Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil

Henrique Boriolo Dias

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2016

Henrique Boriolo Dias
Engenheiro Agrônomo

Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO CESAR SENTELHAS**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Dias, Henrique Boriolo
Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil / Henrique Boriolo Dias. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016.
166 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. *Saccharum* spp. 2. Modelagem de culturas 3. Abordagem multimodelos 4. Déficit hídrico 5. Manejo 6. Suspensão da irrigação I. Título

CDD 633.61
D541i

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida.

Aos meus pais Neusa S. B. Dias e Moacir F. Dias e ao meu irmão Fernando B. Dias, os quais sempre me apoiaram, cada qual à sua maneira.

À minha tia e segunda mãe, Madalena F. Dias, que sempre me apoiou e incentivou a buscar os meus sonhos.

À Clarissa B. Gomes, amiga e companheira desde minha graduação, por todo amor, carinho, paciência e incentivo dispensados durante todos os momentos.

Ao meu orientador e, sobretudo, amigo Prof. Paulo Cesar Sentelhas pelos ensinamentos, oportunidades, confiança depositada e por todo incentivo durante a minha vida acadêmica e profissional.

Aos meus orientadores em outras ocasiões, Prof. Antonio C. de Azevedo e Fabio V. Scarpare, pelos ensinamentos.

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo (USP), pela oportunidade de realização do curso de mestrado. Agradeço também aos professores dos programas de Pós-Graduação da ESALQ/USP, os quais tive a oportunidade de conviver, pelos ensinamentos passados e aos funcionários da ESALQ/USP que me auxiliaram durante o curso, em especial à Angela M. D. Silva e à Davilmar A. Colevatti.

À Netafim, na pessoa do Eng. Agrônomo Daniel Pedroso, à usina Goiasa, ao Grupo Japungu e as outras empresas que não permitiram menção do nome por cederem dados fundamentais para o desenvolvimento do projeto.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), ao do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Agência Nacional de Águas (ANA) por cederem/disponibilizarem os dados meteorológicos para realização deste trabalho. Agradeço também ao Murilo Vianna pela ajuda na organização de parte dos dados meteorológicos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de estudos e apoio financeiro (Processo 2014/05173-3), essenciais para o desenvolvimento do projeto de mestrado.

À Raízen Energia S/A, sobretudo aos colegas Ralph G. Hammer e Jean C. Quaresma, pela oportunidade de aplicar e aprender a Agrometeorologia na prática.

Aos amigos da Cúpula, Fernando Hinnah, Gustavo Beruski, Leonardo Monteiro, Rafael Battisti, Yury Duarte, Fabiani Bender, Cristiam Bosi, Fabian Verhage, Leandro Costa

e Murilo Vianna, pela troca de experiências e conhecimentos, incentivo e momentos descontraídos.

Aos amigos da República Matadouro e da equipe de Futebol de Campo da A.A.A.L.Q. pelos momentos salutares vivenciados, essenciais na minha vida acadêmica e pessoal.

A todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão de mais esta etapa da minha vida.

Muito obrigado !

SUMÁRIO

RESUMO 9
ABSTRACT 11
1 INTRODUÇÃO 13
Referências 15
2 AVALIAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB CONDIÇÕES OPERACIONAIS, EM DIFERENTES REGIÕES BRASILEIRAS 19
Resumo 19
Abstract 19
2.1 Introdução 20
2.2 Material e métodos 23
2.1.1 Dados de produtividade, meteorológicos e de solo 23
2.1.2 Descrições dos modelos de simulação da cultura da cana-de-açúcar 27
2.1.2.1 MZA-FAO 27
2.1.2.2 DSSAT/CANEGRO 31
2.1.2.3 APSIM-Sugarcane 39
2.1.3 Fator de decaimento da produtividade de colmos entre os cortes 42
2.1.4 Desempenhos dos modelos e abordagem multimodelos 43
2.3 Resultados e discussão 45
2.3.1 Fator de decaimento da produtividade da cana-de-açúcar (k_{dec}) 45
2.3.2 Ajuste e avaliação dos modelos de simulação da cultura da cana-de-açúcar 46
2.3.2.1 Modelo MZA-FAO 46
2.3.2.2 Modelo DSSAT/CANEGRO 49
2.3.2.3 Modelo APSIM-Sugarcane 52
2.3.3 Avaliação da abordagem multimodelos 54
2.4 Conclusões 56
Referências 56
3 QUEBRA DE PRODUTIVIDADE DE COLMOS DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL 65
Resumo 65
Abstract 65
3.1 Introdução 66

3.2 Material e métodos 71
3.2.1 Descrição resumida dos modelos de simulação 71
3.2.2 Avaliação dos modelos 76
3.2.3 Quebra de produtividade 80
3.4 Resultados e Discussão 88
3.3.1 Avaliação dos modelos de simulação 88
3.3.2 Quebra de produtividade: magnitude e causas 89
3.3.3 Possíveis ações para minimização da quebra de produtividade da cana-de-açúcar no Brasil 101
3.4 Conclusões 104
Referências 104
4 POTENCIAL DO USO DA IRRIGAÇÃO NA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL 119
Resumo 119
Abstract 119
4.1 Introdução 120
4.2 Material e métodos 121
4.2.1 Descrição e avaliação do modelo da Zona Agroecológica da FAO (MZA-FAO) 121
4.2.2 Impacto da irrigação na produtividade de colmos 124
4.3 Resultados e discussão 125
4.3.1 Desempenho do modelo de simulação MZA-FAO 125
4.3.2 Impacto da irrigação na produtividade de colmos em diferentes regiões brasileiras 126
4.4 Conclusões 132
Referências 132
5 ESTIMAÇÃO DO NÚMERO DE DIAS DE SUSPENSÃO DA IRRIGAÇÃO ANTES DA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES REGIÕES BRASILEIRAS 135
Resumo 135
Abstract 136
5.1 Introdução 136
5.2 Material e métodos 139
5.2.1 Modelo APSIM-Sugarcane 139
5.2.2 Simulações para estimação do número de dias de suspensão da irrigação antes da colheita 141
5.3 Resultados e discussão 144

5.3.1 Desempenho do modelo 144
5.3.2 Número de dias de suspensão da irrigação antes da colheita 145
5.4 Conclusões 154
Referências 154

RESUMO

Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil

O sistema de produção da cana-de-açúcar é altamente complexo e a expansão do cultivo tem ocorrido para locais com considerável déficit hídrico (DH). Nesse contexto, o DH e o manejo agrícola são os principais fatores determinantes das quebras de produtividade da cana-de-açúcar, sendo a irrigação uma das alternativas para minimizá-las. Modelos de simulação podem ser utilizados para avaliar a quebra de produtividade e os impactos da irrigação na cana-de-açúcar. Assim, o presente estudo teve por objetivos: i) avaliar e ajustar os modelos MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane e propor um fator de manejo (k_{dec}); ii) avaliar a magnitude da quebra de produtividade e suas causas (DH e manejo); iii) avaliar os impactos da irrigação na produtividade da cana-de-açúcar e; iv) estimar o número de dias de suspensão da irrigação antes da colheita. Comparando-se com dados de produtividade de cana de 12 meses com diversos cortes e sistemas (sequeiro e irrigado) para diversas regiões brasileiras, o desempenho de todos os modelos foi fraco com grande erro absoluto médio (EAM > 29 t ha^{-1}) e baixa precisão ($R^2 < 0,54$), já que esses não consideram o manejo agrícola. A introdução do k_{dec} propiciou melhoria no desempenho dos modelos (EAM < 14 t ha^{-1} e $R^2 \geq 0,63$). Utilizando a média de produtividade dos três modelos, a precisão e acurácia melhoraram e o EAM diminuiu. Para o estudo da quebra de produtividade foram utilizadas simulações apenas de cana planta de 12 meses sob manejo ótimo, por meio da abordagem multimodelos, as quais foram contrastadas com os dados do IBGE para 30 locais. A quebra de produtividade total média (Q_T) foi 121 t ha^{-1}, sendo que a maior parte desta foi devido ao DH (72% da Q_T ou 87 t ha^{-1}). A quebra de produtividade devido ao manejo agrícola (Q_M) depende da região e das práticas adotados pelos produtores sendo, em média, 28% da Q_T (34 t ha^{-1}). A Q_M pode estar relacionada, principalmente, ao monocultivo e à mecanização. Uma vez que o DH é a principal causa da quebra de produtividade, o impacto da irrigação nesta foi estimado por meio de simulações para cana planta de 12 meses em três tipos de solo e 12 datas de plantio com o modelo MZA-FAO. Os resultados demonstraram que o incremento na produtividade decorrente do uso da irrigação é dependente da interação entre as condições meteorológicas, do solo, da época de plantio e da lâmina de irrigação, e revelam que tal prática tem potencial para melhorar os níveis de produtividade em diversas regiões brasileiras. A suspensão da irrigação antes da colheita é uma estratégia para incrementar o teor e a produtividade de sacarose, todavia, não há recomendações para as condições brasileiras. Na tentativa de fornecer informações para nortear tal estratégia, simulações com o modelo APSIM-Sugarcane para cana planta de 12 meses foram realizadas para diferentes tipos de solo, épocas de colheita e locais. O número de dias de suspensão da irrigação variou entre 15 e 115 dias, dependendo da localidade, do solo e da época da colheita.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Modelagem de culturas; Abordagem multimodelos; Déficit hídrico; Manejo; Suspensão da irrigação

ABSTRACT

Intercomparison of sugarcane simulation models and its use to evaluate yield gap and irrigation impacts in different Brazilian regions

The sugarcane production system is highly complex and the expansion of this crop is occurring to areas with expressive water deficit (WD). In this context, WD and crop management (CM) are the main determining factors of yield gaps (YG). Irrigation is an alternative to reduce YG of this crop. Crop simulation models can be used to evaluate the YG and irrigation impacts on sugarcane production. Based on that, this study aimed: i) to evaluate and adjust the MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO and APSIM-Sugarcane models and propose a management factor (k_{dec}) to improve the performance of these models; ii) to assess the YG magnitude and its causes (WD and CM); iii) to evaluate the impacts of irrigation on sugarcane yield and; iv) to estimate the drying-off days before harvest for different locations. When comparing 12-month cane data with several cuts in rainfed and irrigated systems, the performance of all models was poor with high mean absolute error (MAE > 29 t ha^{-1}) and low precision ($R^2 < 0.54$), once the models does not take into account crop management aspects. The introduction of k_{dec} increased the models´ performances, with MAE < 14 ta ha^{-1} and $R^2 \geq 0.63$. When the average yield of the three models was used, the precision and accuracy improved and MAE decreased. The YG was calculated by the difference between simulated values of 12-months plant cane under optimum management in a multi-model approach and data from IBGE for 30 locations. The average YG total (YG_T) was 121 t ha^{-1}, which were mainly caused by WD (YG_{WD}), followed by sub-optimal CM (YG_{CM}). The YG_{WD} accounted for about 72% of YG_T (~ 87 t ha^{-1}). The YG_{CM} is dependent on the region and practices adopted by growers, and it represents, in average, 28% of the YG_T (34 t ha^{-1}). YG_{CM} can be related mainly to monoculture and mechanization of high impact. Since the WD is the main cause of YG, the impact of irrigation on sugarcane yield was estimated by simulating 12-month plant cane in three soil types and 12 planting dates with MZA-FAO model for a long-term period (30 years). The results showed that the yield increases depend on the interaction between weather conditions, soil type, planting date and irrigation level. The simulations showed that irrigation is a practice with great potential to increase the sugarcane yield in several Brazilian locations. When sugarcane is irrigated, the drying-off is a strategy to increase sucrose content and yield; however, there are no recommendations about it for Brazilian conditions. In order to address this issue, simulations were conducted with APSIM-Sugarcane model for 12-month plant cane under optimum management in three soil types and 12 Brazilian locations for a long-term period (30 years). The harvest dates were simulated from May to November, which is the common harvesting season in sugarcane mills in the evaluated regions. The number of drying-off days varies according to location, soil type and harvest date, with the median ranging from 15 to 115 days.

