR_n \text{ (kg m.s./ ha)} \quad (3)$$

CR_n = correção multiplicativa da respiração

Respiração de manutenção (CR_n)

A respiração de manutenção se aplica a matéria seca originária do carboidrato bruto corrigido (CBC). Ocorre devido ao consumo de energia para manutenção dos processos fisiológicos vitais da planta, como descrito por BULL & TOVEY (1974), que apresentam medidas de taxas de respiração noturna em folhas de cana-de-açúcar mostrando uma boa correlação entre a taxa de assimilação fotossintética bruta diária e o total de respiração noturna (respiração de manutenção), que perfaz cerca de 10% da fotossíntese bruta. A correção de respiração é multiplicativa e expressa pela equação:

$$CR_n = 1 - R \max * Cr(t).Cr(i) \quad (4)$$

Onde:

r max = 0,023 g /g – respiração máxima; Cr(t) = correção da r max em função da temperatura; Cr (i) = correção da r max em função da idade da planta

CR_n = correção de respiração (multiplicativa); C_{r(t)} = correção da respiração devido a temperatura; C_{r(i)} = correção da respiração devido a idade da cultura

Os valores de respiração máxima (r max) foram obtidos baseando-se nos resultados de MEDINA (1970) e de MACHADO (1981), que ocorre a temperatura de 30°C, onde estimou-se a respiração máxima (R max) como sendo igual a 0,023 g m.s. perdida no processo, por 1 g de matéria seca viva no vegetal. Os valores de Cr(t) foram calculados em função dos resultados de MEDINA (1970), correlacionando os valores da temperatura do local com a respiração de manutenção, onde se encontrou a seguinte relação:

$$Cr(t) = e^{-4,11+0,1383.t} \quad (5)$$

Para valores de temperatura (t), em °C, quando t > 28,5°C, considera-se c_{r(t)} = 1.

O valor da Cr(i), foi da mesma forma obtido, utilizando dos dados de MEDINA (1970), correlacionando a respiração de manutenção com "graus-dia", durante o ciclo da cultura. Foram utilizados os valores médios da respiração dos colmos. Tal análise originou a seguinte relação:

$$Cr(i) = 1,26 * 0,9995^{(\sum GD)} \quad (6)$$

Para valores $\sum GD$ (Somatório de Graus dias) < 372, considera-se c_{r(i)} = 1.

Produtividade de colmos e Matéria Seca Total Neto

A partir do valor da MST líquida (MST bruto subtraído da respiração de manutenção) é calculado o peso dos colmos (tonelada de colmos por ha), considerando um fator oriundo de equações de regressão linear, ajustadas aos dados medidos: $MSTl = b * MST$, onde:

$Y = MSTl = Pp$ em t colmos/ha (estimado) ou $X = MST$ (t/ha).

$b =$ coeficiente angular da reta $MST / MSTl$.

Os valores do coeficiente angular variaram experimentalmente em função da variedade e época de colheita, sendo obtidos para as variedades: RB72 454 ($b=2,01$, $r=0,951^{**}$); NA 56-79 ($b=1,87$; $r = 0,960^{**}$); CB 41-76 ($b=1,68$; $r =0,914^{**}$), CB 47-355 ($b=1,81$; $r = 0,951^{**}$), CP 51-22 ($b=1,82$; $r =0,934^{**}$), Q138 ($b=1,78$; $r =0,934^{**}$) e Q148 ($b=1,62$; $r =0,887^{**}$).

A MST líquida é obtida da MST bruta subtraindo mensalmente as perdas de folhas (Pfolhas), morte de perfilhos (Pperfilhos) e de raízes (Praiz) baseado nos graus dias acumulados no mês, como nota-se na Figura 1.

$$MST = Pp + P(\text{folhas mortas}) + P(\text{perfilho}) + P(\text{raiz}) \text{ (m.s./ha.ciclo)} \quad (7)$$

Os valores de partição foram obtidos pelas equações 8 a 11.

A raiz, conforme resultados obtidos por MEDINA (1970) têm seu peso aproximadamente igual ao das folhas vivas, durante quase todo o ciclo da cultura. Considerando os resultados de MACHADO (1981), que encontrou $1g \text{ m.s./dm}^2$ folha, se tem então 1000 kg folhas/ha.IAF. Desta forma, conhecendo-se o IAF do mês em questão estima-se o peso das raízes (MEDINA *et al.*, 1970), mas resultados recentes da literatura permitiu-se ajustar uma equação de peso de raízes baseado em Graus-dia:

$$P(\text{raiz}) = MST \cdot \frac{-0,000009 * GD^2 + 0,0217 * GD}{100} \quad (8)$$

Com relação aos tocos que são deixados no campo, durante a colheita, conforme resultados apresentados por VAN DILLEWIJN (1951) e MEDINA *et al.* (1970), estima-se uma quantidade próxima das raízes, logicamente, o valor aqui adotado, depende da forma da colheita (mecânica ou manual, que são estimados pelas equações abaixo):

$$P(\text{toco}) = \frac{3000 * GDc}{100 * 2} \cdot \text{Dias} \quad (9)$$

$\sum GDc =$ Soma de graus dias do mês ajustado pelo fotoperíodo ($GD * N / 12$)

Quanto às folhas (verdes ou queimadas) deixadas no campo, considerando que na colheita são descartadas por meio do feno, cujos valores são calculados por MEDINA *et al.*

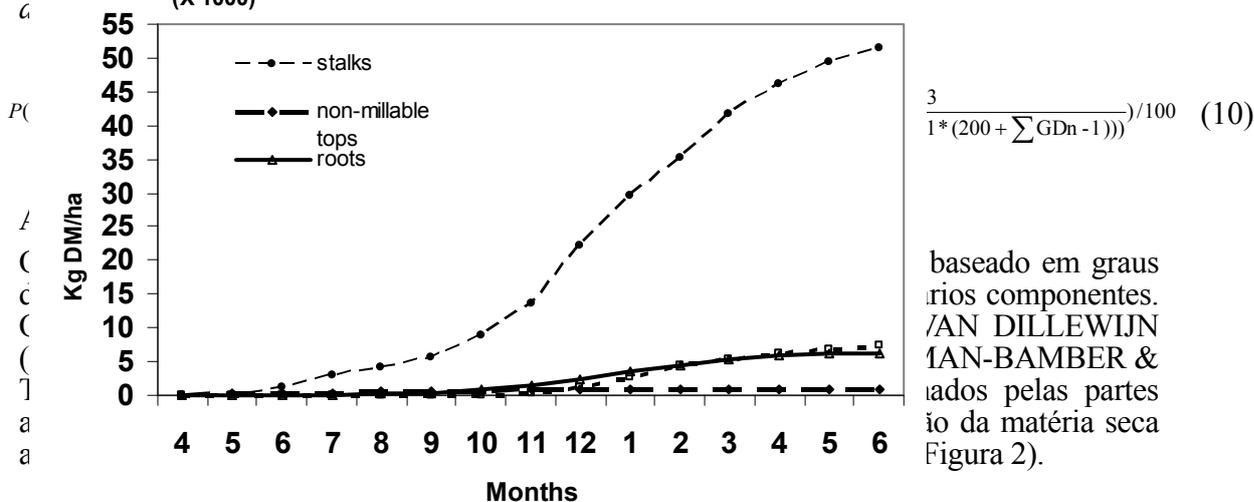


Figura 2. Distribuição da matéria seca acumulada da cana-planta ao longo do ciclo, em colmos (stalks), toco (non-millable tops or cabbage), raiz (roots) e folhas mortas (dead leaf dried) obtidas por simulação do modelo, em função dos graus dias acumulados.

