

ESTIMATIVA DO ACÚMULO DE FITOMASSA DA SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR FERTIRRIGADA COM DOSES DE N-FERTILIZANTE UTILIZANDO MODELO DE SIMULAÇÃO

RAÚL ANDRES MARTINEZ URIBE¹; GLAUBER JOSÉ DE CASTRO GAVA²;
ORIEL TIAGO KÖLLN³ E JOÃO CARLOS CURY SAAD⁴

¹ Engenheiro Agrônomo, Professor Assistente Doutor da FCE/UNESP-Tupã, Email: raul@tupa.unesp.br

² Engenheiro Agrônomo, Pesquisador Científico da APTA, Pólo Regional do Centro Oeste, Jaú, Email: ggava@apta.sp.gov.br

³ Especialista em Produção de Biomassa CTBE/CNPEM, Campinas-SP, Email: oriel.kolln@bioetanol.org.br

⁴ Engenheiro Agrônomo, Professor Adjunto da FCA/UNESP- Botucatu, Email: joosaad@fca.unesp.br

1 RESUMO

Devido ao importantíssimo papel que a indústria canavieira exerce no âmbito nacional torna-se fundamental saber como a quantidade e a qualidade de matéria prima produzida são afetadas pelos tratamentos culturais. Entretanto, nem sempre é possível obter dados reais (tempo, custo, acesso limitado), surgindo os modelos de simulação. Assim, este trabalho teve como objetivos: utilizar e validar o modelo de simulação APSIM® (Sistema simulador de produção agrícola) e realizar estimativas (simulações) de acúmulo da biomassa e produtividade em soqueira de cana, nos manejos irrigados e de sequeiro com diferentes doses de N-fertilizante. O experimento foi conduzido com 6 tratamentos: T1 (irrigado sem dose de nitrogênio (N)), T2 (irrigado com dose de 70 kg ha⁻¹ de N), T3 (irrigado com dose de 140 kg ha⁻¹ de N), T4 (irrigado com dose de 210 kg ha⁻¹ de N), T5 (não irrigado sem dose de N) e T6 (não irrigado com dose de 140 kg ha⁻¹ de N). Compararam-se toneladas de cana por hectare (TCH), de açúcar por hectare (TPH), de matéria seca da parte aérea (PA) e do colmo (C). O APSIM simulou os parâmetros avaliados com alta correlação. As curvas de acúmulo de biomassa seguiram a tendência sigmoide característica e evidenciaram o efeito positivo da irrigação e da adubação nitrogenada.

Palavras-Chave: APSIM, *Saccharum* spp., irrigação, nitrogênio, modelagem.

URIBE, R. A. M.; GAVA, G. J. de C.; KÖLLN, O. T.; SAAD, J. C. C.
ESTIMATE OF BIOMASS ACCUMULATION IN SUGARCANE RATOON USING
SIMULATION MODEL IN THE IRRIGATED AND RAINFED MANagements
WITH DIFFERENT DOSES OF N-FERTILIZER

2 ABSTRACT

With the key role that the sugarcane industry has on the national level is vital to know how the quantity and quality of raw material produced is affected by the cultural practices. However it is not always possible to obtain real data (time, cost, difficulty of access) appearing simulation models. So this study aimed to: use and validate the APSIM® (Agricultural Production System sIMulator) and make estimates (simulations) of accumulation of biomass and productivity of ratoon sugarcane, in irrigated and rainfed

conditions with different doses of N fertilizer. The experiment was carried with 6 treatments: T1 (Irrigated without dose of nitrogen (N)), T2 (irrigated with a dose of 70 kg ha⁻¹ N), T3 (irrigated with a dose of 140 kg ha⁻¹ N), T4 (irrigated with a dose of 210 kg ha⁻¹ N), T5 (non-irrigated without N rate) and T6 (non-irrigated with a dose of 140 kg ha⁻¹ N), all doses of N as urea. Comparisons tons of cane per hectare (TCH), of sugar per hectare (TPH), of dry weight of shoot (PA) and stem (C). The APSIM simulated parameters evaluated with high correlation. The curves of biomass accumulation followed the sigmoidal characteristic trend and show the positive effect of irrigation and nitrogen fertilization.

Keywords: APSIM, *Saccharum* spp., Irrigation, nitrogen, modeling.

3 INTRODUÇÃO

A indústria canavieira exerce atualmente papel fundamental na economia nacional. O fornecimento de matéria prima em níveis e frequências adequadas é imprescindível para otimizar o uso das infraestruturas disponíveis. Portanto, é de vital importância saber como a quantidade e a qualidade produzidas são afetadas pelo clima, pelos tratos culturais e pela região, e a partir dessas informações fazer previsões de safra para aperfeiçoar os processos envolvidos.

Nem sempre é possível obter dados reais, por várias razões, tais como, tempo, custo, dificuldade de acesso, entre outros. Como resposta surgem os modelos de simulação, que são programas computacionais que fornecem para os pesquisadores, engenheiros e técnicos ferramentas valiosas que ajudam na tomada de decisões sem a necessidade de implementar o experimento e esperar pelo seu ciclo. Além disso, propiciam a possibilidade de prever situações futuras, gerando decisões que podem resultar em menores custos e maiores produtividades (Hamid & Abdullah, 2008). Estudos mostram a importância da modelagem em cana-de-açúcar, Gouvêa (2008) simulou condições de produtividade para o município de Piracicaba-SP, avaliando a mudança climática para os anos 2020, 2050 e 2080, obtendo valores de produtividade real de 12, 32 e 47% superiores à condição atual, respectivamente. Entretanto, os modelos de simulação devem ser avaliados e validados, com dados reais, estabelecendo as similaridades entre eles (Martin et al., 2007).

Vários estudos foram feitos para validar o uso do modelador APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*) como ferramenta na estimativa de crescimento de cana-de-açúcar e da produtividade da mesma (Asseng et al., 1998; Cheeroo-Nayamuth, 1998; Probert et al., 1998; Cheeroo-Nayamuth et al., 2000; O'Leary, 2000; Thorburn et al., 2001), no entanto, nenhum deles desenvolvido para as condições brasileiras.