Keywords: *Saccharum* spp.; Crop modelling; Multi-model approach; Water deficit; Crop management; Drying-off

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais importantes na agricultura brasileira. Os produtos derivados da referida cultura representam 18,1% da matriz energética brasileira (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - EPE, 2015). Dentre as fontes de energia renováveis, a cana-de-açúcar detém participação de 41,5% (EPE, 2015). A partir de meados dos anos 2000 a área cultivada com cana-de-açúcar cresceu significativamente no Brasil, sobretudo na região Centro-Sul, motivados pela introdução de veículos *flex-fuel*, movidos ao etanol e à gasolina (MARTINES-FILHO et al., 2006; SAMANEZ et al., 2007). A demanda por combustíveis renováveis, como o etanol da cana-de-açúcar, deverá crescer em função dos protocolos internacionais que tem por objetivo reduzir a emissão dos gases de efeito estufa (LEAL et al., 2013; GOLDEMBERG et al., 2014). Assim, houve significativo aumento da área cultivada nos estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Paraná (ADAMI et al., 2012). Especificamente no estado de São Paulo, a expansão se deu na região noroeste (RUDORFF et al., 2010). No caso das regiões Norte e Nordeste do país a expansão tem acontecido, sobretudo, nos estados de Tocantins e Bahia (MONTEIRO, 2015). De modo geral, a expansão do cultivo da cana-de-açúcar tem ocorrido em áreas ocupadas anteriormente por pastagens degradadas (RUDORFF et al., 2010; ADAMI et al., 2012) e em locais com considerável deficiência hídrica.

Além das áreas tradicionalmente irrigadas na região Nordeste, norte de Minas Gerais e centro-norte de Goiás, as áreas de expansão têm recebido algum tipo de suplementação hídrica, seja para evitar ou minimizar a morte de soqueiras da cultura no campo no período mais seco ou para incrementar a produtividade de colmos. Em locais onde se usa a irrigação plena ou próximo a esse nível, a suspensão da irrigação antes da colheita é uma opção para incremento na produtividade de sacarose, contudo, não há recomendações claras desse tipo de estratégia na literatura brasileira.

Dentre as atividades econômicas, a agricultura é a mais dependente das condições climáticas/meteorológicas (SENTELHAS; MONTEIRO, 2009). O ciclo da cana-de-açúcar no campo varia de 8 a 24 meses (em geral, 12 meses) e, portanto, a cultura é muito influenciada pelas condições do tempo. Além das condições climáticas/meteorológicas, a produtividade das culturas é também condicionada pelas condições edáficas, socioeconômicas, escolha de cultivares e manejo do cultivo. Segundo dados de agências brasileiras (IBGE, 2016; CONAB, 2016), nos últimos anos, houve estagnação ou mesmo decréscimo nos níveis de produtividade da cultura da cana. Desse modo, há necessidade de separar os efeitos do clima dos demais,

visando identificar a magnitude e as causas das quebras de produtividade da cultura cana-de-açúcar, e direcionar esforços para que o sistema de produção desta cultura seja melhor conduzido, tornando-o mais resiliente e sustentável.

Uma das formas de avaliar a quebra de produtividade é por meio do uso de modelos de simulação de culturas. Os modelos de simulação de culturas são poderosas ferramentas que permitem integrar os efeitos das condições meteorológicas, de solo e de práticas de manejo nas culturas (cultivar, adubação, etc), permitindo estudos nas mais diversas áreas das ciências agrárias e ambientais (BOOTE et al., 1996; TSUJI et al., 1998; JONES et al., 2003). Para a cana-de-açúcar há diversos modelos de simulação, com destaque para o modelo sul-africano CANEGRO (SINGELS et al., 2008), acoplado à plataforma DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) (JONES et al., 2003) e o modelo australiano da cana-de-açúcar (KEATING et al., 1999) da plataforma APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*) (HOLZWORTH et al., 2014). O modelo da Zona Agroecológica da FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) (MZA-FAO, DOORENBOS; KASSAM, 1979) é um modelo mais simples que os já mencionados, porém figura como uma opção viável já que tem apresentado resultados satisfatórios para estudos agrometeorológicos envolvendo a cultura da cana-de-açúcar (GOUVÊA et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2012; MARIN; CARVALHO, 2012; MONTEIRO; SENTELHAS, 2014; MONTEIRO, 2015).

Pesquisas recentes têm demonstrado que o uso de modelos em conjunto (multimodelos) tem permitido se reduzir as incertezas associadas às simulações de produtividade quando cada um dos modelos, devidamente calibrado, é empregado individualmente (ASSENG et al., 2013). Para cana-de-açúcar, Marin et al. (2015) utilizaram a abordagem multimodelos com os modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane para experimentos nas condições agroclimáticas brasileiras e verificaram a mesma melhoria do valor estimado.

Diante do exposto, o presente estudo teve por objetivo identificar a magnitude dos efeitos da deficiência hídrica e do manejo na produtividade da cultura da cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras do país (tradicionais) e em áreas de expansão e avaliar o potencial do uso da prática de irrigação para incrementar a produtividade da referida cultura, por meio de modelos de simulação.

De modo específico, esse trabalho teve por objetivos:

a) Avaliar e ajustar os modelos MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane sob condições operacionais de cultivo da cana-de-açúcar no Brasil e propor um fator de manejo para melhoria do desempenho dos modelos;
b) Estimar a produtividade potencial e atingível da cana-de-açúcar, baseados em simulação multimodelos, visando identificar as causas da quebra de produtividade de colmos no país (deficiência hídrica ou manejo da cultura);
c) Avaliar o potencial do uso da irrigação, com diferentes níveis de cobertura da deficiência hídrica, em diversas localidades brasileiras;
d) Estimar o número de dias de suspensão da irrigação antes da colheita para a cana-de-açúcar em diversas regiões no Brasil, visando maior produtividade de sacarose.

Referências

ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T., FREITAS, R.M.F.; AGUIAR, D.A.; SUGAWARA, L.M. MELLO, M.P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, Basel, v. 4, p. 574-585, 2012.

ASSENG, S.; EWERT, F.; ROSENZWEIG, C.; JONES, J.W.; HATFIELD, J.L.; RUANE, A.C.; BOOTE, K.J.; THORBURN, P.J.; ROTTER, R.P.; CAMMARANO, D.; BRISSON, N.; BASSO, B.; MARTRE, P.; AGGARWAL, P.K.; ANGULO, C.; BERTUZZI, P.; BIERNATH, C.; CHALLINOR, A.J.; DOLTRA, J.; GAYLER, S.; GOLDBERG, R.; GRANT, R.; HENG, L.; HOOKER, J.; HUNT, L.A.; INGWERSEN, J.; IZAURRALDE, R.C.; KERSEBAUM, K.C.; MULLER, C.; KUMAR, S.N.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.; OLESEN, J.E.; OSBORNE, T.M.; PALOSUO, T.; PRIESACK, E.; RIPOCHE, D.; SEMENOV, M.A.; SHCHERBACK, I.; STEDUTO, P.; STOCKLE, C.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; TRAVASSO, M.; WAHA, K.; WALLACH, D.; WHITE, J.W.; WILLIAMS, J.R.; WOLF, J. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, London, v. 3, p. 827-832, 2013.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential Uses and Limitations of Crop Models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 5, p. 704-716, 1996.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. 2016. v. 3. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 25 Jan. 2016.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 139p. (Irrigation and Drainage paper, 33).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **NEB – Balanço Energético Nacional**: ano base: 2014. Rio de Janeiro, 2015. 289p.

GOLDEMBERG, J.;MELLO, F.F.C.; CERRI, C.E.P.; DAVIES, C.A.; CERRI, C.C. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. **Energy Policy**, Surrey, v. 69, p. 14-18, 2014.

GOUVÊA, J.R.F.; SENTELHAS, P.C.; GAZZOLA, S.T.; SANTOS, M.C. Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical Southern Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 593-605, 2009.

HOLZWORTH, D.P.; HUTH, N.I.; DEVOIL, P.G.; ZURCHER, E.J.; HERRMANN, N.I.; MCLEAN, G.; CHENU, K.; VAN OOSTEROM, E.J.; SNOW, V.; MURPHY, C.; MOORE, A.D.; BROWN, H.; WHISH, J.P.M.; VERRALL, S.; FAINGES, J.; BELL, L.W.; PEAKE, A.S.; POULTON, P.L.; HOCHMAN, Z.; THORBURN, P.J.; GAYDON, D.S.; DALGLIESH, N.P.; RODRIGUEZ, D.; COX, H.; CHAPMAN, S.; DOHERTY, A.; TEIXEIRA, E.; SHARP, J.; CICHOTA, R.; VOGELER, I.; LI, F.Y.; WANG, E.; HAMMER, G.L.; ROBERTSON, M.J.; DIMES, J.P.; WHITBREAD, A.M.; HUNT, J.; VAN REES, H.; MCCLELLAND, T.; CARBERRY, P.S.; HARGREAVES, J.N.G.; MACLEOD, N.; MCDONALD, C.; HARSDORF, J.; WEDGWOOD, S.; KEATING, B.A. APSIM e Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling and Software**, London, v. 62, p. 327-350, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema de recuperação automática (SIDRA)**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 25 Jan. 2016.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, London, v. 18, p. 235-265, 2003.

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

LEAL, M.R.L.V.; NOGUEIRA, L.A.H.; CORTEZ, L.A.B. Land demand for ethanol production. **Applied Energy**, London, v. 102, p. 266-271, 2013.

MARIN, F.R.; DE CARVALHO, G.L. Spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency in the state of Sao Paulo, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 149-156, 2012.

MARIN, F.R.; THORBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G. Sugarcane model intercomparison: Structural differences and uncertainties under current and potential future climates. **Environmental Modelling and Software**, London, v. 72, p. 372–386, 2015.

MARTINES-FILHO, J.; BURNQUIST, H.L.; VIEN, C.E.F. Bioenergy and the rise of sugarcane-based ethanol in Brazil. **Choices**, Milwaukee, v. 21, p. 91-96, 2006.

MONTEIRO, L.A. **Sugarcane yield gap in Brazil**: a crop modelling approach. 2015. 131p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P.C. Potential and actual sugarcane yields in Southern Brazil as a function of climate conditions and crop management. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, p. 264-276, 2014.