Produção Bruta de Carboidratos Corrigida (CBC)

Para estimar os valores de MST é necessário conhecer a produção mensal de carboidratos bruta (CB_{max}) e da razão MSn/ CB_{max} , obtido pelas equações 11 e 12, a partir de CBc e CBn .

$$MSn = CBC / 1,27 \quad (11)$$

De acordo com dados de MACHADO (1981), a eficiência de conversão de matéria seca, seria necessária 1,27 g de carboidrato bruto (CH_2O) fotossintetizado para produzir 1 g de matéria seca (MS). Para produzir o CH_2O bruto, de acordo com van HEEMST (1986) a produção máxima mensal de carboidrato bruto no ciclo será dada pela expressão:

$$CB_{max}(t) = day * (F * CBn * Cn(t) + (1 - F) * CBc * Cc(t)) \quad (12)$$

$CB_{max}(t)$ = produção total mensal de carboidratos não corrigida (kg/ha/mês)

day = nº de dias do mês

F = fração do dia que foi nublado

(1-F) = fração do dia que foi claro (sem nuvens)

CBn = produção média diária de carboidratos, em um dia nublado (kg/ha.dia)

CBc = produção média diária de carboidratos, em um dia limpo (kg/ha.dia)

$Cn(t)$ e $Cc(t)$ = correções devido temperatura do ar para dias nublados e claros, respectivamente.

Posteriormente pelas correções devidas aos fatores fisiológicos que determinam modificações no CB, uma vez que tais fatores seja diferentes das condições padrões de calibração, ou seja:

Do ponto de vista energético, são consumidos 0,27 g de CH_2O neste processo, consumo relatado por van HEEMST (1986), como respiração de crescimento, portanto:

$$CR_n = 1 / 1,27 = 0,79 \text{ g MS/ g } CH_2O \quad (13)$$

$$CBC = CB_{max}(t) * C(IAF) * C(ip) * C(If) \quad (14)$$

Sendo que:

$C(IAF)$ = correção devido ao IAF

$C(ip)$ = correção devido à idade da planta

$C(if)$ = correção devido a idade das folhas

Os coeficientes de correção utilizados para CBC foram:

Utilizando os dados de acúmulo de matéria seca, em diferentes temperaturas (BULL, 1969), para 6 clones e 3 variedades diferentes, que também incorpora os dados da FAO para Grupo C_4 (BARBIERI & SILVA, 2007), em relação a temperatura do Ar. Tornando-se necessário corrigi-la na estimativa de MS acumulada, o que pode ser feita usando-se o $Cc(t)$, que está representado na equação:

$$Cc(t) = \frac{(-186,4 + 17,3 * (t + 2) - 0,29 * (t + 2)^2)}{(-186,4 + 17,4 * 23 - 0,29 * 23^2)} \quad (15)$$

Considerou-se como valor unitário (de referencia) o obtido a 22,4°C de temperatura do ar, onde $C_c(t) = 1$. Onde: $C_c(20) = 0,72$

$C_c(t)$ = correção do carboidrato bruto a temperatura observada (dias claros), cuja temperatura do ar está em torno de 2°C menor que a da folha em média (BARBIERI, 1993).

Para dias nublados, temperatura é aproximadamente igual a do ar, a equação torna-se então:

$$C_n(t) = \frac{(-186,4 + 17,3 * t - 0,29 * t^2)}{(-186,4 + 17,4 * 23 - 0,29 * 23^2)} \quad (16)$$

$$C(i) = 0,6 + \frac{73000}{(\sum GD * 0,893)^{2,5}}$$

Correção devido a Idade da Cultura ($C(ip)$): (17)

Onde:

$C(i)$ = correção devido a idade da planta

$\sum GD$ = somatória dos graus-dia

O fator 0,8903 vem do ajuste de $\sum GD$ para correção do fotoperíodo (N/12).

Esta equação tem valor igual a 1 para valores de $\sum GD <$ que 166 (BARBIERI, 1993).

CORREÇÃO DEVIDO AO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (C(IAF))

A correção devido ao IAF é obtida através da equação (16) e se faz necessária, porque CB_{max} foi determinado para um IAF máximo, que só ocorre em uma fase do ciclo.

$$C_{(IAF)} = 0,645 * \text{Exp}(-((\sum GD - 900)/500)^2) + 0,998 * \text{Exp}(-((\sum GD - 1868)/1080))^2 \quad (18)$$

Tendo o $R^2 = 0.952^{**}$, quando $IAF > 1$, então se considera 1.

A função que permite a estimativa de IAF foi obtida através dos dados medidos por MACHADO (1981), BARBIERI (1993) e LEME (Araras), ao longo do ciclo da cultura, correlacionados com os valores de "GRAUS DIA", calculados pelas seguintes equações:

Sendo para $T_b < T_m$:

O cálculo do GDD é realizado segundo o seguinte critério:

Quando $T_m > T_b$, então:

$$GDD = \left(\frac{TM + Tm}{2} \right) - Tb \quad (19)$$

Quando $T_m \leq T_b$, então:

$$GDD = \frac{(TM + Tb)^2}{2(TM + Tm)} \quad (20)$$

Em que GDD é o acúmulo de graus dias; TM é temperatura máxima diária; Tm é a mínima temperatura diária; Tb é a temperatura basal. Segundo BACHI & SOUZA (1978) a temperatura basal para o crescimento da cultura da cana-de-açúcar é de 18°C.

Os valores de GDD para cada dia devem ser corrigidos com a taxa entre o comprimento do dia em horas e às 12 horas da seguinte forma:

$$GDD_{st} = GDD * N/12 \quad (21)$$

onde,

GD = graus dia mensal ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{dia}$)

TM = temperatura máxima média mensal ($^{\circ}\text{C}$)

tm = temperatura mínima média mensal ($^{\circ}\text{C}$)

tb = temperatura base (18°C) BACCHI(197)

N = n $^{\circ}$ de horas de luz diária do mês

A correlação entre estes valores (IAF x $\sum \text{GD}$) resultou em funções para cana-planta, soca e ressoca. O índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) foi calculado para cada um dos dias do ciclo conforme metodologia descrita por TERUEL et al. (2003) para cana-planta (22).

$$IAF_{Pl} = e^{-13,521} * \left(\sum GDD_{st} \right)^{2,784} * e^{-0,004023 * \sum GDD_{st}} \quad (22)$$

Os coeficiente da equação aso modificados pelo numero de corte, no caso da cana soca (IAF_{Pc}), os valores seriam: a= -17,707; b = 3,373 e c =-0,004265.