A estrutura do modelo APSIM é constituída pelos seguintes componentes: um conjunto de módulos que simulam processos biológicos e físicos em sistemas agrícolas; um conjunto de módulos de gestão que permite ao usuário especificar as regras de manejo pretendidas caracterizando o cenário que está sendo simulado; diversos módulos para facilitar a entrada e saída de dados da simulação; e um motor de simulação que conduz o processo de simulação e facilita a comunicação entre os módulos interdependentes (McCown et al., 1996).

A cana-de-açúcar, por ser uma poácea de mecanismo fotossintético C₄, responde à adubação nitrogenada e ao fornecimento de água. Alguns estudos conduzidos com o intuito de provar a importância da fertirrigação com N-fertilizante na sua produtividade têm demonstrado o efeito sinérgico positivo que estas duas variáveis possuem (Uribe et al., 2013; Thorburn et al., 2003; Wiedenfeld, 1995 e Ng Kee Kwong et al., 1999). Estas duas variáveis

(água e nitrogênio) são extremamente importantes no desenvolvimento vegetal. A água, como constituinte de 70% da massa dos vegetais, como doadora de elétrons para o processo de fotossíntese e como reguladora da abertura estomática nas plantas, entre outras (Taiz & Zeiger, 2004); o nitrogênio por sua vez é parte fundamental dos aminoácidos, bases químicas das proteínas (David et al., 2002).

Desta forma, é importante simular como a cultura da cana-de-açúcar responde a diversos cenários de água e nitrogênio principalmente em relação ao crescimento, acúmulo de biomassa e reserva de carboidratos. No crescimento da cana-de-açúcar, segundo Machado (1987), existem três fases perfeitamente caracterizadas: uma fase inicial de crescimento lento (10%); uma fase de crescimento rápido em que 70% a 80% de toda matéria seca é acumulada, e uma última fase na qual o crescimento é novamente lento quando cerca de 10% da matéria seca total é acumulada. Essas três fases de crescimento de matéria seca da cana-de-açúcar, quando representadas graficamente, formam uma curva sigmoidal, ou seja, ao elaborar o gráfico dos dados (reais e simulados) essa tendência sigmóide deve ser mantida (Vitti et al., 2008).

Diante do exposto os objetivos deste trabalho foram utilizar e validar um modelo de simulação de crescimento de cana-de-açúcar e realizar estimativas (simulações) de acúmulo da biomassa e produtividade em soqueira de cana, nos manejos irrigados e de sequeiro com diferentes doses de N-fertilizante.

4 MATERIAL E MÉTODOS

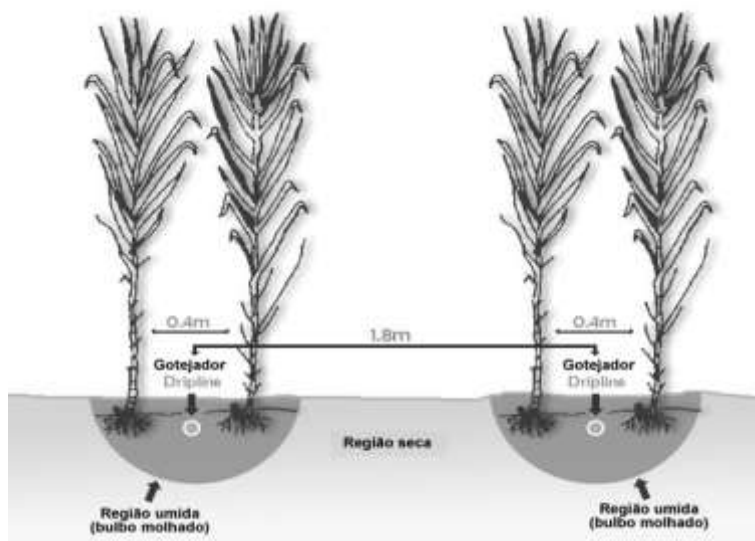
O experimento foi instalado na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento (UPD) de Jaú/SP, da Agência Paulista para Tecnologia do Agronegócio (APTA) Pólo Centro-Oeste, localizada na latitude de 22°17' S, longitude 48° 34' W e altitude média de 580 m. O solo da área é Argissolo eutrófico, que apresentou na camada de 0-25 cm: pH (CaCl₂) 5,2; P (resina) 19,0 mg dm⁻³; K 0,9 mmolc dm⁻³; Ca 27,0 mmolc dm⁻³; Mg 4,0 mmolc dm⁻³; CTC 105,0 mmolc dm⁻³; V (%) 66; e composição em areia, silte e argila de 660, 70, 270 g kg⁻¹, respectivamente.

Avaliou-se neste estudo o terceiro ciclo produtivo (segunda soqueira) da cultivar SP80-3280, que apresenta as seguintes características agronômicas e tecnológicas: boa produtividade de cana-planta e soca (3 e 12% superior a SP79-1011, variedade padrão de comparação, respectivamente); perfilhamento intermediário com bom fechamento das entrelinhas; alto teor de fibra; média exigência em fertilidade do solo; boa brotação de soqueira; sensibilidade média a herbicidas; alto teor de sacarose; resistência ao mosaico, carvão e ferrugem e tolerância à presença da escaldadura (Copersucar, 1997).

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições para cada experimento, sendo os tratamentos: T1 (irrigado sem dose de nitrogênio (N)), T2 (irrigado com dose de 70 kg ha⁻¹ de N), T3 (irrigado com dose de 140 kg ha⁻¹ de N), T4 (irrigado com dose de 210 kg ha⁻¹ de N), T5 (não irrigado sem dose de N) e T6 (não irrigado com dose de 140 kg ha⁻¹ de N); todas as doses de N-fertilizante na forma de ureia.