OLIVEIRA, R.A.; SANTOS, R.S.; RIBEIRO, A.; ZOLNIER, S.; BARBOSA, M.H.P. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE. R **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 549-557, 2012.

RUDORFF, B.F.T.; AGUIAR, D.A. de; SILVA, W.F. da; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Study on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using LandSat data. **Remote Sensing**, New York, v. 2, p. 1057-1076, 2010.

SAMANEZ, C.P.; FERREIRA, L.R.; NASCIMENTO, C.C. do. Avaliação da opção de troca de combustível no carro brasileiro flex: um estudo por região geográfica usando teoria de opções reais e simulação estocástica. **Production**, São Paulo. v. 24, n. 3, p. 628-643, 2013.

SENTELHAS, P.C.; MONTEIRO, J.E.B.A. Agrometeorologia dos cultivos - informações para uma Agricultura sustentável. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Org). **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009. cap. 1, p. 3-12.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DEN BERG, M. **DSSAT v4.5 - CANEGRO Sugarcane plant module**: scientific documentation. Mount Edgecombe: South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34p.

TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORTON, P.K. (Ed.). **Understanding options for agricultural production**: systems approaches for sustainable agricultural development. Dordrecht: Kluwer Academic, 1998. 400p.

2 AVALIAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB CONDIÇÕES OPERACIONAIS, EM DIFERENTES REGIÕES BRASILEIRAS

Resumo

O sistema de produção de cana-de-açúcar é bastante complexo, em razão do grande número de variáveis que o compõe. Assim, a estimação da produtividade dessa cultura é igualmente complexa, porém de grande valia para o planejamento e para as tomadas de decisão no setor sucroenergético. Uma das formas de estimar a produtividade da cana-de-açúcar é por meio de modelos de simulação devidamente calibrados para a realidade local. Recentes estudos têm indicado que o uso de ao menos três modelos de simulação em conjunto pode reduzir as incertezas das simulações, levando a resultados mais confiáveis. Desse modo, o presente estudo teve por objetivos: i) avaliar o desempenho de três modelos de simulação da cultura da cana-de-açúcar (MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane), individualmente e sob a abordagem de multimodelos, em sistemas de produção de sequeiro e irrigado em condições operacionais; e ii) propor um fator de manejo (k_{dec}), associado ao decaimento da produtividade de colmos ao longo dos sucessivos cortes, visando melhorar o desempenho desses modelos. Para tanto, foram empregados dados de produtividade da cana-de-açúcar e meteorológicos de localidades situadas em sete estados brasileiros. O ajuste do modelo MZA-FAO se deu principalmente pela alteração dos valores do coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (ky). Nos modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane foram realizados pequenos ajustes nos coeficientes calibrados para condições brasileiras, disponíveis na literatura, visando melhorar seus desempenhos. O desempenho de todos os modelos, em geral, foi fraco com erro absoluto médio (EAM > 29 t ha^{-1}) e baixa precisão (R^2 < 0,54), pois estes não levam em consideração aspectos de manejo. A introdução k_{dec}, o qual reflete o manejo adotado no canavial, propiciou melhoria no desempenho dos modelos. Os valores de k_{dec} variaram entre regiões, oscilando entre 0,10 e 0,35, em função do nível do manejo adotado em cada local. Quando os modelos foram utilizados separadamente com a utilização do k_{dec}, o EAM ficou entre 12,71 e 12,86 t ha^{-1} no processo de ajuste e entre 12,56 e 13,99 t ha^{-1} na avaliação com dados independentes. O R^2 variou entre 0,69 e 0,72 no processo de ajuste e entre 0,63 e 0,65 no processo de avaliação. Quando os modelos foram utilizados em conjunto, o desempenho das estimativas melhorou tanto no processo de ajuste (EAM = 11,52 t ha^{-1}, R^2 = 0,75) quanto na avaliação (EAM = 12,41 t ha^{-1}, R^2 = 0,67). Assim, conclui-se que a introdução do k_{dec} associado à abordagem multimodelos propiciou um melhor desempenho das estimativas de produtividade da cana-de-açúcar em condições operacionais de cultivo em diferentes regiões e sistemas de produção no Brasil.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Previsão de produtividade; Manejo; Multimodelos

Abstract

The sugarcane production system is very complex, because of the large number of variables involved in this system. Thus, the estimation of sugarcane yield is also complex, but valuable for planning and decision-making processes in the sugarcane industry. Crop simulation models calibrated to local conditions can be used for such purposes. Recent studies have shown that the use of at least three simulation models in an ensemble can reduce simulation uncertainties, resulting in more reliable estimates than the use of a single model.

Therefore, the aims of this study were: i) to evaluate the performance of three crop simulation models for sugarcane (MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO and APSIM-Sugarcane) separately and in a multi-model approach for operational field conditions in Brazil and; ii) to propose a management factor (k_{dec}) associated with the yield decline along successive crop cycles in order to improve the performance of these models. Sugarcane yield and meteorological data were obtained for seven Brazilian states. The adjustment of MZA-FAO model was done basically by changing the values of the crop water deficit sensitivity coefficient (ky). For DSSAT/CANEGRO and APSIM-Sugarcane models, small adjustments were done in the calibrated coefficients for Brazilian cultivars, available in the literature, to improve the performance. The performances of the three models were weak with high mean absolute error (MAE > 29 t ha^{-1}) and low precision (R^2 < 0.54), which were caused by the lack of coefficients for accounting by crop management aspects. The introduction of k_{dec}, which reflects the crop management level, improved yield estimates for all models. The k_{dec} values ranged between 0.10 and 0.35, depending on the management level at each location. When k_{dec} was applied, MAE was reduced to between 12.71 and 12.86 t ha^{-1} for adjustment process, and between 12.56 and 13.99 t ha^{-1} for evaluation with independent data. R^2 varied between 0.69 and 0.72 for adjustment and between 0.63 and 0.65 for evaluation phases. The multi-model approach also allowed an improvement in modeling performance, in both phases (MAE = 11.52 t ha^{-1} and R^2 = 0.75 for adjustment; and MAE = 12.41 t ha^{-1}, R^2 = 0.67 for evaluation). The use of k_{dec} associated with multi-model approach improved the performance sugarcane yield estimates, better representing the distinct operational field conditions of sugarcane cultivation in different crop systems and Brazilian regions.

Keywords: *Saccharum* spp.; Yield forecasting; Crop management; Multi-model approach

2.1 Introdução

O sistema de produção da cultura da cana-de-açúcar é peculiar e altamente complexo. A produção inicia-se com a chamada cana planta, cuja idade no campo geralmente varia de 12 a 18 meses. Após a primeira colheita, a cultura rebrota dando início ao ciclo da chamada cana soca (ou soqueira), a qual é colhida com idade preferencial de 12 meses, normalmente entre os meses de abril a dezembro. As canas socas são colhidas quantas vezes forem possíveis, entretanto, o mais comum para as condições de cultivo operacionais brasileiras é de quatro a cinco socas atualmente. Após a decisão de reforma do canavial, usualmente baseado no nível de produtividade da área, o cultivo subsequente é com cana-de-açúcar novamente, caracterizando um sistema de monocultura, muito comum nos sistemas de produção do Brasil. O manejo da cultura varia entre os locais e produtores. A Figura 2.1 apresenta uma visão geral do manejo e dos fatores que interferem na produtividade da cana-de-açúcar. O decaimento da produtividade de colmos ao longo dos sucessivos cortes é um dos principais entraves na produção da cana-de-açúcar, o qual se deve, sobretudo, às condições de manejo adotadas no canavial (GARSIDE et al., 1997; BERNARDES et al. 2008; FERRARO et al., 2009; RAMBURAN et al., 2013, GOMATHI et al., 2013).

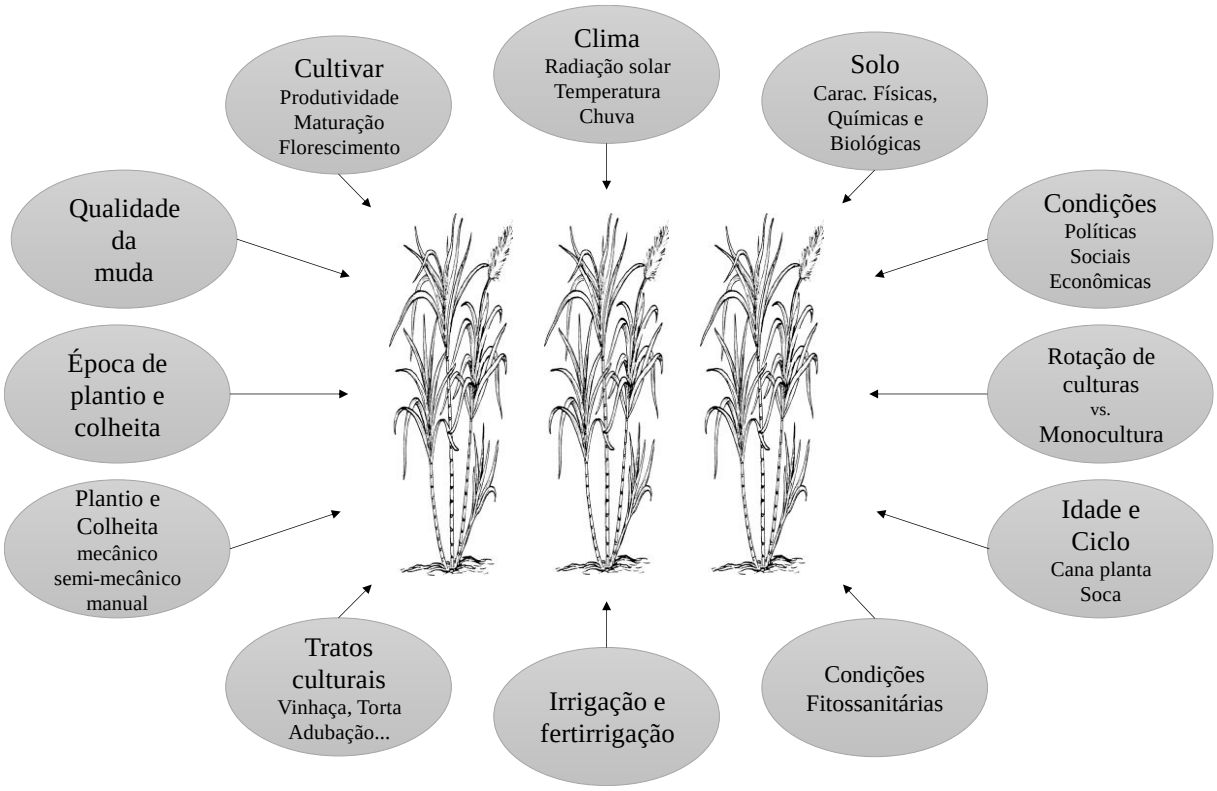


Figura 2.1 – Representação esquemática dos fatores que interferem na produtividade de colmos e sacarose da cultura da cana-de-açúcar

Devido à grande variabilidade nos níveis de produtividade da cana-de-açúcar ao longo dos cortes e entre as regiões produtoras, estimações e previsões de produtividade de colmos e de sacarose são valiosas para o planejamento e para as tomadas de decisão no setor sucroenergético (LISSON et al., 2005; BEZUIDENHOUT et al., 2007; EVERINGHAM et al., 2009; BOCCA et al., 2015). As previsões geralmente são realizadas por especialistas com base no histórico da área (solo e clima), nas características da cultivar em questão, nas práticas de manejo adotadas e na ocorrência de pragas e doenças (BOCCA et al., 2015). Outro modo de se obter estimações e, principalmente, previsões de produtividade é por meio de modelos de simulação de culturas. Os modelos de simulação podem ser simples, como os modelos empíricos ou os fisiológico-matemáticos, ou complexos, normalmente denominados de mecanísticos. Ambos os tipos de modelos podem ser usados, desde que atendam às necessidades de quem o usa, ou seja, que produzam resultados compatíveis com a realidade local. Para a cultura da cana-de-açúcar há diversos modelos de simulação, com destaque para os modelos mecanísticos sul-africano DSSAT/CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS; BEZUIDENHOUT, 2002) e australiano APSIM-Sugarcane (KEATING et al., 1999) que, embora desenvolvidos de maneira independente, apresentam origens similares (O'LEARY et al., 2000). O modelo da Zona Agroecológica da FAO (MZA-FAO,

DOORENBOS; KASSAM, 1979) é um modelo mais simples em estrutura (processos simulados e parâmetros) do que os demais supramencionados, contudo tem apresentado resultados satisfatórios para estudos agrometeorológicos para a cana-de-açúcar no Brasil (GOUVÊA et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2012; MARIN; CARVALHO, 2012; MONTEIRO; SENTELHAS, 2014).