PRODUÇÃO DE CARBOHIDRATO PELA CULTURA DA CANA-DE-AÇUCAR

Assumindo-se os valores de “a” ($6,193 \times 10^{-3}$) e de “b” (0,261) que são coeficientes constantes dependentes da cultivar da cana obtidos por BARBIERI (1993) utilizando os dados de BULL (1965), e o coeficiente de atenuação solar pelo dossel ($k = 0,58$) obtido por BARBIERI (1993) anteriormente, e o índice de área foliar (IAF) igual a 5, as equações 21 e 26. Estimam o carboidrato bruto ($\text{kg CH}_2\text{O/ha.dia}$) elaborado por uma cultura de cana-de-açúcar, na fase de IAF igual a 5, à temperatura do ar de 23°C em um dia cuja radiação no topo da atmosfera foi Q_0 ($\text{cal/cm}^2 \cdot \text{dia}$), e o fotoperíodo de N (horas), sendo:

$\text{CBc} = \text{kg CH}_2\text{O/ha dia}$, produzido em um dia completamente limpo.

$\text{CBn} = \text{kg CH}_2\text{O/ha dia}$, produzido em um dia completamente nublado.

Segundo van HEEMST(1986) a fração do dia que foi nublada é conceitualmente a energia interceptada pelas nuvens dividida pela máxima interceptação possível na faixa da fração RFA (ASSUNÇÃO, 1994), obtido pela equação 23, ou seja de forma simplificada

$$\bar{F} = \frac{(0,308 * [0,4 - (0,5 - 0,1 * \frac{n}{N})] * (0,26 + 0,51 * \frac{n}{N}))}{0,208} \quad (23)$$

Sendo que N =fotoperíodo médio do ciclo por mês (horas) e n/N é a razão de insolação média mensal (durante o ciclo).

No caso, pode-se considerar os valores de 0,8 e 0,2 seriam as frações de Q_0 transmitidas em um dia completamente limpo, e em um dia completamente nublado (LORDER *et al.*, 1984), respectivamente.

Para estimar a fração da radiação fotossinteticamente ativa, utiliza-se do valor de F e as estimativas de CBn e CBc, que depende da assimilação de CO_2 pela cana, que se utilizando de dados fisiológicos de BULL (1969), a temperatura do ar e ao IAF foram considerados de 23°C e 25°C , respectivamente e a idade de 2 meses após plantio. Adaptando-se e fazendo a análoga a lei de BEER. Admiti-se que a cana-de-açúcar tem uma distribuição espacial esférica das folhas (De WIT, 1965), e que a radiação solar ao penetrar no dossel, atenua-se conforme a equação proposta por MONSI e SAEKI (1953), obtendo-se o k de 0,58 (BARBIERI, 1993), expresso em $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$.

Integrando-se a equação 22, a síntese total de CH_2O , para o dossel inteiro, será:

$$CB_{(IAF)} = \int_0^{IAF} \frac{a \cdot I_o \cdot e^{-k(IAF) \cdot z'}}{1 + b \cdot I_o \cdot e^{-k(IAF) \cdot z'}} dz' \quad (24)$$

É a integração de energia transmitida da primeira camada (plena) com as demais camadas de folha do dossel, obtém a equação 25, será:

$$CB_{(IAF)} = \frac{10^3 \cdot a \cdot \ln(1 + b \cdot I_o)}{b \cdot k \cdot (1 + b \cdot I_o \cdot e^{-k(IAF)})} \quad (25)$$

$CI_{AF} = CB(IAF \text{ de } 0 \text{ a } 5) / CB(IAF = 5)$, tem-se a curva de CI_{AF} . Onde:

$CB_{(IAF)} = CH_2O$ sintetizado por um determinado índice de área foliar (kg/ha.hora)

I_o = radiação global incidente no topo da cultura

a, b e k = constantes quantificadas anteriormente ($a = 6,193 \times 10^{-3}$; $b = 0,261$; $k = 0,58$).

De acordo com a equação 26, determina-se com boa aproximação a produção diária de carboidratos para um dia completamente limpo, cuja fração RFA é aproximadamente 0,4 da Radiação Global 33 (DOOREMBOS & KASSAN, 1994), considerando-se um valor médio diário por hora (I_{oc}), e multiplicando-se este valor pelo numero de horas de brilho solar (N), (comprimento de dia). No Boletim da FAO n.º 33 (DOOREMBOS & KASSAN, 1994) tem “a” + “b” (Angstrom) = $0,25 + 0,50 = 0,75$, que se trata de constante local, considerando-se que 75% da Q_o são transmitidas para da cultura.

Quando RFA é máximo então $n/N=1$. Portanto, $RFA_{max} = Q_o(a+b) \cdot 0,4$

Quando RFA é mínimo então $n/N=0$; Portanto, $RFA_{min} = Q_o \cdot a \cdot 0,5$; então substituindo-se no CB_c :

$$CB_c = \frac{10^3 \cdot a \cdot \ln(1 + 0,0125 \cdot b \cdot Q_o \cdot N)}{b \cdot k \cdot (1 + 0,025 \cdot b \cdot Q_o \cdot \frac{EXP^{-k(IAF)}}{N})} \quad (26)$$

Onde:

CB_c = carboidratos produzido (kg/ha.dia), em um dia completamente limpo.

Q_o = radiação no topo da atmosfera (cal/cm²/dia)

N = comprimento do dia (horas)

a, b, e K = constantes

Substituem-se os valores locais de: $a = 6,193 \cdot 10^{-2}$; $b = 0,261$ e $K = 0,58$.

O valor K encontrado de 0,58 está próximo ao usado no Modelo CANEGRO, o coeficiente de extinção varia com a idade; de aproximadamente 0,5 (cana nova) para 0,8, mas isso pode ser diferente para variedades diferentes. Porém, presume-se que toda RFA é interceptada quando o $IAF > 3$ (THOMPSON, 1989). Na prática, em condições de campo brasileiras ocorre quando o $IAF \geq 4,5$ (MACHADO, 1981; BARBIERI, 1997).