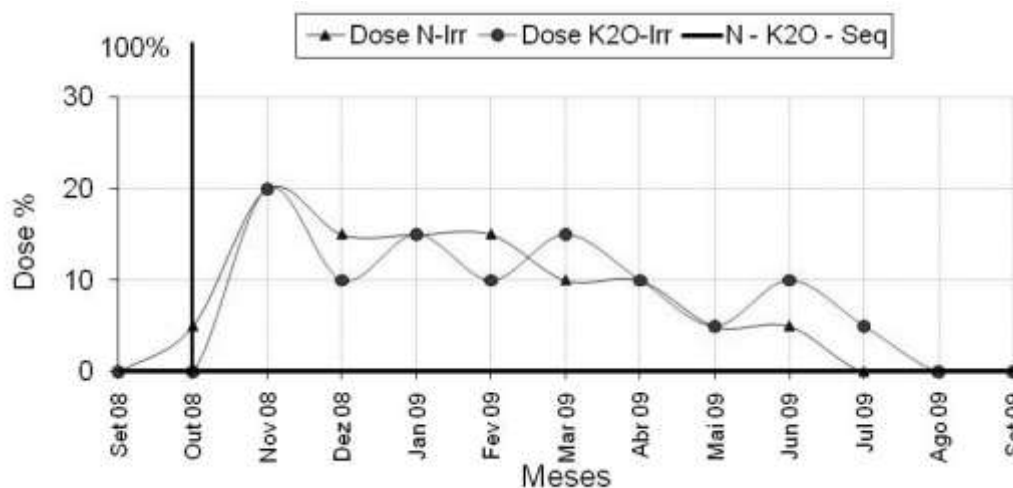
As parcelas constituíram-se de cinco sulcos de 30 metros de comprimento. Em todos os tratamentos foi utilizado o plantio em linha dupla (plantio “em W” ou plantio em “abacaxi”), com espaçamento duplo alternado de 1,40 m x 0,4 m. Nos tratamentos irrigados o tubo gotejador foi enterrado a 20 cm de profundidade da superfície do solo, no meio da linha dupla conforme a Figura 1. O tubo gotejador utilizado foi o Dripnet PC® 22135 FL vazão de 1,0 L h⁻¹ com gotejadores a cada 0,5 m.

Figura 1. Instalação dos tubos gotejadores nos tratamentos irrigados.



Todos os tratamentos receberam uma dose de 180 kg ha⁻¹ de P na forma de superfosfato simples aplicado no plantio, 220 e 130 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio no plantio e na soqueira, respectivamente. A aplicação de N e K nos tratamentos irrigados foi feita por fertirrigação realizada ao longo do crescimento da cultura, e nos tratamentos não irrigados (sequeiro) foi realizada no momento do plantio e 30 e 40 dias após o corte da soqueira (Figura 2).

Figura 2. Distribuição da adubação N, P e K, no ano agrícola 2008-2009.



4.1 Dados de acúmulo de matéria seca e de produtividade

Para determinação da matéria seca da parte aérea foi realizada a colheita final manualmente de 1 m de linha, separando-se amostras de folhas secas, ponteiros e colmos. Nessas amostras foi determinada a biomassa. Todo o material foi triturado em picadora mecânica de forragem. Depois da moagem e homogeneização de cada amostra úmida,

retiraram-se subamostras que posteriormente foram secadas em estufa de ventilação forçada, com temperatura de 62°C, até que a massa permanecesse constante. Com esses resultados foi estimada a produção média de matéria seca de colmo, ponteiro, folha seca e parte aérea, em Mg ha⁻¹.

Na colheita foi realizada a determinação, no Laboratório de Tecnologia da Associcana (Associação dos Produtores de Cana da Região de Jaú), dos atributos tecnológicos selecionando 10 canas de cada parcela aleatoriamente. As amostras de cada tratamento foram trituradas e homogeneizadas em betoneira. A extração do caldo foi feita por uma prensagem, a 250 kgf cm⁻² por 1 minuto, de 500 g de amostra desfibrada e homogeneizada. Do caldo extraído analisou-se o Pol% da cana (PCC) (Consecana, 2003).

A produtividade de colmos, em tonelada de cana por hectare (TCH), foi obtida por meio da relação proporcional com a área de cada parcela, considerando 5.556 plantas ha⁻¹. A tonelada de Pol por hectare (TPH) foi obtida pelo produto entre TCH e o PCC.

4.2 Simulação no APSIM

APSIM é um sistema de software que permite realizar simulações de modelos de produção agrícola. A principal inovação é a mudança de um conceito central de que uma cultura responde às fontes de recursos para o conceito de que um solo como base do processo responde ao clima, ao manejo e às culturas (Mccown et al., 1996).

O APSIM está estruturado em torno do solo, da planta e dos módulos de gestão. Estes módulos incluem: uma gama diversificada de culturas, pastagens e árvores; os processos do solo que incluem balanço de água, de N e transformações de P; o pH do solo; a erosão; e vários controles de manejo. O APSIM resultou de uma necessidade de ferramentas que forneçam previsões precisas de produção vegetal em relação ao clima, ao genótipo, ao solo e ao fator de manejo, dando simultaneamente respostas em longo prazo de problemas de manejo e de recursos (Cheeroo-Nayamuth et al., 2000).

Fundamentalmente o programa foi preenchido com dados climatológicos de 12 anos de registro diário o que constituiu um universo de 4380 dados para cada elemento do clima: temperaturas mínima e máxima em °C, radiação global em MJ.m⁻², precipitação em mm; dados edafológicos: peso específico do solo em g cm⁻³, conteúdo de água volumétrico: no ponto de saturação, no limite superior da água disponível, no limite inferior (15 bar) e no solo seco (água estrutural), todos em mm água.mm solo⁻¹; conteúdo de carbono orgânico em %, boro, fósforo e manganês em mg kg⁻¹, capacidade de troca de cátions (CTC), cálcio, magnésio, sódio e potássio em cmol⁺ kg⁻¹, sódio trocável em % (V), pH do solo, alumínio em meq 100 g⁻¹, composição de areia, silte e argila em %, NO₃ e NH₄ em ppm; dados de manejo da cana-de-açúcar: data de plantio, duração do ciclo da cana planta, densidade de perfilhos por m² na cana planta, cultivar de cana-de-açúcar, profundidade de plantio em mm, número de socas, duração do ciclo da cana soca e densidade de perfilhos por m² na soca; dados de manejo da adubação: data, quantidade e tipo de fertilizante usado; e dados de irrigação: fração crítica da água disponível no solo abaixo da qual se aplica a irrigação, capacidade do reservatório de água, eficiência da irrigação, quantidade de solutos aplicados em ppm, assim como a frequência. Depois da obtenção e abastecimento dos dados necessários para fazer a simulação no programa APSIM, o mesmo foi rodado, obtendo-se estimativas de acúmulo de matéria seca do colmo e da parte aérea, produção de colmos e de açúcar por hectare para a cultura de cana-de-açúcar nos diferentes tratamentos estabelecidos.