Modelos complexos carregam consigo incertezas inerentes à sua estrutura, parâmetros e dados de entrada (O'NEILL, 1973 citado por REYNOLDS; ACOCK, 1985; WALLACH; GENARD, 1998). Pesquisas recentes têm demonstrado que o uso de modelos em conjunto (abordagem multimodelos) tem permitido reduzir as incertezas associadas às simulações de cada modelo individualmente. Isso foi observado nas culturas do trigo (PALOSUO et al., 2011; ASSENG et al., 2013; MARTRE et al., 2015), cevada (RÖTTER et al., 2012), milho (BASSU et al., 2014), arroz (LI et al., 2015), soja (BATTISTI; SENTELHAS, 2016) e batata (FLEISHER et al., 2016). Asseng et al. (2013) avaliaram 27 modelos para a cultura do trigo cultivado em diversos locais ao redor do mundo e constataram que três modelos, adequadamente calibrados, são suficientes para reduzir as incertezas a um nível aceitável. Marin et al. (2015) avaliaram o desempenho dos modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane para cana planta em condições experimentais em diversos locais do Brasil e constaram melhoria do valor estimado da produtividade de colmos e do índice de área foliar quando utilizados em conjunto.

As ações de manejo adotadas no sistema de produção da cana-de-açúcar em escala operacional, notadamente após a primeira colheita, fazem com que a planta não responda apenas aos fatores edafoclimáticos, os quais são satisfatoriamente explicados pelos modelos de simulação de culturas. Desse modo, o uso de modelos de simulação, no caso da cana-de-açúcar, pode resultar em resultados insatisfatórios se o manejo da cultura não for adequadamente considerado.

Diante do exposto acima, o presente trabalho teve por objetivos: (i) avaliar o desempenho dos modelos MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane para cultura da cana-de-açúcar, separadamente e em conjunto (abordagem de multimodelos), em sistemas de produção de sequeiro e irrigado sob condições operacionais em diferentes regiões do Brasil; e (ii) propor um fator de manejo, associado ao decaimento da produtividade de colmos ao longo dos sucessivos cortes, visando melhorar o desempenho dos modelos.

2.2 Material e métodos

2.1.1 Dados de produtividade, meteorológicos e de solo

Os dados de produtividade de colmos na colheita (massa fresca) empregados no ajuste e avaliação dos modelos da cana-de-açúcar foram obtidos de empresas do setor sucroenergético (Usinas Japungu, Goiasa e outras que não permitiram divulgação do nome) e da NETAFIM, empresa que atua no ramo da irrigação, tanto em sistema de cultivo de sequeiro quanto irrigado. A Figura 2.2 apresenta a distribuição espacial das localidades de onde os dados de produtividade são provenientes, os quais se encontram em áreas tradicionais de cultivo (estado de São Paulo e região Nordeste) e em áreas de expansão da cultura da cana-de-açúcar (região Centro-Oeste). Apenas dados do ciclo de 12 meses foram utilizados no estudo. A profundidade de plantio foi 15 cm. A quantidade de gemas utilizadas no plantio variou de 12 a 15 por metro, enquanto que o espaçamento variou de 140 a 150 cm para as condições de sequeiro. Para as condições irrigadas, a quantidade de gemas utilizadas no plantio também variou entre 12 a 15 por metro, enquanto que o espaçamento variou entre 140 x 40 cm, 140 x 60 cm e 150 x 40 cm em função da disposição dos tubos gotejadores. Os canaviais foram conduzidos em elevado padrão de manejo embora tenham apresentado decaimento de produtividade entre os cortes, o que é comum na maioria dos canaviais brasileiros. Informações do tipo de solo, textura, capacidade de água disponível (CAD) e fonte dos dados podem ser encontrados na Tabela 2.1. Apesar de conduzidas em condições operacionais, as áreas irrigadas foram manejadas como ensaios em grandes áreas. O método de irrigação empregado nos ensaios foi o de gotejo subsuperficial, com a aplicação de lâminas de água variando de 500 a 750 mm nas épocas mais críticas, sendo que houve ensaios em que a irrigação foi plena, com lâminas de 2000 mm. As cultivares não foram informadas na maioria dos casos, portanto, o ajuste e avaliação dos modelos de simulação foram realizados para o canavial como um todo, sem distinção das cultivares.

Os dados meteorológicos referentes a temperaturas máxima e mínima do ar, precipitação, radiação solar global e insolação foram obtidos junto às estações meteorológicas mais próximas da área de interesse. Esses dados foram compilados das bases do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO), da Agência Nacional de Águas (ANA), da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, assim como de estações próprias de empresas parceiras. Quando os dados de radiação

solar global estavam ausentes, esta variável foi estimada a partir dos métodos de Angström-Prescott, para os locais que dispunham de dados de insolação, e de Hargreaves, quando haviam apenas dados de temperatura do ar, conforme recomendações de Allen et al. (1998).

A identificação dos solos de cada região foi informada pelas empresas parceiras. Para os cálculos do balanço hídrico, usados no modelo MZA-FAO, foram necessários valores de capacidade de água disponível do solo (CAD), os quais foram baseados em Driessen e Konijn (1992) e Prado (2014). A Tabela 2.2 apresenta os tipos de solos, suas texturas e os respectivos valores de CAD para cada um dos locais empregados no ajuste e na avaliação dos modelos de simulação. Os modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane utilizam dados de solo mais complexos, como por exemplo parâmetros de superfície (coeficiente de reflexão ou albedo, drenagem, declividade, potencial de escoamento superficial-*Curve Number* e fator de fertilidade), características físico-hídricas (teores de areia, argila e silte, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, densidade aparente, saturação, condutividade hidráulica) e características químicas (carbono orgânico, pH em água, capacidade de troca catiônica e teor de nitrogênio total). Os dados de solo foram obtidos junto ao banco de dados do RadamBrasil (BRASIL, 1981) e WISE (*World Inventory of Soil Emission Potentials*) (BATJES et al., 1995; GIJSMAN et al., 2007), onde buscou-se identificar aqueles com características similares ao tipo de solo considerado para cada localidade.

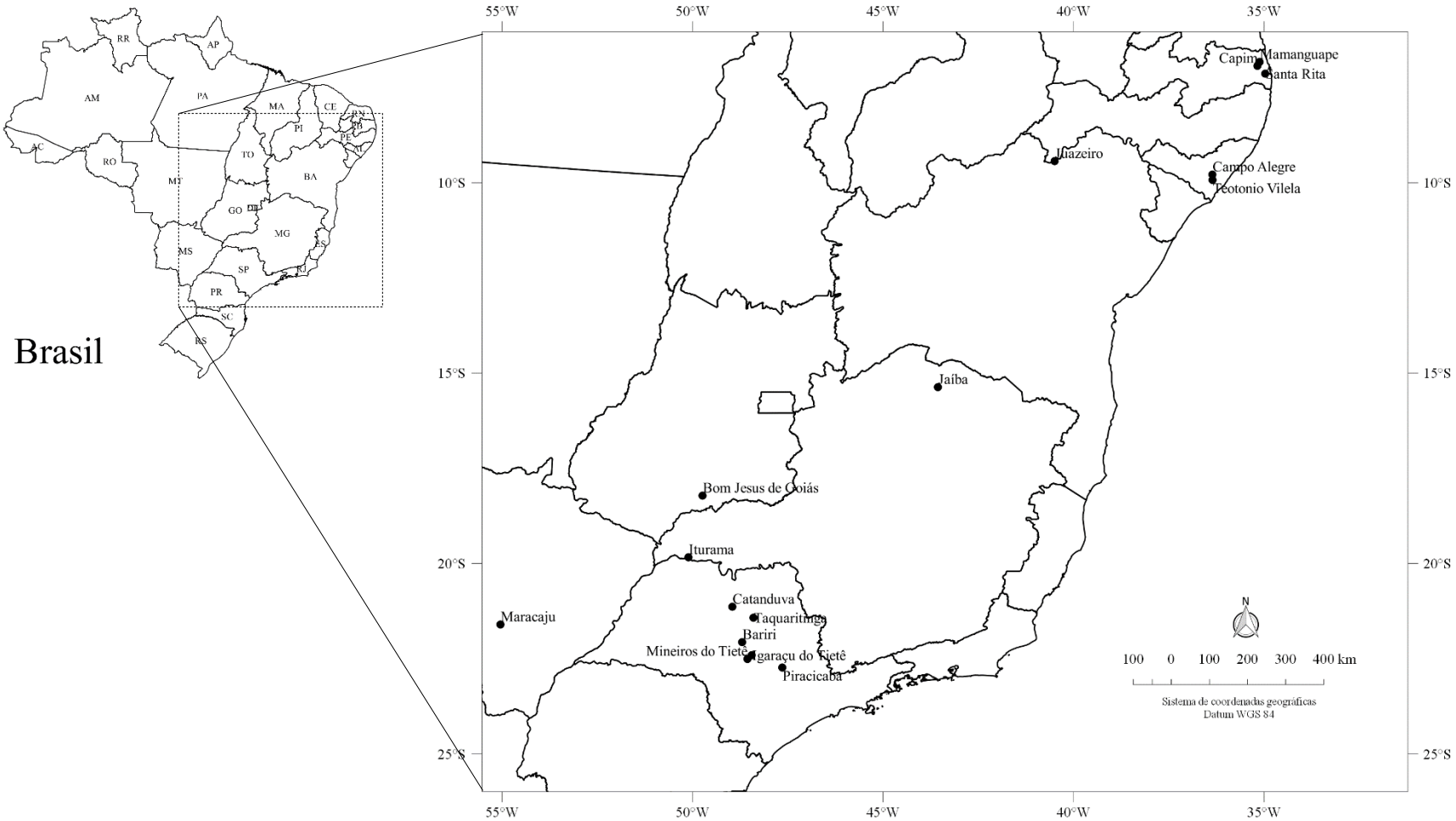


Figura 2.2 – Distribuição espacial dos locais com dados de produtividade da cultura da cana-de-açúcar, empregados no ajuste e avaliação dos modelos de simulação da produtividade da cana-de-açúcar