Na equação 27, definida para um dia limpo, pode ser adequada para um dia completamente nublado, assumindo que nesta condição, 25% da radiação Q_o é transmitida para o topo da cultura (radiação difusa), e que a fração fotossinteticamente ativa (RFA) é 1.25 vezes maior que em um dia completamente limpo (SZEICZ, 1966; STANHIL, 1977; D'ASSUNÇÃO, 1994), teremos, que:

$$CB_n = \frac{237,28}{0,58} \frac{\ln((1 + 0,0052 \cdot 0,261 \cdot Q_o/N))}{(1 + 0,0052 \cdot 0,261 \cdot 4 \cdot \exp(-0,58 \cdot 5))} \cdot N \quad (27)$$

Completamente encuberto (nublado), sendo:

CBN = carboidrato produzido em um dia completamente nublado (kg/ha.dia)

Qo = radiação no topo da atmosfera (cal/cm2/dia)

N = comprimento do dia (horas)

Sendo para os dias a pleno sol (Equação 28):

$$CBc = \frac{237,28 * (LN((1+0,0133 * 0,261 * Qo/N)))}{0,58 * (1+0,0125 * 0,261 * Qo/N * EXP(-0,58 * 5))} * N \quad (28)$$

Completamente aberto, sendo:

CBc = carboidrato produzido em um dia completamente ao sol (kg/ha.dia)

Qo = radiação no topo da atmosfera (cal/cm2/dia)

N = comprimento do dia (horas)

- Experimento de validação e estatísticas

Procedeu-se a comparação de valores de produtividades estimadas pelo modelo BRCANE em relação aos resultados de produtividades obtidos experimentalmente sobre condições de irrigação e fertilização adequada, que foram instalados nas regiões de Piracicaba e de Araras (Fig. 3, Brasil) e de Bundaberg (Australia).

Para validação do modelo proposto com vistas a produção final foram utilizados os dados de produção da cultura irrigada e adubada (produção potencial (Pp), medidos nos experimentos irrigados, com 11 a 20 meses de cultivo, entre os anos de 1974 a 1986, conduzidos na Estação Experimental de cana-de-açúcar, do IAA - Instituto do Açúcar e do Alcool - PLANALSUCAR – nos municípios de Araras (latitude: 22°18' S, longitude: 47°23' O e altitude: 617m) (DELGADO-ROJAS, 1998) e de Piracicaba (latitude: 22° 42' 30"S, longitude: 47° 38' 00" O e altitude: 546 metros), no Estado de São Paulo medidos pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) , nos anos de 1984 a 2000 e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, nos anos de 2001 a 2006 (SILVA et al., 2006), sendo os dados climáticos originários dos Postos Meteorológicos da UFSCar e da ESALQ-USP. A experiência australiana foi realizada em solo Euchrozem (Rhodic Eutrudox), na Estação Experimental de Cana-de-açúcar, em Bundaberg (Bundaberg SES), Queensland (lat. 24,83 ° S, 152,43 ° E), no período de 1991 a 1995. Nos experimentos utilizaram-se as cultivares Q138 e Q141, que foram feitas seis plantações com acompanhamento de determinar datas fenológicas no desenvolvimento, dois desses foram cultivadas até cana aparência e quatro deles foram cultivadas a 16 meses de idade e, em seguida, as soqueiras por mais 16 meses. Os parâmetros do modelo foram determinados obtidos de culturas plantadas em 13 de Agosto de 1991 e 27 de maio de 1992 e soqueiras em 5 de Novembro de 1993 e 18 de Fevereiro de 1994. Sendo, considerado o tempo térmico com a correspondente observação visual da cana, sendo estabelecido utilizando-se os dados em todas as datas de plantação. A partir do processo de maturação, a biomassa acumulada foi feito a partição do açúcar, utilizando-se os dados experimentais de culturas de soqueiras em 18 de Agosto de 1992, plantadas em 19 de novembro de 1992, plantadas em 24 de fevereiro de 1993 e as soqueiras cultivadas em 3 de Junho de 1993 e informações complementares (umidade do solo foi controlada por sonda de nêutrons) para manter o suprimento hídrico desejado (LIU & BULL, 2001). Quanto ao processo de maturação, a gradativa queda de temperatura e redução das precipitações são determinantes para a ocorrência do processo de maturação, dessa forma, na região Sudeste do Brasil, o processo tem ocorrência natural a partir de abril/maio, com clímax no mês de setembro. Temperaturas de 17-18°C parecem ser particularmente favoráveis para o acúmulo de altos níveis de sacarose. Há efeito interativo entre luz solar, temperatura e diferentes variedades de cana-de-açúcar em resposta ao processo de maturação. Para a estimativa do grau de estresse para promover a maturação do colmo de cana utilizou-se graus dias negativos acumulados pela planta e o nível de estresse hídrico no solo. Para simular utilizando-se os dados médios mensais de radiação solar global (Qg), fotoperíodo (horas de insolação), temperaturas mínimas (Tm) e máximas

(TM) do ar. no período contemplado pelo cultivo e dados astronômicos ($ta \delta$, $ta \theta$) locais, em relação as médias mensais para cada uma das duas regiões, exigidos como parâmetros de entrada pelo modelo proposto, procedendo-se as estimativas para sete cultivares de cana-de-acúcar, entre as safras de 1974/1986 (Araras) e de 1998/2005 (Piracicaba) no Brasil e de 1991/1994 (Bundaberg) na Austrália. (LIU & BULL, 2001). As Variedades a serem analisadas: RB72 454; NA 56-79; CB 41-76; CB 47-355, CP 51-22, Q138 e Q148.

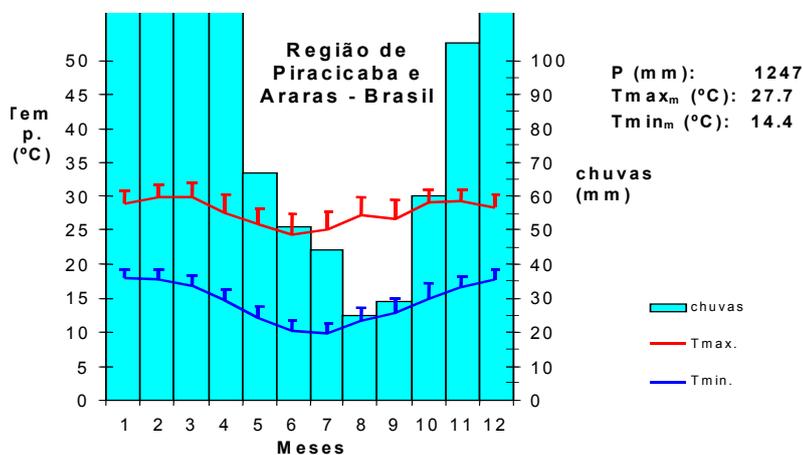


Figura 3. Condições climáticas mensais da Região de Piracicaba e Araras – SP (Brasil).