Para validar a simulação foram utilizados de forma conjunta: coeficiente de correlação de Pearson (r) entre valores medidos e simulados (Morettin & Bussab, 2003), índice de concordância de Willmott (Id) que mede a proximidade existente entre os valores medidos e simulados (Willmott, 1981), e o coeficiente de determinação da regressão R². Em todos os

índices estabeleceu-se o limite de 0,75 como valor mínimo para considerar a simulação da variável estudada como adequada.

As variáveis de saída do modelo estudadas foram: produtividade de colmos por hectare (TCH), produtividade de açúcar por hectare (TPH), massa seca do colmo (C) e massa seca da parte aérea (PA), todas em Mg ha^{-1} . Com os dados simulados validados com R^2 acima de 0,75 provenientes do modelo APSIM, foram construídos gráficos de acúmulo de biomassa ao longo do ciclo da cultura até 360 dias após o corte (DAC), realizando regressões sigmóides utilizando o programa Sigma Plot® segundo a função: $Y = Y_{\text{max}} / (1 + \exp(-(\text{DAC}-A)/ B))$, em que: Y: acúmulo da variável simulada em Mg ha^{-1} , Y_{max} : valor máximo da variável simulada (assíntota horizontal), A e B são as constantes da função.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Validação do modelo

A comparação entre os dados reais e os simulados das variáveis TPH, PA e C resultou em índices de validação satisfatórios. Keating et al. (1999) reportaram coeficientes de determinação (R^2) para as previsões do modelo APSIM em comparação com dados observados de 0,93 para a biomassa da cultura e 0,83 para sacarose do colmo, e definiram como satisfatórios valores acima de 0,75 (Tabela 1).

Observa-se, efeito significativo da irrigação e da adubação nitrogenada na produtividade de colmos (TPH) e no acúmulo de massa de matéria seca da PA e dos C nos diferentes tratamentos comparados, tanto para os dados reais quanto para os simulados (Tabela 1).

Os valores de PA e C afetam diretamente os valores de TCH, pois constituem no primeiro caso a fonte de fotoassimilados e no segundo o acúmulo de fitomassa seca nos colmos. Casagrande (1991) cita a importância do nitrogênio na adubação da cana-de-açúcar, como sendo o primeiro elemento na ordem de absorção dos nutrientes. Wiedenfeld & Enciso (2008) relataram a importância da aplicação de nitrogênio via fertirrigação obtendo valores de 100 Mg ha^{-1} de TCH com doses de 140 kg ha^{-1} , para a terceira soqueira. Ng Kee Kwong et al. (1999) reportaram comportamentos similares, valores de 162,3 e $159,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ de TCH quando comparadas adubações de 80 e 120 kg ha^{-1} via fertirrigação e cobertura, respectivamente, evidenciando assim a importância da aplicação do nitrogênio de forma fracionada através do sistema de irrigação. Observa-se uma tendência similar no presente estudo ao comparar o tratamento T3 ($140 \text{ kg de N ha}^{-1}$ com irrigação) e o tratamento T6 ($140 \text{ kg de N ha}^{-1}$ sem irrigação) obtendo 132,8 e $91,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ de TCH nos dados reais e 120,7 e $85,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ de TCH nos dados simulados (Tabela 1).

Tabela 1. Validação do modelo para as variáveis: produtividade de colmos por hectare (TCH), toneladas de açúcar por hectare (TPH) e fitomassa seca dos colmos (C) e da parte aérea (PA).

Trats	TCH		TPH		C		PA	
	Real	APSIM	Real	APSIM	Real	APSIM	Real	APSIM
	Mg ha ⁻¹							
T1	83,6 (±4,7*)	77,9	14,3 (±1,0)	15,8	24,1 (±2,5)	24,8	41,4 (±4,2)	31,5
T2	97,5(±9,2)	100, 9	16,7 (±1,7)	16,9	28,4 (±7,4)	31,9	49,9 (±11,1)	40,6
T3	132,8 (±9,2)	120, 7	22,3(±1,6)	17,3	39,9 (±2,9)	39,6	61,8 (±6,6)	51,1
T4	130,4 (±12,4)	120, 3	21,6(±1,9)	16,9	39,8 (±4,3)	39,4	64,1 (±7,8)	50,8
T5	64,7 (±12,4)	67,6	10,8(±2,0)	13,4	17,6 (±4,2)	21,8	31,8 (±6,6)	28,1
T6	91,3 (±15,7)	85,4	15,3(±2,4)	13,4	26,9 (±5,0)	27,8	44,8 (±7,0)	35,1
R ²	0,76		0,52		0,82		0,75	
Id	0,90		0,62		0,93		0,76	
r	0,87		0,71		0,9		0,86	

T1 - sem nitrogênio (N) e com irrigação, T2 – com 70 kg ha⁻¹ de N e com irrigação, T3 - com 140 kg ha⁻¹ de N e com irrigação, T4 - com 210 kg ha⁻¹ de N e com irrigação, T5 - sem nitrogênio e sem irrigação, T6 - com 140 kg ha⁻¹ de N e sem irrigação. R² coeficiente de determinação, Id índice de concordância de Willmott, r coeficiente de correlação de Pearson, * desvio padrão da média.