Tabela 2.1 – Locais, suas respectivas coordenadas e altitudes, sistema de produção (sequeiro ou irrigado) e safras utilizadas no processo de ajuste e avaliação dos modelos de simulação da produtividade da cana-de-açúcar

Local	Latitude	Longitude	Altitude	Sistema	Safras
	(graus e décimos)		(m)		
Piracicaba, SP	-22,71	-47,63	546	Sequeiro	05/06 a 11/12
Bariri, SP	-22,05	-48,74	500	Irrigado	12/13 a 13/14
Catanduva, SP	-21,11	-48,93	534	Irrigado	07/08 a 13/14
Igaraçu do Tietê, SP	-22,46	-48,41	498	Irrigado	07/08 a 13/14
Mineiros do Tietê, SP	-22,50	-48,52	669	Irrigado	07/08 a 13/14
Taquaritinga, SP	-21,36	-48,42	565	Irrigado	05/06 a 12/13
Iturama, MG	-19,72	-50,13	402	Irrigado	03/04 a 12/13
Jaíba, MG	-15,33	-43,58	484	Irrigado	08/09 a 13/14
Maracaju, MS	-21,58	-55,17	385	Sequeiro	09/10 a 13/14
Bom Jesus de Goiás, GO	-18,07	-49,68	630	Sequeiro	10/11 a 13/14
Juazeiro, BA	-9,38	-40,48	370	Irrigado	00/01 a 13/14
Capim, PB	-6,91	-35,17	47	Sequeiro	06/07 a 10/11
Mamanguape, PB	-6,83	-35,11	35	Irrigado	13/14
Santa Rita, PB	-7,13	-35,01	20	Irrigado	13/14
Campo Alegre, AL	-9,83	-36,35	137	Irrigado	02/03 a 14/15
Teotonio Vilela, AL	-9,89	-36,36	112	Irrigado	00/01 a 13/14

Tabela 2.2 – Relação das localidades e de seus respectivos tipos de solo, textura, capacidade de água disponível (CAD, em mm m^{-1}) e fonte dos dados

Local	Tipo de solo	Textura	CAD (mm m^{-1})	Fonte
Piracicaba, SP	Argissolos e Cambissolos	Média	80	Parceiro
Bariri, SP	Latossolo	Média	80	NETAFIM
Catanduva, SP	Latossolo	Argilosa	130	NETAFIM
Igaraçu do Tiete, SP	Latossolo	Argilosa	130	NETAFIM
Mineiros do Tiete, SP	Latossolo	Média	80	NETAFIM
Taquaritinga, SP	Neossolo Quartzarênico	Arenosa	30	NETAFIM
Iturama, MG	Argissolo	Média	80	NETAFIM
Jaiba, MG	Argissolo	Média	80	NETAFIM
Maracaju, MS	Latossolo	Média	80	Parceiro
Bom Jesus de Goiás, GO	Latossolo	Média	80	Usina Goiasa
Juazeiro, BA	Vertissolo	Argilosa	130	NETAFIM
Capim, PB	Neossolo Quartzarênico	Arenosa	27	Usina Japungu
Mamanguape, PB	Latossolo	Médio-arenosa	55	NETAFIM
Santa Rita, PB	Neossolo Quartzarênico	Arenosa	30	NETAFIM
Campo Alegre, AL	Latossolo	Média-arenosa	55	NETAFIM
Teotonio Vilela, AL	Argissolo	Média-arenosa	55	NETAFIM

2.1.2 Descrições dos modelos de simulação da cultura da cana-de-açúcar

2.1.2.1 MZA-FAO

O modelo MZA-FAO (DOORENBOS; KASSAM, 1979) é um modelo relativamente simples e é dividido basicamente em duas etapas, sendo a primeira ligada à estimação da produtividade potencial (PP) e a segunda à penalização dessa pelo déficit hídrico, obtendo-se assim, a produtividade atingível (PA). O déficit hídrico relativo é representado pela relação (1-ETr/ETc), sendo a evapotranspiração real da cultura (ETr) obtida pelo balanço hídrico da cultura, o qual foi estimado pelo modelo de Thornthwaite e Mather (1955). A ETc é a evapotranspiração máxima da cultura. A ETo foi estimada pelo método de Priestley e Taylor (1972), em função da indisponibilidade de dados de umidade relativa do ar e de velocidade do vento, usadas no método padrão Penman-Monteith. O método de Priestley e Taylor (1972) leva em consideração a temperatura média do ar (Tmed), o saldo de radiação (Rn) e o fluxo de calor no solo (G) conforme a equação abaixo:

$$\mathrm{ETo} = 1{,}26 \times \mathrm{W} \times \frac{(\mathrm{Rn} - \mathrm{G})}{2{,}45} \times \mathrm{ND} \tag{2.1}$$

em que: ETo é a evapotranspiração de referência, em mm dia^{-1}; W é o coeficiente de ponderação, condicionado pela Tmed; 2,45 é o fator de conversão de calor latente disponível em massa de água evaporada, MJ kg^{-1}; Rn é o saldo de radiação, em MJ m^{-2} dia^{-1}; G é o fluxo de calor no solo, em MJ m^{-2} dia^{-1}, admitido como nulo na escala diária; e ND é o número de dias do período considerado, sendo igual a um na escala diária. A constante 1,26 representa a relação entre os termos aerodinâmico e energético da equação de Penman para estimação da evapotranspiração de referência (Priestley e Taylor, 1972).

O Rn foi estimado como sendo 57,3% da irradiância solar global (Qg) (PEREIRA et al., 1998; FERREIRA-JUNIOR et al., 2014). Para o cálculo do coeficiente W, foram utilizadas duas equações propostas por Wilson e Rouse (1972), que correspondem às condições em que a temperatura média do ar apresentou valores, respectivamente, inferiores a 16ºC (Wa) e entre 16ºC e 32ºC (Wb):

$$\mathrm{Wa} = 0{,}407 + 0{,}0145 \times \mathrm{Tmed} \tag{2.2}$$

$$\mathrm{Wb} = 0{,}483 + 0{,}01 \times \mathrm{Tmed} \tag{2.3}$$

A ETc foi determinada pelo produto entre a ETo e o coeficiente de cultura (kc) para cada fase de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. Os valores de kc foram obtidos de Doorenbos e Kassam (1979) e são apresentados na Tabela 2.3 para as diferentes fases de desenvolvimento.

A estimação da PP é baseada no modelo teórico de de Wit (1965), o qual leva em consideração a produção máxima de massa seca em função da radiação solar no topo da atmosfera (Qo), temperatura média do ar (Tmed) e a relação entre a insolação (n) e o fotoperíodo (N). As variáveis N e Qo foram estimadas de acordo Allen et al. (1998) e o n, quando não medido, foi estimado pela integração dos métodos de estimação de Qg de Angström-Prescott e Hargreaves (ALLEN et al., 1998), conforme equação abaixo:

$$n = \left[\frac{\left(k \times \sqrt{Tmax - Tmin}\right) - 0{,}29 \times \cos\phi}{0{,}52} \right] \times N \qquad (2.4)$$

em que: n é a insolação, em h dia^{-1}; Tmax e Tmin são respectivamente as temperaturas máxima e mínima do ar, em ºC; k é o coeficiente de ajuste da equação de Hargreaves, sendo considerado igual a 0,16 para áreas continentais e a 0,19 para áreas litorâneas; ϕ é a latitude do local, em graus e décimos; e N é o fotoperíodo, em h dia^{-1}.

A PP foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$PP = \sum_{i=1}^{p} \left(PPBp_i \times c_{IAF} \times c_{resp} \times c_{colh} \times c_{um} \right) \qquad (2.5)$$

em que: *i* varia de 1 a p; p representa os dias do ciclo; PPBp é a produtividade potencial bruta padrão de massa seca para uma cultura hipotética com IAF = 5, em kg MS ha^{-1} dia^{-1}; PP é a produtividade potencial final da cultura, em kg ha^{-1}; c_{IAF} é o coeficiente para correção do índice de área foliar (IAF); c_{resp} é o coeficiente de correção para respiração de manutenção da cultura; c_{colh} é o coeficiente relativo à parte colhida ou índice de colheita (no caso, colmos); e c_{um} é o coeficiente que considera a umidade da parte colhida.

A duração, em dias, e o valor de IAF das fases de desenvolvimento utilizadas foram obtidos de Doorenbos e Kassam (1979) e adaptações realizadas por Monteiro e Sentelhas (2014) (Tabela 2.3)

A PPBp foi calculada por meio do somatório das produtividades potenciais brutas em duas condições, sob ausência de nuvens - céu limpo (PPBc) e quando o céu está nublado (PPBn), no período considerado. PPBc e PPBn foram estimadas a partir das seguintes equações:

$$PPBc = (107{,}2 + 8{,}604 \times Qo) \times {}^{n}\!/_{N} \times cTc \qquad (2.6)$$

$$PPBn = (31{,}7 + 5{,}243 \times Qo) \times \left(1 - {}^{n}\!/_{N}\right) \times cTn \qquad (2.7)$$

em que: PPBc e PPBn representam as produtividades potenciais brutas em dias com céu aberto e com nebulosidade, respectivamente, em kg MS ha^{-1} dia^{-1}; n é a insolação, em h dia^{-1}; N é o fotoperíodo, em h dia^{-1}; Qo é a irradiância solar no topo da atmosfera, em MJ m^{-2} dia^{-1}; cTc e cTn representam os coeficientes adimensionais associados à eficiência do processo fotossintético, sendo função do metabolismo de fixação de CO_2 atmosférico e da Tmed, nos dias de céu aberto e céu nublado (PEREIRA et al., 2002).

A área foliar de uma cultura varia ao longo do seu ciclo, para tanto, o coeficiente de correção da PPBp relativo ao IAF da cultura (c_{IAF}) foi calculado empregando-se a seguinte equação:

$$c_{IAF} = 0{,}0093 + 0{,}185 \times IAF_{max} - 0{,}0175 \times IAF_{max}^2 \qquad \left(IAF_{max} \geq 5; c_{IAF} = 0{,}5\right) \qquad (2.8)$$

em que: c_{IAF} é o coeficiente de correção para o índice de área foliar; IAF_{max} representa o valor máximo de IAF na fase de desenvolvimento considerada.

O coeficiente utilizado para correção da respiração de manutenção de cultura (c_{resp}) é uma função da Tmed, em que duas condições são consideradas. Se a Tmed for menor 20ºC, admite-se c_{resp} igual a 0,6. Caso a Tmed seja superior ou igual a 20ºC, admite-se c_{resp} igual a 0,5. O coeficiente de colheita (c_{colh}) é responsável pela conversão da massa seca total em massa seca útil ou colhida. No presente estudo, em função do produto a ser colhido ser os colmos, c_{colh} foi considerado como sendo 77% da massa total da planta de cana-de-açúcar. Como a PPBp é estimada na base de massa seca, foi necessário considerar no modelo um coeficiente com o intuito de simular a umidade do produto a ser colhido (C_{um}). Para tanto, foi utilizado a correção proposta por Doorenbos e Kassam (1979) considerando-se um valor de umidade de colmo de 80%.