Analises Estatísticas

Para a avaliação da conformidade das estimativas de produtividade, por meio da comparação com as medições, que é avaliada utilizando a diferença E_i (estimativa) - M_i (medido) ou diferenças para um mesmo ponto, os índices melhores são especificados, tanto para as condições experimentais do Brasil e da Austrália, considerando se os pares X e Y para os valores medidos e estimados, respectivamente. O confronto entre os valores medidos e estimados foi feito através de regressões lineares (teste T). As análises estão sendo feitas individualizadas para as diferentes variedades de cana-de-acúcar, analisando-se também o conjunto como um todo. Para a avaliação do modelo utilizou-se o programa IRENE (“Integrated Resources for Evaluating Numerical Estimates”), como descrito por FILA et al. (2003), que se trata de uma ferramenta de análise de pares de dados concebida para proporcionar um acesso fácil a um conjunto de técnicas de testes. A ênfase é dada aqui em técnicas estatísticas, que devem ser aplicados ao comparar as estimativas (EI) confrontadas com as medições (Mi). Principalmente, as estimativas que não tem repetição são comparadas em relação aos pares estimados, mas sem repetição. Os parâmetros utilidade para o modelo BRCANE aplicado para análises técnicas de avaliação: a) desvio da mediana – SB (Kobayashi and Salam, 2000); b) Raiz quadrada da variação do erro – RMSV (Kobayashi & Salam, 2000); c) “Root mean squared error”- RMSE (Fox, 1981); d) “General standard deviation” – GSD (Jørgensen et al., 1991); e) “Modeling efficiency” – EF (Greenwood et al., 1985); f) “Índex of agreement”- d (Willmott and Wicks, 1980); g) “Mean bias error” – MBE (Addiscott and Whitmore, 1987) e h) “Coefficient of residual mass” – CRM (Loague and Green, 1991).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

- Calibração do modelo BRCANE

Os valores correspondentes de matéria seca total estimados pelo modelo variaram de 79 e 142 ton/ha. IRVINE (1983) e BARBIERI (1993) citam uma série de valores de matéria seca encontrados por distintos autores em várias condições edafoclimáticas no mundo, com valores máximos de experimentação entre 75 a 140 ton./ha.ano. Considerando-se que no estudo atual foram usados ciclos que variam de 11 a 20 meses de cultivo, que

corresponde aos ciclos de ano e de ano e meio, cujos valores obtidos variam de 79 a 140 ton./ha, dentro do encontrado na literatura.

Verificou-se que durante todo o ciclo em questão o valor de CBc foi em torno de 2,5 vezes maior que CBn, como pode ser visto na Figura 4. Sabe-se que em termos de radiação global (Qg), um dia limpo tem aproximadamente 4 vezes mais energia que um dia nublado. Considera-se que, num dia limpo (sem nuvens), que a energia incidente está em torno de 0,8 de Qg, enquanto que num dia nublado está em torno de 0,2 de Qg. Considerando a radiação fotossinteticamente ativa, a fração RFA num dia nublado é em média 0,7 de Qg, e num dia limpo em torno de 0,4 de Qg. Sendo assim, num dia nublado esta fração (RFA) será em torno de 0,15 de Qg, e em um dia limpo, em torno de 0,32 de Qg, como preconizado por STANHIL (1977) e; D'ASSUNÇÃO (1994). Isto explica parcialmente a diferença de 2,5 vezes entre CBc e CBn. Os meses de verão são potencialmente mais produtivos. Todavia, nestes meses o valor de F são maiores indicando que a razão de insolação (n/N) foi menor, ou seja, são meses mais nublados, e quase invariavelmente são mais chuvosos. Quando n for ainda menor, poderá provocar baixa produtividade da cana-de-açúcar. Especialmente esta cultura, em condições de baixa intensidade luminosa, tem sua produção diminuída, uma vez que CBmax tenderá para valores mais próximos de CBn. Observações estas que foram citadas e descritas por Van DILLEWIJN (1952), num estudo sobre os efeitos da insolação na adubação nitrogenada.

Durante o inverno CBmax se aproxima de CBc e durante o verão de CBn, como notado por MACHADO (1981). Salienta-se então que a irrigação em igual quantidade e distribuição de água que a chuva, pode promover produções maiores, por não diminuir a luminosidade, como ocorre nos dias chuvosos.

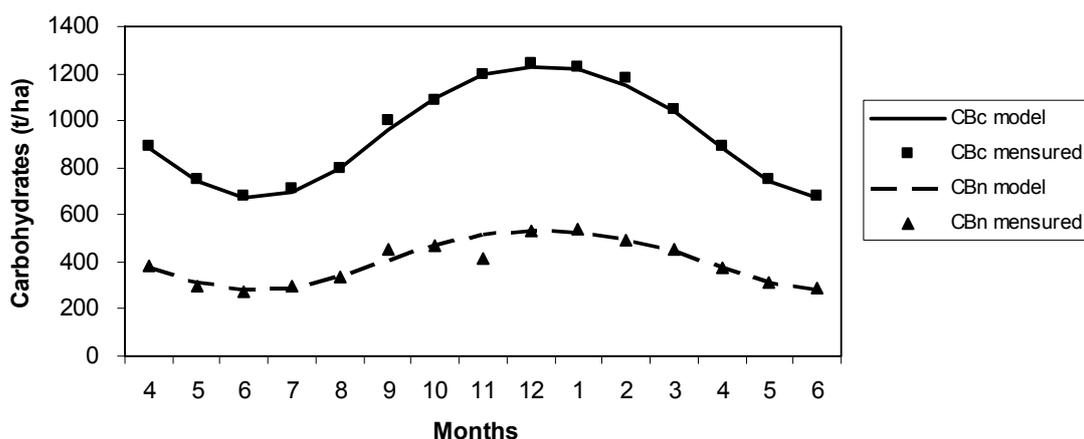


Figura 4. Valores simulados de CBc e CBn em condições climáticas do período em estudo na safra 1980/81 (kg CH₂O/ha.mês), em comparação com dados originais de MACHADO (1981).

Assim sendo a quantidade de energia interceptada pelas folhas será muito baixa conforme indica o fator de correção [C(IAF)], o que leva a baixos valores de CBC (Fig. 4). Do mês de outubro em diante, o valor de IAF cresce numa taxa acentuada e apesar do fator idade, (C(i)), diminuir a taxa de fotossíntese, os valores de CBc e CBn permanecem altos (Figura 4). Somando-se todos estes efeitos, os valores encontrados de CBC se mantêm altos até o mês de março do ano seguinte. Deste mês em diante, até o fim do ciclo, a diminuição da energia disponível, da temperatura, e o aumento da idade condicionam queda no valor de CBC ((CHANG *et al.*, 1965). Este conjunto tem seu valor máximo no mês de outubro, sendo que do plantio até este mês, a matéria seca acumulada, não atingiu valores muito altos. A fração consumida (Rm) pela respiração foi estimada em 15% da matéria seca produzida neste mês. Durante o pico da respiração, a produção de matéria seca bruta foi de 7414 kg/ha, e a matéria seca acumulada até o fim deste mês foi de 14183 kg/ha (Figura 5). Nesta fase a energia consumida pela respiração, para manter as funções fisiológicas vitais, mantém uma relação muito alta com a produção. O comportamento destes resultados é explicado por BARBIERI (1993) pelo grande crescimento dos órgãos de