A irrigação tem um papel fundamental no crescimento e na produção de biomassa (TCH), Farias et al. (2008) estudando a cultivar SP 79-1011 na região norte-paraibana dos tabuleiros costeiros pesquisaram a eficiência do uso da água e reportaram valores de 31,13 e 88,10 Mg ha⁻¹ para o tratamento de sequeiro e irrigado com lâmina igual a 100% da evapotranspiração da cultura (ETC), respectivamente.

Somente os valores de TPH (açúcar por hectare) apresentaram resultados de correlação, concordância e regressão abaixo do esperado. A diferença entre os valores medidos e os simulados provavelmente deve-se ao cálculo da TPH (TPH=TCH*PCC) em que o PCC é a porcentagem de massa de sacarose aparente no caldo, e como tal é dependente das condições de manejo, ambientais e edáficas, entre outras. Estas variáveis ambientais também afetam outras variáveis resposta estudadas (TCH), no entanto o modelo APSIM não apresenta a possibilidade de modificar essa variável de acúmulo de sacarose, assumindo-se constante a relação de um grama de sacarose por cada grama de água perdida, na etapa de maturação (Keating et al. 1999).

5.2 Estimativa do acúmulo de fitomassa seca relacionada com água e nitrogênio em soqueira de cana

Devido ao alto índice de Willmott obtido pelas variáveis simuladas de TCH e PA, estas foram utilizadas para realizar gráficos de produtividade de colmos e acúmulo de matéria seca (Figuras 3 a 6).

Todas as curvas de acúmulo de matéria seca da PA seguem a tendência sigmoideal (Figura 3) descrita por Silveira, (1985); Brzesowsky, (1986); Alvarez, (1998) e Gava, (1999).

Similarmente todas as curvas representam as três fases de crescimento reportadas por Machado (1987), com acúmulos de matéria seca de 10, 70-80 e 10% para a fase inicial, intermediária e final, respectivamente. Uma possível interpretação fisiológica dessas diferentes fases de crescimento é que a cana-de-açúcar, no início, depende de reservas do rizoma para a síntese dos tecidos que compõem os perfilhos. Após a emergência das folhas, os processos anabólicos, dependentes da fotossíntese, se traduzem por um rápido crescimento, atingindo o estágio de maturação e, posteriormente, a planta inicia uma fase de senescência, refletindo na paralisação da produção de matéria orgânica (Gava, 1999).

Verifica-se também que o tratamento fertirrigado com doses de 140 kg ha⁻¹ de N antecipou e prolongou a fase intermediária (crescimento ativo), acumulando desta forma mais matéria seca. Esse aumento deve-se à resposta da planta à fertirrigação nitrogenada, a qual se mantém com as folhas verdes por mais tempo, produzindo desta forma maiores níveis de fotoassimilados.

Comportamento similar foi observado por Vitti et al. (2008), em cana-planta de sequeiro adubada com 120 kg ha⁻¹ de N e por Farias et al. (2008), em cana irrigada adubada com 67,5 kg ha⁻¹ de N. Silva (1995) obteve respostas similares estudando cinco cultivares (RB855113, RB928064, RB845210, RB845197 e RB855536), demonstrando assim a validade do modelo APSIM.

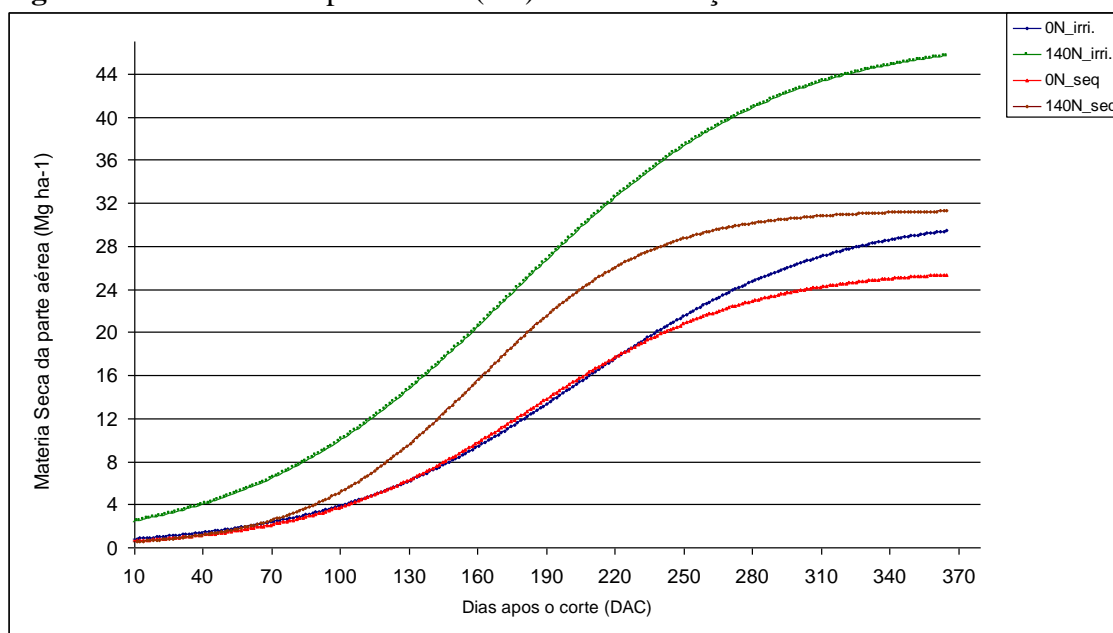
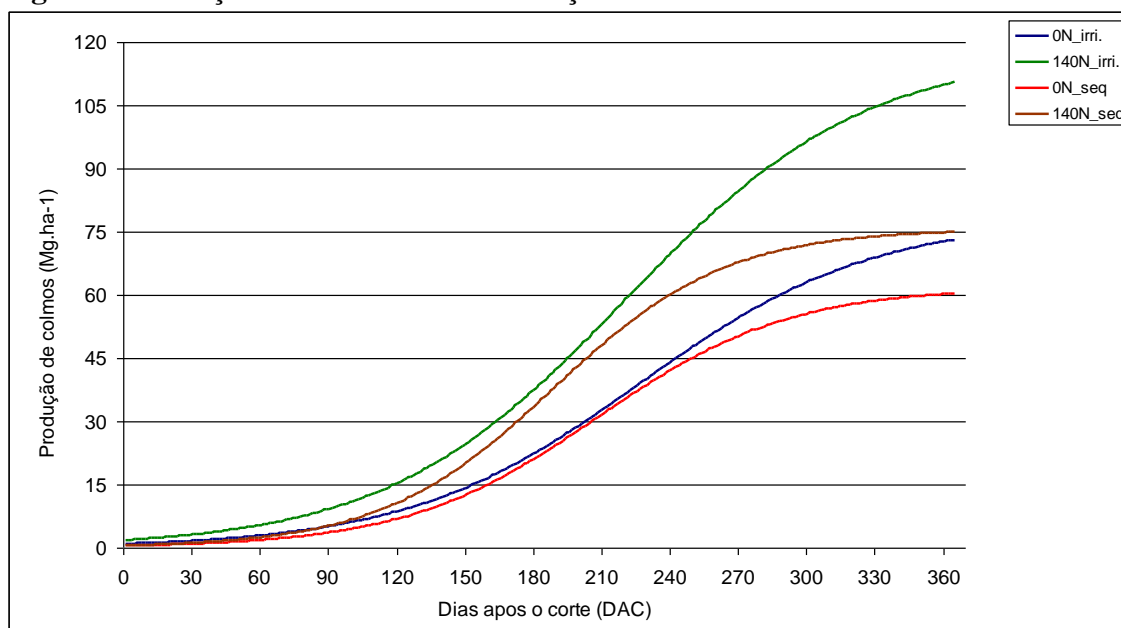
Na Tabela 2 apresentam-se as equações da regressão sigmoidal para as variáveis TCH e PA. Os valores de Ymax para as equações são coerentes com os máximos de acúmulo de matéria seca da PA e de produtividade (TPH) reportados na literatura (Doorenbos & Kassam, 1979; Ng Kee Kwong & Deville, 1994; Wiedenfeld, 1995; Thorburn et al., 2003; Bologna-Campbell, 2007; Faroni, 2008). Gava (1999) obteve valores de Ymax=32 Mg ha⁻¹ para soqueira de cana em sistema de sequeiro adubada com 100 kg ha⁻¹ e 100 m³ ha⁻¹ de vinhaça. Este valor pode ser comparado ao obtido no tratamento 6, sequeiro com doses de 140 kg ha⁻¹ (Tabela 2) de 31,42 Mg ha⁻¹.