A PA foi estimada a partir da relação entre a quebra de produtividade relativa (1 - PA/PP) e o déficit hídrico relativo (1 - ETr/ETc). A partir dessa relação, Doorenbos e Kassam (1979) propuseram um modelo que relaciona tais variáveis, por meio de um coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico, para a estimação da PA. Assim, é possível se calcular a PA da cana-de-açúcar conhecendo-se a PP, o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (ky), variável em função das fases de desenvolvimento da cultura, e a evapotranspiração relativa, proveniente do balanço hídrico da cultura. Quanto maior o ky, maior é a sensibilidade da fase de desenvolvimento da cultura ao déficit hídrico.

A PA foi calculada conforme a seguinte equação:

$$PA_n = \prod_{i=1}^{n} \left\{ PA_{n-1} \times \left[1 - ky_i \times \left(1 - \frac{ETr}{ETc} \right)_i \right] \right\} \tag{2.9}$$

em que: PA_n é a produtividade atingível, em t ha^{-1}; *i* = 1 a 7 representam as fases de desenvolvimento durante o ciclo da cultura (Tabela 2.3); PA_{n-1} é a produtividade atingível da fase de desenvolvimento anterior, em t ha^{-1}, sendo que na fase de desenvolvimento *i* = 1, PA_{n-1} = PP; ky é o coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico da cultura em cada fase de desenvolvimento *i*; ETc é a evapotranspiração máxima da cultura, em mm dia^{-1}; ETr é a evapotranspiração real da cultura, em mm dia^{-1}, obtida por meio do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955).

Tabela 2.3 – Fases de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, sua duração em dias e os respectivos valores de coeficiente de cultura (kc), de índice de área foliar (IAF) e do coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico original do modelo (ky)

Fase de desenvolvimento	Duração da fase (dias)	kc	IAF	ky
1 - Do plantio até 25% de cobertura	30	0,55	2,0	0,75
2 - De 25-50% de cobertura	30	0,80	2,5	0,75
3 - De 50-75% de cobertura	15	0,90	3,0	0,50
4 - De 75% à cobertura plena	50	1,00	3,5	0,50
5 - Máximo crescimento	180	1,05	4,5	0,50
6 - Senescência	30	0,80	4,0	0,50
7 - Maturação	30	0,60	3,5	0,10
Total de dias do ciclo	365			

Fonte: Doorenbos e Kassam (1979); Monteiro e Sentelhas (2014)

2.1.2.2 DSSAT/CANEGRO

O modelo de simulação da cultura da cana-de-açúcar CANEGRO (versão 4.5), pertencente à plataforma do DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), simula o crescimento e o desenvolvimento da cana-de-açúcar a partir de dados meteorológicos diários, da cultivar, do solo e do manejo. O modelo foi primeiramente desenvolvido por Inman-Bamber (1991) com base no modelo CERES-MAIZE (JONES; KINIRY, 1986), passando por diversas melhorias até a compilação realizada por Singels et al. (2008). No modelo são simulados os seguintes processos: crescimento e desenvolvimento da cultura no nível de folhas e perfilhos; captura da radiação por meio do IAF; balanço hídrico usando princípios de dinâmica do sistema solo-planta-atmosfera; acúmulo de biomassa seguindo uma abordagem de eficiência do uso da radiação/respiração; e partição da biomassa para diferentes componentes da planta (incluindo sacarose nos colmos) por meio da relação fonte-dreno, sendo essa etapa influenciada pela idade fisiológica da cultura e estresses hídrico e térmico (SINGELS et al., 2008).

O DSSAT/CANEGRO contempla 74 parâmetros de cultura, sendo 23 de espécie, 31 de ecótipo e 20 de cultivar (Tabelas 2.4, 2.5 e 2.6). Todavia, sugere-se que apenas os parâmetros de ecótipo e cultivar devam ser ajustados pelos usuários. Tais parâmetros pretendem conjuntamente representar as características genéticas da cultura em diferentes níveis de especificidade. Os parâmetros de cultivar referem-se às características de um cultivar específico, enquanto os de ecótipos, que também representam tais características, são mais estáveis. Já os parâmetros de espécie representam características da espécie, descrevendo processos como fotossíntese, respiração, partição de fotoassimilados, crescimento das raízes e resposta da cultura ao acamamento e estresse hídrico (SINGELS et al., 2008).

Há distinção entre temperaturas base (Tb) para cálculos de fenologia e acúmulo de biomassa. Para o crescimento do sistema radicular em profundidade, é considerada uma Tb de 16 ºC. Para a emergência, elongação dos colmos e fenologia das folhas a Tb é de 10 ºC, enquanto que para a extensão da planta é empregada a Tb de 10,57 ºC. No caso da fenologia dos colmos, a Tb é 16 ºC. Para a fotossíntese, a qual regula o acúmulo de biomassa, a Tb é 7 ºC (SINGELS et al., 2005), sendo considerada um parâmetro de espécie. Não são consideradas temperaturas ótima ou máxima para esses cálculos.

No modelo, a fenologia da cultura é condicionada pelo acúmulo de graus-dia (GD, ºC dia). A fase de germinação vai do plantio ou corte até a emergência dos perfilhos primários. A emergência dos perfilhos primários ocorre quando um período específico de

tempo térmico é acumulado a partir do plantio (TTPLNTEM) ou do corte (TTRATNEM). Esse é o único ponto de distinção entre cana planta e soca. O início do crescimento dos colmos (elongação) é simulado quando se acumula um tempo térmico específico (CHUPIBASE) após o surgimento dos perfilhos primários. A população máxima de perfilhos (pico de perfilhamento) é alcançada quando um tempo térmico específico é acumulado desde a emergência (TT_POPGROWTH). Na simulação pelo modelo, a fase de perfilhamento vai da emergência dos perfilhos primários até o pico de perfilhamento, enquanto a fase de crescimento dos colmos dura do início da elongação dos colmos até a colheita. Já a fase de senescência dos perfilhos inicia-se após o pico de perfilhamento e segue até a colheita. Não há simulação do florescimento da cana-de-açúcar pelo modelo DSSAT/CANEGRO.

No desenvolvimento da parte aérea, o DSSAT/CANEGRO utiliza um modelo de IAF derivado do desenvolvimento de folhas individuais e de perfilhos baseado no tempo térmico. Tal modelo simula o desenvolvimento de folhas individuais e dos perfilhos, sendo que a área foliar de cada perfilho é extrapolada para o nível de dossel pela multiplicação da área foliar individual pelo nº de perfilhos por unidade de área. A interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é calculada de acordo com a Lei de Beer, usando dois coeficientes de extinção (0,58 e 0,84) durante o desenvolvimento do dossel, os quais são variáveis em função do número de folhas formadas no colmo primário (LFNMXEXT) (INMAM-BAMBER, 1991).

O aparecimento de folhas e o perfilhamento são função do tempo térmico, os quais são definidos por meio de parâmetros de cultivar e ecótipo. A taxa de perfilhamento é inversamente proporcional ao espaçamento entre as linhas, ao passo que a senescência dos perfilhos depende do tempo térmico e do estresse hídrico. Para o aparecimento das folhas o modelo considera dois filocronos (Pl1 e Pl2), em função do número de folhas emergidas (PSWITCH), seguindo abordagem de Inman-Bamber (1994a). A senescência das folhas é acentuada pelo estresse hídrico e ocorre quando um valor máximo de folhas por colmo é atingido. O modelo calcula a expansão foliar por meio da taxa de expansão da planta (PER, cm dia^{-1}). A PER depende da temperatura do ar (INMAN-BAMBER, 1994b), bem como da disponibilidade hídrica (SINGELS et al., 2008). O crescimento do colmo (SGHT, cm) e do dossel (CANHEIGHT, cm) também dependem da PER e são calculados de acordo com as equações descritas em Singels et al. (2008). Ambas sofrem influência de parâmetros de espécies (PERcoeff e CHTCoeff) em seus cálculos.

A simulação do acúmulo de biomassa é descrita por Singels e Bezuidenhout (2002). O incremento diário na biomassa total (dTOT/dt, em t ha^{-1} dia^{-1}) é calculado utilizando-se a eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) (PARCE, em g MJ^{-1}), a quantidade de radiação interceptada (IPAR, em MJ ha^{-1}), o tamanho da planta (TOT, t ha^{-1}), gastos com respiração (manutenção e crescimento) e o nível de estresse hídrico (SWDF1, adimensional). A respiração de manutenção (Rm, adimensional) e a PARCE são influenciadas pela temperatura do ar (SINGELS et al., 2008). A Rm foi derivada do trabalho de Liu e Bull (2011), o qual varia exponencialmente com a temperatura do ar, considerando que essa variação ocorre em função de uma temperatura de referência de 10 ºC (INMAM-BAMBER, 1991). A respiração de crescimento é um valor constante de 0,242 t t^{-1} (INMAM-BAMBER, 1991), sendo considerada como um parâmetro da espécie.

A partição dos fotoassimilados entre raízes e a parte aérea é simulada por uma função não-linear da biomassa total, na qual a máxima fração de incremento diário da biomassa particionada para a parte aérea e para a raiz é especificada em parâmetros de cultivar e espécie. A fração do incremento particionado em relação à parte aérea, que será destinada ao colmo é dependente do tempo térmico e de um valor máximo especifico para a cultivar. A partição da massa seca entre os tecidos estruturais do colmo e o acúmulo de sacarose é regida pelas condições de crescimento (temperatura e água), a massa de colmo atual e características da cultivar (SINGELS e BEZUIDENHOUT, 2002).

O crescimento radicular tem um algoritmo expresso em termos de extensão da profundidade de raízes, bem como o aumento da massa radicular e do comprimento das raízes por camada de solo. O potencial de penetração das raízes no solo é 2,2 mm por unidade de ^{o}C dia no dia em questão, até que se atinja a profundidade máxima do sistema radicular. É assumido que 0,5% da densidade de comprimento de raiz são perdidas diariamente, devido à respiração e senescência. A máxima absorção de água por comprimento de raiz é um parâmetro da espécie e é limitado a 0,07 cm^3 cm^{-1} (JONES; KINIRY, 1986; VAN ANTWERPEN, 1998). O sistema radicular juntamente com as condições hídricas do solo, determina o potencial de absorção (extração) de água pela planta, usados posteriormente para o cálculo do nível de estresse hídrico (SWDF1 e SWDF2), seguindo abordagem de Ritchie (1998). O balanço hídrico do solo no DSSAT é descrito por Ritchie (1998), o qual interfere em praticamente todos os processos de crescimento e desenvolvimento da cultura. A ETo é estimada pelo método Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), mas também pode ser adotado o método de Priestley e Taylor (1972), o qual foi utilizado no presente estudo, devido à

ausência de dados de umidade relativa do ar e velocidade do vento. No caso do modelo CANEGRO, o balanço de nitrogênio não é simulado. Portanto, na simulação da produtividade não há restrições de ordem nutricional.