consumo, enquanto que os órgãos produtores permanecem praticamente estabilizados ou diminuídos na sua capacidade. Os valores apresentados da matéria seca bruta (Fig. 5a) e líquida (Fig.5b) calculados pelo modelo, assemelham-se aos medidos por MEDINA et al. (1970), GROVE (1972), e aos estimados por MACHADO (1981). Nota-se que capacidade do modelo para os valores estimativos de biomassa líquida apresentaram menor aderência aos resultados de MACHADO (1981), em comparação aos valores estimados de matéria seca bruta, nas condições climáticas consideradas. Embora, o erro seja inferior a 5%, cujos valores dos coeficientes de determinação da equação linear para os valores estimados (Y) em relação aos observado por MACHADO (1981) foi acima de 0,95.

Deve-se levar em conta que o fator de correção da r max, relativo a idade Cr(i), foi modelado utilizando dados que abrangiam, curto período de tempo, ou seja, aproximadamente 300 dias. Não foram encontrados na bibliografia, pesquisas brasileiras conduzidas com canas mais velhas. A função matemático-fisiológica que estima Cr(i) poderá, conseqüentemente, ser revista ou modificada, através de dados bibliográficos ou levantados experimentalmente para estimativa de matéria seca líquida. Outro fator importante, trata-se dos valores de respiração ao longo do ciclo, que de acordo com BULL & TOVER (1974), que em torno de 10% dos fotossintetizados são resumidos ao longo do ciclo em média.

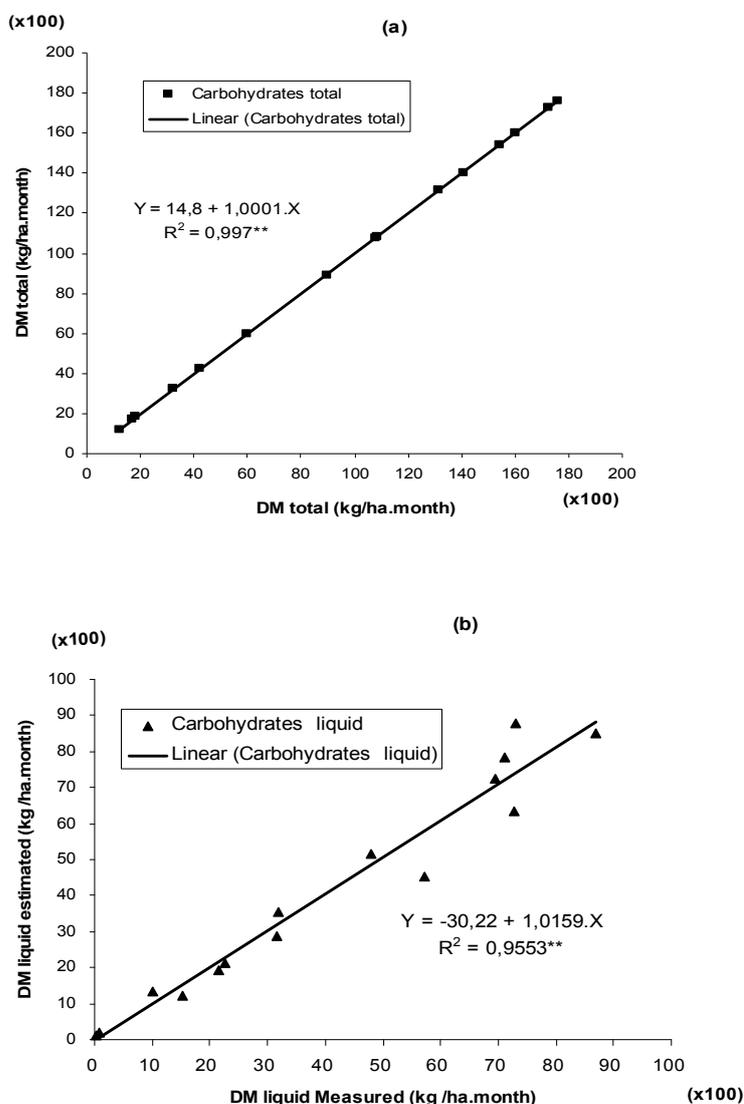


Figura 5. Valores da matéria seca bruta (a) e de matéria seca líquida (b), expressos em kg MS./ha.mês, estimada pelo modelo, comparado aos resultados de MACHADO (1981).

- Validação

A produtividade de cana obtida nos experimentos irrigados variou por variedade da seguinte forma: RB72 454 (102 a 131); NA 56-79 (95 a 140); CB 41-76 (89 a 125); CB 47-355 (92 a 140), CP 51-22 (79 a 133), Q138 (100 a 121) e Q141 (102 a 122). Notou-se que o modelo ofereceu valores de produtividade superestimados para CB41-76 e CB47-355 em 3% e subestimado em 0,5% para CP5122, NA5679 e RB72454, por isso o valor de CR baixo (0,001). No caso das cultivares australianas foram ligeiramente subestimadas a produtividade pelo modelo (CR=0,01), na ordem de 2%.

Nota-se que ocorre maior variabilidade dentro das estimativas para as condições australianas, que se deve a calibração não incluir dados desse país, apenas do Brasil.

Os valores R^2 de regressão linear entre as produtividades estimadas e medidas foram na ordem de 0,94 e 0,88, como nota-se na figura 6, para o Brasil e Austrália, respectivamente. Comparando-se os valores estimados e medidos, verificou-se que ocorreu o maior erro de superestimativa foi para CP51-22 (Fev-79 a Set-80), que erro em 11,6 toneladas por hectare, ou seja, para estimar uma produtividade real de 133 toneladas por área errou-se em menos de 9%.

Considerando apenas os casos de produtividade que superestimaram a produtividade de cana-de-açúcar, obtêm uma diferença sempre inferior a 10% ao resultado observado, o que está compatível com as pesquisas de LIMA & CATÁNEO (1997), que foi explicado pelos autores a influência das temperaturas máximas do ar do mês de setembro, as médias e mínimas de abril e novembro e a ocorrência de deficiência hídrica.