Ramesh et al. (2000), estudando cana planta na Índia adubada com 220 kg ha⁻¹ de N, com diferentes níveis de estresse hídrico, obtiveram resultados de TCH de 117 (sem estresse) e 71 Mg ha⁻¹ (estresse alto), correspondendo à irrigação quando a capacidade de água disponível (CAD) do solo diminuiu 50% e sem irrigação, respectivamente. Resultados similares foram obtidos neste estudo, 117,56 e 75,63 Mg ha⁻¹ no tratamento 3 e 6, respectivamente (Figura 4 e Tabela 2).

Tabela 2. Equações de regressão sigmoidal das variáveis: produtividade de colmos por hectare (TCH), e fitomassa seca da parte aérea (PA) em Mg ha⁻¹.

Trat s	TCH	R ²	Matéria seca da parte aérea (PA)	R ²
1	Y= 77,90/(1+exp(-(x-226,96)/51,06))	0,99*	Y= 31,03/(1+exp(-(x-205,19)/54,49))	0,99*
3	Y= 117,56/(1+exp(-(x-220,45)/52,66))	0,99*	Y= 47,38/(1+exp(-(x-174,69)/56,89))	0,97*
5	Y= 61,83/(1+exp(-(x-208,36)/42,24))	0,99*	Y= 25,94/(1+exp(-(x-183,67)/47,37))	0,99*
6	Y= 75,63/(1+exp(-(x-189,11)/37,88))	0,99*	Y= 31,42/(1+exp(-(x-160,61)/37,50))	0,99*

* Significativo com (p<0,05). **X=DAC (dias após o corte da soqueira). R²= coeficiente de determinação.

Figura 3. Massa seca da parte aérea (PA) da cana-de-açúcar.**Figura 4.** Produção de colmos da cana-de-açúcar.

5.3 Estimativa do acúmulo de fitomassa seca relacionada com doses de nitrogênio em soqueira de cana

Observam-se na tabela 3 as equações de regressão sigmoidal para as variáveis TCH e PA, e nas Figuras 5 e 6, as curvas de acúmulo de massa seca da parte aérea e de produtividade de colmos por hectare, respectivamente.

Ng Kee Kwong et al. (1999) trabalhando com primeira e segunda soqueira da cultivar R570, obtiveram valores de acúmulo de fitomassa seca da parte aérea de 43,1 e 45,7 Mg ha⁻¹ para doses de 80 e 120 kg ha⁻¹ de N via sistema de gotejo subsuperficial. Resultados semelhantes foram obtidos neste trabalho, 40,83 e 47,38 Mg ha⁻¹ de acúmulo de fitomassa

seca da parte aérea, para T2 (70 kg ha⁻¹ de N) e T3 (140 kg ha⁻¹ de N), respectivamente (Tabela 3 e Figura 5).

Tabela 3. Equações de regressão sigmoidal das variáveis: produtividade de colmos por hectare (TCH), e fitomassa seca da parte aérea (PA) em Mg ha⁻¹.