Foram avaliadas a parametrização original para a cultivar padrão NCo376, para as calibrações para as cultivares brasileiras RB86-7515 (MARIN et al., 2011, 2013, 2015; NASSIF et al., 2012), RB92-579 (SILVA, 2012), RB72-454 (MARIN et al., 2011), SP83-2847 (MARIN et al., 2011) e para um conjunto de cultivares de primeiro corte conduzidos em Piracicaba, SP, e Capim, PB (VIANNA e SENTELHAS, 2015). As avaliações para as calibrações existentes na literatura foram feitas para que o ajuste dos modelos pudesse partir de uma ou mais dessas calibrações. Na Tabela 2.7 são apresentados os valores dos parâmetros de cada uma dessas calibrações. Na tentativa de ajuste dos parâmetros de cultivar, se buscou alterar aqueles relacionados a fenologia e partição de biomassa, sem extrapolar os limites recomendados por Singels et al. (2008) e calibrados para cultivares brasileiras.

Tabela 2.4 – Parâmetros de espécie do modelo DSSAT/CANEGRO, suas unidades e descrições

Parâmetro	Unidade	Descrição
Tbasephotos	ºC	Temperatura base para fotossíntese
Critsw	-	Limiar de estresse hídrico para impacto prolongado de estresse na fotossíntese
HuRecover	ºC dia	Graus-dia requerido para total recuperação da fotossíntese após estresse hídrico severo
RespQ10	-	Aumento da fração na taxa de respiração por 10°C de aumento na temperatura (coeficiente Q10)
RespGcf	-	Fração da fotossíntese bruta perdida na respiração para o crescimento
PCB	-	Coeficiente de partição: coeficiente de extinção da fração de incremento de massa seca, alocada para a biomassa acima do solo
Max_rootpf	-	Fração da partição máxima do incremento da massa diária às raízes
FTCON	-	Resposta à temperatura do parâmetro de forma
SURCON	-	Parâmetro de particionamento de sacarose que determina o tempo de resposta de mudanças na partição entre sacarose e fibra devido a mudanças ambientais
RTcmpg	$cm\ g^{-1}$	Comprimento radicular por massa de raiz
Wrk	-	Coeficiente de densidade de comprimento radicular por profundidade
RLVmin	$cm\ cm^{-3}$	Densidade de comprimento radicular mínimo nas camadas do solo
SenesF	nº folhas	Número de folhas senescentes por colmo por 100 dias de estresse
Reset	mm	Chuva requerida para recompor o contador de dias de estresse
Percoeff	-	Fração do crescimento da planta atribuído ao alongamento do colmo
CHTCoeff	$cm\ cm^{-1}$	Coeficiente de determinação da altura do dossel em função da altura do colmo e número de folhas
Hillpar1	-	Função empírica do parâmetro de forma
EORATIO	-	Relação da evapotranspiração de um dossel completamente formado e sem restrições hídricas de cana-de-açúcar comparado com a evapotranspiração de referência da grama (kc)
RWUEP1	-	Taxa limite de suprimento de água no solo/evaporação potencial, abaixo da qual a evaporação e fotossíntese são limitadas
RWUEP2	-	Taxa limite de suprimento de água no solo/evaporação potencial, abaixo da qual o crescimento é limitado
RWUMX	cm^3 água cm^{-1} raiz	Absorção máxima de água por unidade de comprimento da raiz
LG_RATING	-	Pontuação de acamamento quando a cultura está totalmente acamada
LG_CRIT_WIND	$km\ dia^{-1}$	Limite do vento para o acamamento

Fonte: Singels et al. (2008)

Tabela 2.5 – Parâmetros de ecótipo do modelo DSSAT/CANEGRO, suas unidades e descrições

Parâmetro	Unidade	Descrição
DELTTMAX	t^{-1}	Variação máxima do teor de sacarose por unidade de variação da massa do colmo na seção imatura do caule
SWDF2AMP	-	Sensibilidade de particionamento da sacarose ao estresse hídrico
CS_CNREDUC	-	Redução máxima da fração do dossel devido ao estresse hídrico
CS_CNPERIOD	dias	Período de estresse hídrico requerido para ter o maior efeito na redução do dossel
Tthalfa	^{o}C dia m^{-1}	Graus-dia necessário para o dossel ajustar-se à metade da largura da linha
dPERdT	mm h^{-1} $^{o}C^{-1}$	Mudança na taxa de crescimento da planta por unidade de temperatura efetiva
EXTCFN	-	Máximo Coeficiente de extinção de radiação do dossel
EXTCFST	-	Mínimo Coeficiente de extinção de radiação do dossel
LFNMXEXT	nº folhas	Numero de folhas (incluindo folhas mortas ainda fixadas) onde ocorre a máxima extinção da radiação
AREAMX_CF(1)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima área foliar (y=cf1+cf2*x+cf3*x2)
AREAMX_CF(2)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima área foliar
AREAMX_CF(3)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima área foliar
WIDCOR	-	Parâmetro que influencia a largura das folhas
WMAX_CF(1)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por numero de folhas
WMAX_CF(2)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por numero de folhas
WMAX_CF(3)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por numero de folhas
LMAX_CF(1)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por numero de folhas
LMAX_CF(2)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por numero de folhas
LMAX_CF(3)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por numero de folhas
MAXLFLENGTH	cm	Máximo comprimento absoluto de folha
MAXLFWIDTH	cm	Máxima largura absoluta de folha
POPCF(1)	-	Coeficiente de população de colmo, em condições ideais, em função de graus dia
POPCF(2)	-	Coeficiente de população de colmo, em condições ideais, em função de graus dia
POPDECAY	-	Fração de perfilhos sobre a população madura (com 1600 ºCd), que senescem por unidade de graus dia
TTBASEEM	ºC	Temperatura base para emergência e inicio da elongação do colmo
TTBASELFEX	ºC	Temperatura base para fenologia de folha
TTBASEPOP	ºC	Temperatura base para fenologia de colmos
TBASEPER	ºC	Temperatura base para extensão da planta
LG_AMRANGE	t ha^{-1}	Variação na massa da parte aérea do inicio ao final do acamamento
LG_GP_REDUC	-	Redução na fotossíntese bruta devido ao acamamento total, como fração
LG_FI_REDUC	-	Redução na fração de interceptação do dossel devido ao acamamento completo

Fonte: Singels et al. (2008)

Tabela 2.6 – Parâmetros de cultivar do modelo DSSAT/CANEGRO, suas unidades e descrições

Parâmetro	Unidade	Descrição
PARCEmax	g MJ^{-1}	Máxima eficiência na conversão de radiação expressa em assimilados produzidos antes da respiração, por unidade de PAR
APFMX	t t^{-1}	Fração máxima de incremento de massa seca que pode ser atribuído a massa seca da parte aérea
STKPFMAX	t t^{-1} base massa seca	Fração do incremento diário de massa seca aérea particionada para o colmo em altas temperaturas em uma cultura madura
SUCA	t t^{-1}	Parâmetro de particionamento de sacarose: máxima sacarose contida na base do colmo
TBFT	ºC	Particionamento de sacarose: temperatura em que o particionamento de incremento de massa de colmo sem estresse para sacarose é 50% do valor máximo
Tthalfo	ºC dia	Graus-dia para que o desenvolvimento do dossel atinja metade do espaçamento
Tbase	ºC dia	Temperatura base para o desenvolvimento do dossel
LFMAX	nº folhas	Número máximo de folhas verdes saudáveis, plantas adequadamente irrigadas serão velhas o suficiente para perderem folhas após este número
MXLFAREA	cm^2	Área foliar máxima atribuída a todas as folhas sobre o numero de folhas MXLFARNO (cm^2)
MXLFARNO	nº folhas	Número de folhas sobre o qual é limitado pelo MXLFAREA
Pl1	ºC dia	Intervalo de filocrono 1 (para numero de folhas abaixo do Pswitch)
Pl2	ºC dia	Intervalo de filocrono 1 (para numero de folhas acima do Pswitch)
PSWITCH	nº	Número da folha em que há mudança no filocrono
MAX_POP	colmos m^{-2}	População de perfilhos máxima
POPTT16	colmos m^{-2}	População de colmos após 1600 graus-dia
TTPLNTEM	ºC dia	Graus-dia para emergência da cana-planta
TTRATNEM	ºC dia	Graus-dia para emergência da soqueira
CHUPIBASE	ºC dia	Graus-dia para o inicio do crescimento do colmo
TT_POPGROWTH	ºC dia	Graus-dia para ocorrer o pico do perfilhamento
LG_AMBASE	t ha^{-1}	Massa da parte aérea (colmo, folhas e água) onde ocorre o inicio do acamamento

Fonte: Singels et al. (2008)

Tabela 2.7 – Valores dos parâmetros para a cultivar padrão do modelo DSSAT/CANEGRO (NCo376) e para calibrações disponíveis para as cultivares brasileiras (RB72-454, RB92-579, RB86-7515, SP-83-2847 e para um conjunto de cultivares)

Parâmetro	NCo376[1]	RB72-454[2]	SP83-2847[2]	RB92-579[3]	RB86-7515[4]	RB86-7515[5]	RB86-7515[6]	Diversas[7]
PARCEmax	9,9	14,86	14,86	10,8	12,86	11,1	9,9	11,1
APFMX	0,88	0,904	0,904	0,92	0,843	0,88	0,88	0,88
STKPFMAX	0,65	0,642	0,655	0,88	0,699	0,65	0,65	0,65
SUCA	0,58	0,565	0,65	0,57	0,68	0,58	0,58	0,58
TBFT	25	25	25	25	25	25	25	25
Tthalfo	250	285,9	193,7	286	250,8	250	250	250
Tbase	16	14,4	14,6	14	15,71	16	16	16
LFMAX	12	11,82	12,62	8	9,96	10	10	10
MXLFAREA	360	796	734	796	500,2	546	594	546
MXLFARNO	15	23	23	22	17,19	22	18	22
Pl1	69	112,8	113	109	89	89	89	89
Pl2	169	116,6	122,2	117	150	107	107	107
PSWITCH	18	18	18	22	16,14	18	18	18
MAX_POP	30	18,4	18,9	28	20,35	12	16	12
POPTT16	13,3	8,4	8	12	8,19	10	10	10
TTPLNTEM	428	292,1	297,4	428	300,4	208	408	208
TTRATNEM	203	448	486,69	620	290,9	220	203	120
CHUPIBASE	1050	628,3	628,1	1050	855	1050	547	448
TT_POPGROWTH	600	292,1	297,4	628	650,4	628	628	628

[1] Singels et al. (2008); [2] Marin et al. (2011); [3] Silva (2012); [4] Nassif et al. (2012); [5] Marin et al. (2013); [6] Marin et al. (2015); [7] Vianna e Sentelhas (2015)

2.1.2.3 APSIM-Sugarcane

No módulo da cana-de-açúcar do modelo APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*, versão 7.4), as simulações podem ser basicamente resumidas em quatro abordagens, segundo Keating et al. (1999): eficiência do uso da radiação (RUE, sigla em inglês); interceptação da radiação incidente pelo dossel da cultura; produção de biomassa; e partição da massa seca e fotoassimilados.