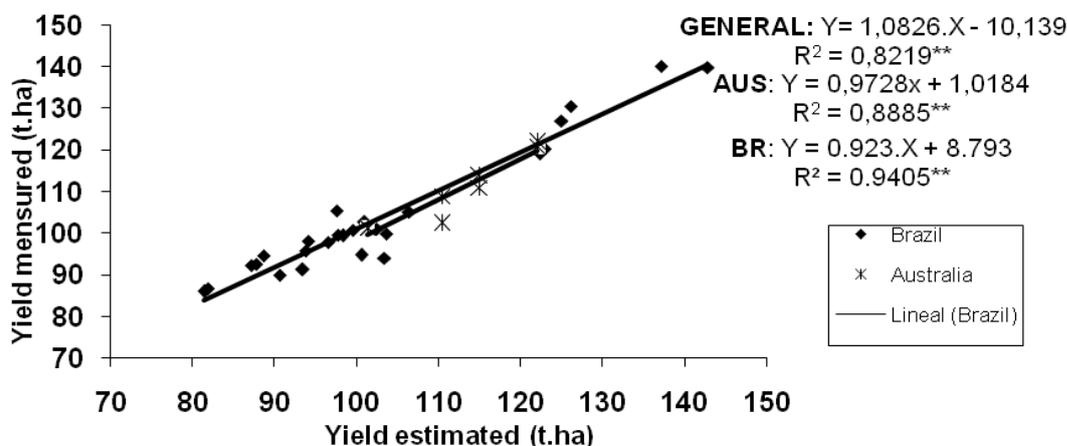


Figura 6. Regressão linear entre dados estimados (“yield estimated”) e observados (“yield measured”) em produtividade de cana, no Brasil (◆) e na Austrália (*).

Para a avaliação da conformidade das estimativas em comparação com as medições é avaliada utilizando a diferença E_i (estimativa) - M_i (medido) ou diferenças para um mesmo ponto, os índices melhores são especificados, tanto para as condições experimentais do Brasil e da Austrália, respectivamente:

- ✓ Simulation bias (**SB**): 0,009 and 1,8477;
- ✓ Root mean squared variation (**RMSV**): 4,5187 and 2,7262;
- ✓ Root mean squared error (**RMSE**): 4,5197 and 3,2062;
- ✓ General standard deviation (**GSD**): 4,5095 and 3,4162;
- ✓ Modeling Efficiency (**EF**): 0,9162 and 0,8089;
- ✓ Index of Agreement (**d**): 0,9785 and 0,9563;
- ✓ Coefficient of residual mass (**CRM**): 0,001 and 0,0149.

Os valores de estatísticas básicas (squared) são geralmente muito sensíveis aos valores extremos, nota-se que foram abaixo de 4,5, em conjuntos de dados que não são grandes. O menor limite de SB, RMSV, RMSE e GSD é 0, o que significa plena aderência entre as produtividades estimativas oferecidas pelo modelo e medições de campo. A utilização de EF é uma extensão para qualquer classe comum de modelos que se utiliza de r^2 , em procedimentos de regressões lineares. EF pode começar tanto valores positivos ou negativos, 1 sendo o limite superior, enquanto o infinito negativo é o menor teórico vinculado. Sendo, os valores de EF obtidos de 0,916 e 0,810 indicam um modelo adequado. O índice de acordo é tanto um valor que se aproxima de 1. Os valores de EF inferiores a 0, oferecem o resultado de um ajuste pior do que a média das medições. Para todos eles a menos CRM (0,001 e 0,01) um valor negativo indicando que, em média, o modelo subestimando os estimativas em relação aos dados medidos.

A eficácia do modelo proposto, agregando-se estimativas para cana de ano e de ano e meio, mostrou-se superior ao proposto por SCARPARI & BEAUCLAIR (2004) e de DOORENBOS & KASSAM (1979) em teste de TERAMOTO (2003) em estudos no Brasil e comparáveis as estimativas de produtividade potencial de cana-de-açúcar do QCANE utilizando os mesmos ensaios de 1991/1994, conduzido em Bundaberg na Austrália, publicado por LIU & BULL (2001), mas o modelo é mais simples de utilização e com menor numero de variáveis requeridas.

CONCLUSÕES

O modelo apresentou-se eficaz na estimativa da produtividade da cana de açúcar irrigada, tanto para cultivo de ano e de ano e meio, tendo possibilidade de ser utilizada para previsões ao longo da safra.

Permitir estimar uma táxas de fotossíntese subtraindo - se como perdas por respiração de manutenção, senescence de folhas e mortes de perfilhos durante o ciclo. O DM estimada pelo modelo foi o que contrasta com os dados obtidos durante o ciclo da experimental irrigadas campo (variedades RB72 454, NA 56-79, CB 41-76, CB 47-355, CP 51-22, Q138 e Q141), em Estado de São Paulo, Brasil e no Bundaberg, australiano.

Os resultados do total de DM foram modificados para produtividade em toneladas por hectare através equação linear para cada variedade, com regressão coeficientes mais elevados do que 0,88. O modelo mostrou coerente com simulações DM durante o ciclo, bem como na previsão do rendimento.

Agradecimentos

A Embrapa pela oportunidade de fazer o meu Pós-doutoramento, aos professores Carlos Diaz-Ambrona e Valter Barbieri que me receberam nas Universidades Politécnica de Madrid e de São Paulo, respectivamente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISCOTT, T.M.; A.P. WHITMORE. 1987. Computer simulation of changes in soil mineral nitrogen and crop nitrogen during autumn, winter and spring. J. Agric. Sci. (Cambr.), 109:141-157.

AGRIANUAL: anuário da agricultura brasileira. São Paulo: FNP, 2005. 520 p.

ALEXANDER, A. G. The energy cane alternative. Amsterdam; New York: Elsevier, 1985. 509 p.

ASSUNÇÃO, H. F. Relações entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação solar global em Piracicaba/SP. 1994. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BARBIERI, V.; SILVA, F.C. da Adequação do método da zona agroecológica (FAO) para estimativa do acúmulo mensal potencial de matéria seca da cana-de-açúcar (*saccharum spp.*) e da produtividade agrícola para diferentes condições climáticas. ANAIS. XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 02 a 05 de Julho de 2007. Aracaju – SE. (CD-ROM).