Trats	TCH	R ²	Matéria seca da parte aérea (PA)	R ²
1	$Y = 77,90 / (1 + \exp(-(**x - 226,96) / 51,06))$	0,99*	$Y = 31,03 / (1 + \exp(-(x - 205,19) / 54,49))$	0,99*
2	$Y = 104,83 / (1 + \exp(-(x - 239,26) / 55,56))$	0,99*	$Y = 40,83 / (1 + \exp(-(x - 216,99) / 58,01))$	0,99*
3	$Y = 117,56 / (1 + \exp(-(x - 220,45) / 52,66))$	0,99*	$Y = 47,38 / (1 + \exp(-(x - 174,69) / 56,89))$	0,97*
4	$Y = 117,31 / (1 + \exp(-(x - 220,91) / 52,74))$	0,99*	$Y = 47,03 / (1 + \exp(-(x - 177,95) / 56,43))$	0,97*

* Significativo com (p<0,05). **X=DAC (dias após o corte da soqueira). R²= coeficiente de determinação.

Figura 5. Massa seca da parte aérea (PA) da cana-de-açúcar.

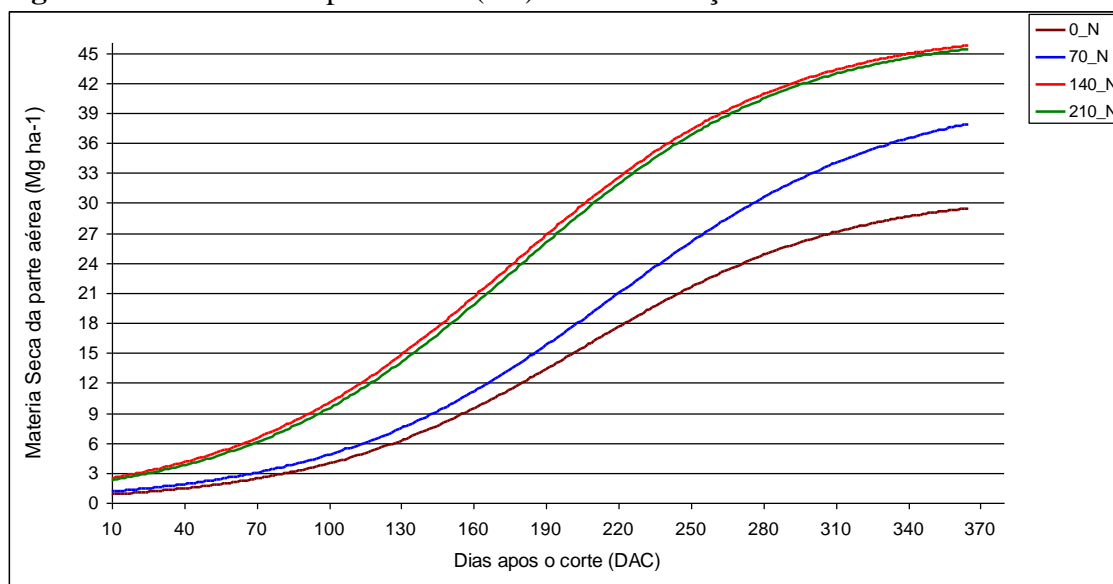
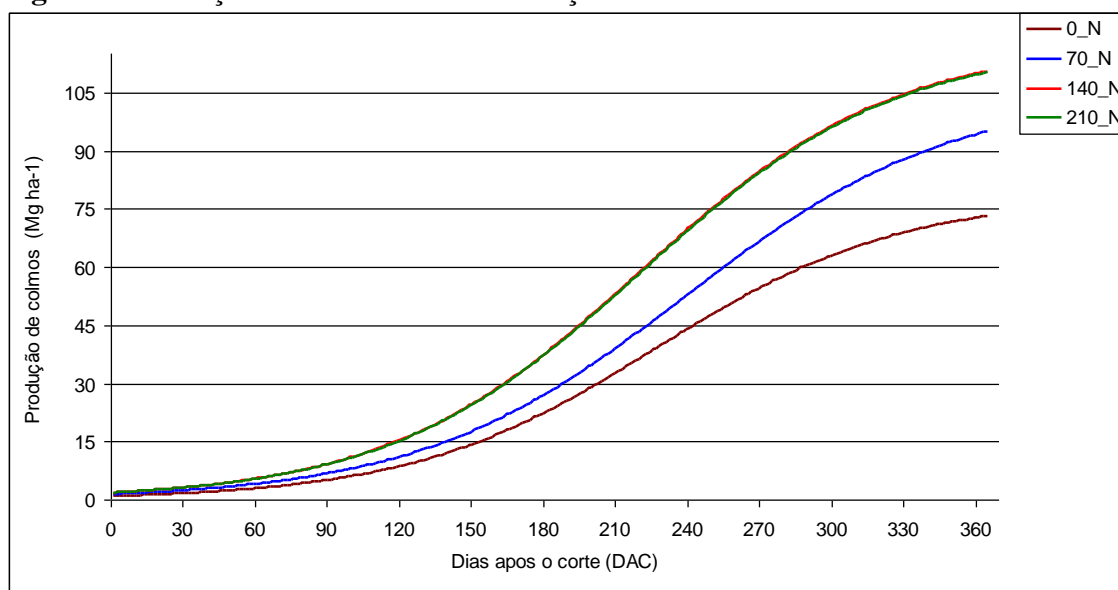


Figura 6. Produção de colmos da cana-de-açúcar.

As doses de N-fertilizante sem restrição hídrica afetaram positivamente a taxa de produção de matéria seca, a taxa máxima ($21 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) ocorreu 180 DAC para doses de 140 e 210 kg ha^{-1} de N. Para 70 e 0 kg ha^{-1} de N a máxima ocorreu por volta dos 207 DAC com valores de 17 e $14 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, respectivamente (Figura 5).

Produtividades de 115 e 108 Mg ha^{-1} de TCH foram obtidas na segunda soqueira de cana com doses de 140 e 70 kg ha^{-1} de N-fertilizante via gotejo subsuperficial por Wiedenfeld & Enciso (2008). Observa-se na Figura 6 e na Tabela 3 valores similares de 117,56 e 104,83 Mg ha^{-1} de TCH com doses de 140 e 70 kg ha^{-1} de N-fertilizante, respectivamente. A dose de 140 kg ha^{-1} de N-fertilizante obteve resultados similares à dose de 210 kg ha^{-1} de N-fertilizante (Figura 6). Segundo Muchow et al. (1996) a produção de colmos por hectare responde à adubação nitrogenada até uma certa dose, após esse limite não se observam respostas e este nutriente, passando a limitar a produção outro nutriente e/ou fator edafoclimatológico. A mesma tendência foi observada por Ng Kee Kwong et al. (1999).

6 CONCLUSÕES

O modelo APSIM pode prever com o uso de modelagem a produtividade da cana-de-açúcar, tendo como base de dados um registro confiável e duradouro de elementos climáticos, biométricos e de manejo. As curvas de acúmulo de biomassa seguiram a tendência sigmoideal característica e evidenciaram o efeito positivo da irrigação e da adubação nitrogenada.

7 REFERÊNCIAS

ALVAREZ, I.A. **Comparação entre o desenvolvimento de cana crua e cana queimada em dois ciclos de crescimento.** 1998. 116f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

ASSENG, S. A. et al. Abreicht e performance of the APSIM-wheat model in Western Austrália. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 57, p. 163–179, 1998.

BOLOGNA-CAMPBELL, I. **Balço de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta**. 2007. 112f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

BRZESOWSKY, W. J. Factor affecting sugarcane. 2: Crop growth rate. **Agriculture Internacional World Crops**, v. 38, n. 1, p. 30-35, 1986.

CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana -de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157p.

CHEEROO-NAYAMUTH, F.C. **Evaluation of the APSIM-Sugar model in the Mauritian sugar industry: validation and economic analysis of irrigation**. 1998. ___ f. Tese (Doutorado em MAgrEcon) - Department of Agricultural Economics, University of Queensland, St Lucia, Australia, 1998.

CHEEROO-NAYAMUTH, F. C.; ROBERTSON, M. J. and WEGENER, M.K. Using a simulation model to assess potential and attainable sugar cane yield in Mauritius. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 66, n. 3, p. 225-243, 2000

CONSECANA. **Manual de Instruções**. 4. ed. Piracicaba: Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo, 2003. 115p.

COOPERATIVA CENTRAL DOS PRODUTORES DE AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO (COPERSUCAR). **Sexta geração de variedades de cana-de-açúcar**. Piracicaba, 1997. 28p.

DAVID, N. L. et al. **Lehninger Princípios de Bioquímica**. 3. ed. São Paulo: Sarvier, 2002. 975p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water: Irrigation and Drainage Paper No 33**. 1. ed. Rome: FAO, 1979. 193p.

FARIAS, C. H. et al. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 356–362, 2008.

FARONI, C. E. **Eficiência agrônômica das adubações nitrogenadas de plantio e após o primeiro corte avaliada na primeira soca da cana-de-açúcar**. 2008. 190 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008.

GAVA, G. J. C. **Utilização do nitrogênio da uréia (¹⁵N) e da palhada (¹⁵N) por soqueira de cana-de-açúcar no manejo sem despalha a fogo**. 1999. 81 f. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

GOUVÊA, J. R. F. **Mudanças climáticas e a expectativa de seus impactos na cultura da cana-de-açúcar na região de Piracicaba**. 2008. 98 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Júlia Ribeiro Ferreira Gouvêa, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008.

HAMID, M. N.; ABDULLAH, M. Y. Contribution of mathematical model for the development of sustainable agriculture. **Malaysian Journal of Mathematical Sciences**, Selangor, v. 2, n. 2, p. 83-91, 2008.

KEATING, B. A.; M. J.; ROBERTSON, R. C.; MUCHOW, N. I. Huth modelling sugarcane production systems development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 61, p. 253-271, 1999.

MACHADO, E. C. Fisiologia de produção de cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Coord.) **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1. cap. 1. p. 56-87.

MARTIN, T. N. et al. Simulação estocástica da radiação fotossinteticamente ativa e da temperatura do ar por diferentes métodos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 9, p. 1211-1219, 2007.

MCCOWN, R. L. et al. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. **Agricultural Systems**, Barking, v. 50, p. 255-271, 1996.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística básica**. 5. ed. São Paulo: Saraiva, 2003. 526p.

MUCHOW, R. C. et al. Effect of nitrogen on the time-course of sucrose accumulation in sugar cane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 47, p. 143-153, 1996.

NG KEE KWONG, K. F.; DEVILLE J. Application of ⁵N-labelled urea to sugar cane through a drip-irrigation system in Mauritius. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 39, p. 223-228, 1994.

NG KEE KWONG, K. F. et al. Drip-fertigation – a means for reducing fertilizer nitrogen to sugarcane. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 35, p. 31-37, 1999.

O'LEARY, G. J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, p. 97-111, 2000.

PROBERT, M. E. et al. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. **Agricultural Systems**, Barking, v. 56, p. 1-28, 1998.

RAMESH, P. E.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on different classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of sugarcane cultivars. **Journal Agronomy & Crop Science**, v. 185, p. 249-258, 2000.

SILVA, D.K.T. **Crescimento de cultivares de cana-de-açúcar em primeira soca na região noroeste do Paraná na safra de 2002/2003**. 1995. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

SILVEIRA, J. A. G. **Interações entre assimilação de nitrogênio e o crescimento da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) cultivada em condições de campo**. 1985. 152 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 690p.

THORBURN, P. J. et al. Modelling decomposition of sugar cane surface residues with APSIM- Residue. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 70, p. 223-232, 2001.

THORBURN, P. J. et al. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. **Irrigation Science**, Berlin, v. 22, p. 201-209, 2003.

URIBE, R. A. M. et al. Productivity of ratoon cane integrated to drip irrigation and nitrogen fertilization. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 6, p. 1124-1133, nov./dez. 2013.

VITTI, A. C. et al. Acúmulo de fitomassa e de nitrogênio no ciclo agrícola de cana-planta. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 9, 2008, Maceió. **Anais...**Piracicaba: STAB, 2008.

WIEDENFELD. B.; ENCISO, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid south texas. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, p. 665-671. 2008

WIEDENFELD. R. P. Effects of irrigation and N fertilizer application on sugarcane yield and quality. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 43, p. 101, 1995.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Londres, v. 2, p. 184-194, 1981.