- BARBIERI, V.; SILVA, F.C. da; GODOY, A. Coeficiente de cultura da cana-de-açúcar (*saccharum* spp.), na planta e soca como função do acúmulo de graus-dia durante ciclo de produção. ANAIS. XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 02 a 05 de Julho de 2007. Aracaju – SE. (CD-ROM).
- BARBIERI, V. Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.): um modelo matemático-fisiológico de estimativa. 142 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba. 1993.
- BARBIERI, V. e VILLA NOVA, N.A. Evapotranspiração da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 2, Rio de Janeiro, 1977. Anais. v. 3. p. 37-52.
- BERNARDES, M. S.; TERAMOTO, E. R.; BARBOSA, M.; SADER, S. L. Comparação entre a produtividade real e simulada através do modelo matemático, avaliada em cinco variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos, Piracicaba, n. 2, v.1, p. 44, 2002.
- BULL, T.A. e TOVEY, D.A., Aspects of modelling sugarcane growth by computer simulation. Proc. Intern. Soc. Sugar Cane Technol. 15: 1021-1032, Durban, South Africa. 1974.
- BULL, T.A., The taxonomix significance of quantitative morphological characters and physiological stuchis in *Saccharum*. ISSCT 12: 985-994. 1965.
- BULL, T.A. Photosynthesis efficiencies and photorespirations in Calvin cycle and C4 - dicarboxylic acid plants. Crop Sci. 9: 726-729. 1969
- DE WIT, C. T. Photosynthesis of leaf canopies. Wageningen: Pudoc, 1965. 57p. (Agriculture Research Report , 663).
- DE WIT, C. T. Simulation of living systems. In: PENNING DE VRIES, F. W. T.; LAAR, H. H. van (Ed.). Simulation of plant growth and crop production. Wageningen: Pudoc, 1982. p. 3-8. Discussão, 538).
- DOOREMBOS, J. e KASSAM, A.H. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos, 1979. Estudio FAO: Riego y Drenaje 33, Roma.
- DOOREMBOS, J.; KASSAN, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Tradução de GHEYI, H. et al. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (Estudos FAO: Irrigação e drenagem, 33).
- FOX, D.G. Judging air quality model performance: a summary of the AMS workshop on dispersion models performance. Bull. Am. Meteorol. Soc., 62:599-609. 1981.
- GASCHO, G.J.; SHIH, S.F. Sugarcane. In: Teare, I.D.; Peet, M.M., ed. Crop-water relations. New York, Jonh Wiley, 1983. 547 p.
- GREENWOOD, D.J., J.J. NEETESON, ; D A. DRAYCOTT. Response of potatoes to N fertilizer: dynamic model. Plant Soil, 85:185-203. 1985.
- GLOVER, J., Practical and theoretical assessments of sugarcane yield potential in Natal. Proc. S. Afr. Sug. Technol. v.46, p. 138–141, 1972.
- HARTT, C.E.; BURR, G.O. Factors affecting photosynthesis in sugarcane. INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 12., 1967. Proceedings, Cartagena de Indias: Celam, 1967. p. 590-609.
- HEEMST, H.D.J.van. Grop phenology and dry matter distribution In: KEULEN,H. van; WOLF. J. (Ed.). Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Wageningen, PUDOC,1986, p.27-40.
- HSIAO, T.C. Plant response to water stress. Plant Physiology. n.24, p.519-570, 1973.
- INMAN-BAMBER, N. G. A growth model for sugar-cane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. South African Journal of Plant and Soil, Pretoria, v.8, p. 93-99, 1991.
- INMAN-BAMBER, N. G., THOMPSON, G. D. Models of dry matter accumulation by sugarcane. Proceedings... South Africa Sugarcane Technol. Assoc. 63, p. 212 – 216, 1989.
- IRVINE, J.E., 1971. Photosynthesis and stomatal behavior in sugarcane leaves as affected by light intensity and low air flow rates. Physiol. Plant. 24: 436-440.
- JORGENSEN, S.E., L. KAMP-NIELSEN, T. CHRISTENSEN, J. WINDOLF-NIELSEN,; B. WESTERGAARD. 1986. Validation of a prognosis based upon a eutrophication model. Ecol. Model., 35:165-182.
- KOBAYASHI, K.; M.U. SALAM. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. Agron. J., 92:345-352. 2000.

- LIU, D. L.; BULL, T. A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using process-based model. *Ecological Modelling*, Amsterdam, v. 144, n. 2, p. 181 – 211, 2001.
- LOAGUE, K.; R.E. GREEN. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *J. Contam. Hydrol.*, 7:51-73. 1991.
- LORDER, M. N., FLUCK, R. C., MISHOE, J. W., A method for analysis of sugarcane (*Saccharum Sp.*) biomass production systems. *Transactions of the ASAE*, St Joseph, V.158, p. 146–152, 1984.
- MACHADO, E. C. Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*). 1981. 115 f. Tese (Mestrado) – Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MEDINA, E.; SAN JOSÉ, J.J.; SEQUEIRA, P.E. Análisis de la productividad en caña de azúcar. III. Respiración en la oscuridad de hojas y tallos de cinco variedades de caña de azúcar y pérdidas nocturnas de materia seca. *Turrialba* 20: 302-306. 1970.
- MONSI, M. e SAEKI, T., Uber den lichfaktor in den pflanzengesellschafden und seine bedeutung für dilstoffproduktion. *Jap. J. Bot.* 14: 22-52. 1953.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, vol. 19. University Press, Cambridge, p. 205-234, 1965.
- MONTEITH, J.L., 1965. Light distribution and photosynthesis in field crops. *Ann. Bot.* 29: 17-37.
- O'LEARY, G. J. A Review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. *Field Crops Research*, v. 68, p. 97-111, 2000.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas, Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.
- ROSSETTI, L. Zoneamento agrícola em aplicação de credito e securidade rural no Brasil: aspectos atuais e de política agrícola. *Revista Brasileira de Agrometereologia*, Santa Maria, v. 9, p. 386-399, 2001.
- SILVA, F. C. , BERGAMASCO, A. F., MONTALI, E. F., RODRIGUES, L. H. E FARIAS, J. R. B., Avaliação da adubação nitrogenada e potássica em cana-de-açúcar baseada em modelos, In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, São Pedro, SP. Anais... Piracicaba: Potafos, 2005. Editado por Yamada, T. e Roberts, T. L.
- SILVA, F. C. da; BERGAMASCO, A. F. Levantamento de modelos matemáticos descritos para a cultura da cana-de-açúcar. *Revista Biociências*, Taubaté, v. 7, p.7-14, jan.-jun. 2001.
- STANHILL, G. e FUCHS, M. The relative flux density of photosynthetically active radiation. *J. appl. Ecol.* 14: 371-322. 1977.
- SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. de. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters *Scientia Agricola*. Piracicaba, v. 61, n. 5, p. 486-491, sep./oct., 2004 .
- TERAMOTO, E. R. Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) baseados em parâmetros do solo e do clima. 2003. 86 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- TERUEL, D. A.; BARBIERI, V.; FERRARO JUNIOR, L.A. Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 54, p.39-44, 1997. Número especial.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. *Drexel Institute of Technology*, v. 8, n. 1, p.1-14, 1955.
- União da Indústria de Cana-de-açúcar – UNICA. Produção de álcool, açúcar e cana do Brasil das safras 1990/91 a 2005/06. Informativo UNICA, no. 74. Disponível em: <<http://www.unica.org.br>>. Acesso em: 18 março 2007.
- VAN DEN BERG, M.,B.P . Uncertains in the appraisal of water availability and consequences for simulated sugarcane yield potenciales in São Paulo State, Brazil *Agriculture Ecosystems and Envoinment*, Amsterdam, v. 81, 43-55, 2000.
- WILLMOTT, C.J.; WICKS, D.E.. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. *Phys. Geogr.*, 1:59-73. 1980.