A fenologia da cana-de-açúcar no APSIM-Sugarcane é dividida em cinco fases: i) do plantio ou corte até a brotação; ii) da brotação à emergência; iii) da emergência ao início do crescimento dos colmos; iv) do crescimento dos colmos ao florescimento; v) e desse até a colheita. O florescimento é desativado nas simulações. Portanto, a última fase vai do crescimento dos colmos até a maturação/colheita.

A fenologia é regulada pelo acúmulo graus-dias (GD), o qual varia de acordo com a cultivar. Diferentemente do DSSAT/CANEGRO, o APSIM-Sugarcane considera apenas uma Tb (9 ºC) para todo o desenvolvimento da cultura. No entanto, há uma temperatura ótima (32ºC) e máxima (45ºC) para o cálculo do tempo térmico, baseado na cultura do milho (RITCHIE, 1986). No modelo, o cálculo de GD é baseado na estimação da temperatura do ar a cada três horas por meio de uma função que utiliza a Tmax e Tmin, seguindo o modelo descrito por Ritchie (1986).

A base experimental do algoritmo de expansão do dossel da cultura é descrita por Robertson et al. (1998). O IAF de folhas verdes é o produto da área foliar de folhas verdes por colmos e o número de colmos por unidade de área. A área foliar é específica para a cultivar e é condicionada pelo tempo térmico e balanço de biomassa e é usada para o cálculo da interceptação da radiação incidente. A taxa diária de senescência de folhas verdes é determinada por quatro fatores: idade fisiológica da cultura; competição por luz; estresse hídrico e; estresse por baixas temperaturas. A senescência foliar é induzida quando a fração da radiação solar interceptada é superior a 85%. A interceptação da radiação solar é baseada na Lei de Beer, a qual utiliza o IAF e apenas um coeficiente de extinção de 0,38, determinado por Muchow et al. (1994). Se a Tmin atinge 0 ºC, há redução de 10% do IAF, incrementando linearmente até 100% de redução (morte dos tecidos) quando a Tmin alcança -5 ºC.

A simulação do acúmulo de massa seca é dada pela RUE e eficiência transpiratória. São utilizados diferentes valores de RUE para cana planta e soca, mas os mesmos coeficientes de extinção e transpiração. Nessa abordagem de RUE, a respiração não é diretamente computada. Para cana planta a RUE é 1,8 g MJ^{-1}, enquanto que para a soca é 1,65 g MJ^{-1},

valores derivados dos trabalhos de Robertson et al. (1996) e Muchow et al. (1997). A RUE e a expansão do dossel são afetadas por extremos de temperatura, estresse hídrico (deficiência ou excedente) e deficiência de nitrogênio. No modelo, a RUE é reduzida sempre que a Tmed é inferior a 15 ºC ou superior a 35 ºC e anulada se a Tmed atinge 5 ºC ou 50 ºC, similar às culturas do metabolismo C_4 (KEATING et al., 1999).

O efeito da deficiência hídrica no crescimento e no desenvolvimento da cultura utiliza a abordagem sumarizada por Ritchie (1986), a mesma adotada na plataforma DSSAT. O efeito da deficiência de nitrogênio no crescimento e desenvolvimento da planta é dado por meio de limites máximos, mínimos e críticos do referido nutriente na folha (KEATING et al., 1999). O crescimento não é afetado até que o conteúdo de nitrogênio na folha fique abaixo do limite crítico.

Com relação ao balanço da biomassa acima do solo, no período entre a emergência e o início do crescimento dos colmos 63% dessa biomassa é particionado para as folhas e 37% para o meristema apical (ponteiros). Durante a fase de crescimento dos colmos até a maturação, 70% da biomassa é direcionada aos colmos, sendo que a porcentagem destinada à sacarose em tal órgão varia de 55 a 100% em função do nível de estresse hídrico, estresse térmico e deficiência de nitrogênio.

O conteúdo de umidade no colmo é calculado com base na idade da cultura e no teor de sacarose no colmo. Para cada grama de massa estrutural de colmo produzida, uma dada quantidade de água é acumulada. Tal relação varia com o tempo térmico, de 10 g água g^{-1} de massa seca para o início do ciclo da cultura a 4,5 g água g^{-1} de massa seca para o final do ciclo da cultura. Para cada grama de sacarose depositada no colmo, uma grama de água é substituída. Desse modo, a idade da cultura e o teor de sacarose no colmo podem influenciar o conteúdo de água no colmo de modo independente.

Com relação às raízes, a quantidade de biomassa dessas aumenta a cada dia em função da biomassa diária produzida. A biomassa destinada ao sistema radicular varia em função da fase fenológica, sendo que o máximo de 30% da biomassa produzida acima do solo é direcionado na fase de emergência. A biomassa direcionada ao sistema radicular é convertida por um fator em comprimento de raízes, o qual é utilizado no balanço de água e de solutos do módulo SWIM (VERBURG et al., 1996). O sistema radicular cresce em profundidade no solo a uma taxa de 15 mm dia^{-1} (GLOVER, 1967), sendo que a profundidade máxima é definida pelo usuário. Há uma taxa de morte das raízes ao longo do ciclo, chegando a 17% na colheita (BALL-COELHO et al., 1992).

O balanço hídrico (módulo SoilWat), de carbono e nitrogênio (módulo SoilN) no solo no sistema APSIM é descrito por Probert et al. (1998). A estimação da transpiração baseada no método de Priestley e Taylor (1972). O modelo também permite simular a dinâmica de resíduos como a palha, por exemplo, por meio do módulo SurfaceOM, de acordo com Thorburn et al. (2001).

Como nas áreas avaliadas não se dispunham de dados da quantidade de nitrogênio aplicado, foi admitida uma aplicação de 100 kg N ha^{-1} para áreas de sequeiro e de 150 kg N ha^{-1} para as áreas irrigadas. No caso das condições de sequeiro, a aplicação foi realizada 30 dias após o plantio ou rebrotas. Já para as condições irrigadas, a dose foi parcelada em 75 kg aplicados 30 e 60 dias após plantio ou rebrota. A profundidade de aplicação foi 7,5 cm. A fração da água disponível que pode ser extraída por dia foi arbitrada como sendo 0,1, 0,08, 0,06, 0,04, 0,02 e 0,01 mm dia^{-1} para as camadas 0-30, 30-60, 60-90, 90-120, 120-150 cm ou mais de profundidade do solo, respectivamente (INMAN-BAMBER et al., 2000; APSIM, 2014).

A parametrização original para a cultivar padrão Q117 e as calibrações para as cultivares brasileiras RB86-7515 (MARIN et al., 2013, 2015) e SP80-1842 (COSTA et al., 2014) foram avaliadas. Na Tabela 2.8 são apresentas as descrições dos parâmetros do modelo. Na Tabela 2.9 são apresentados os valores dos parâmetros calibrados por esses autores.

Tabela 2.8 – Parâmetros do modelo APSIM-Sugarcane, suas unidades e descrições

Parâmetro	Unidade	Descrição
leaf_size	cm^2	Área das folhas
leaf_size_no	-	nº da folha
cane_fraction	$t\ t^{-1}$	Fração de partição de colmos (acima do solo)
sucrose_fraction_stalk	$t\ t^{-1}$	Fração de sacarose nos colmos
stress_factor_stalk	-	Fator de estresse no crescimento de colmos
tt_emerg_to_begcane	$^oC\ d^{-1}$	Tempo térmico da emergência ao crescimento da cana
tt_begcane_to_flowering	$^oC\ d^{-1}$	Tempo térmico do crescimento da cana ao florescimento
tt_flowering_to_crop_end	$^oC\ d^{-1}$	Tempo térmico do florescimento ao fim do ciclo
green_leaf_no	folhas $colmo^{-1}$	nº máximo de folhas verdes
tillerf_leaf_size	-	Fator de folha por perfilho
tillerf_leaf_size_no	-	nº do perfilho

Fonte: Keating et al. (1999)

Tabela 2.9 – Parâmetros do modelo APSIM-Sugarcane para a cultivar padrão (Q117) e calibrado para as cultivares brasileiras

Parâmetro	APSIM-Padrão Q117					Costa (2012) SP18-4280				
leaf_size	1500	55000	55000			5000	55000	50000		
leaf_size_no	1	14	20			1	14	20		
cane_fraction	0,7					0,7				
sucrose_fraction_stalk	1	0,55				1	0,55			
stress_factor_stalk	0,2	1				0,2	1			
tt_emerg_to_begcane	1900					1025				
tt_begcane_to_flowering	6000					6000				
tt_flowering_to_crop_end	2000					2000				
green_leaf_no	13					10				
tillerf_leaf_size	1,5	3	2,5	1	1	1,5	3	2,5	1	1
tillerf_leaf_size_no	1	4	10	12	26	1	4	10	12	26
Parâmetro	Marin et al. (2013) RB86-7515					Marin et al. (2015) RB86-7515				
leaf_size	1500	75000	65000			3500	45000	59400	59400	
leaf_size_no	1	14	20			1	5	18	26	
cane_fraction	0.7					0.7				
sucrose_fraction_stalk	1	0,55				1	0,55			
stress_factor_stalk	0,2	1				0,2	1			
tt_emerg_to_begcane	1050					650				
tt_begcane_to_flowering	6000					8000				
tt_flowering_to_crop_end	2000					2000				
green_leaf_no	10					10				
tillerf_leaf_size	1	1	1,5	2	1	2	3	3	2	2
tillerf_leaf_size_no	1	4	10	16	26	1	5	10	18	26

2.1.3 Fator de decaimento da produtividade de colmos entre os cortes

A determinação da produtividade da cana-de-açúcar, além da interação entre os fatores genéticos (planta) e ambientais (clima e solo), é função da intensidade do manejo adotado durante o ciclo da cultura (GARSIDE et al., 1997; BERNARDES et al. 2008; FERRARO et al., 2009; RAMBURAN et al., 2013, GOMATHI et al., 2013). Ramburan et al. (2013) utilizaram o coeficiente angular de uma equação linear simples para explicar o nível de declínio da produtividade de colmos para as condições sul-africanas, contudo, o decaimento exponencial utilizado por Bernardes et al. (2008) se mostrou de melhor ajuste para cultivares brasileiras. Desse modo, para explicar o decaimento da produtividade da cana-de-açúcar ao longo dos sucessivos cortes, ajustou-se a estimação da produtividade por meio de um fator de

decaimento, conforme recomendado por Bernardes et al. (2008) e apresentado na equação a seguir:

$$PR_{nc} = PA_{1c} \times nc^{-k_{dec}} \tag{2.10}$$

em que: PR_{nc} é a produtividade real (condições operacionais) estimada da cultura da cana-de-açúcar para um dado corte, em t ha^{-1}; PA_{1c} é a produtividade do primeiro corte (cana planta), considerada como sendo a atingível, t ha^{-1}; nc é o número do corte; e k_{dec} é o fator de decaimento da produtividade em função do número do corte, incorporando, assim, parte das condições de desenvolvimento e manejo da cultura.

O k_{dec} foi ajustado conforme o decaimento da produtividade entre os sucessivos cortes dos dados disponíveis. A precisão, dada pelo R^2 e a magnitude do erro, dado pelo erro absoluto médio (EAM), foram utilizados para encontrar o melhor k_{dec}. A Figura 2.3 ilustra a situação da queda de produtividade em função do número de cortes para um k_{dec} hipotético.

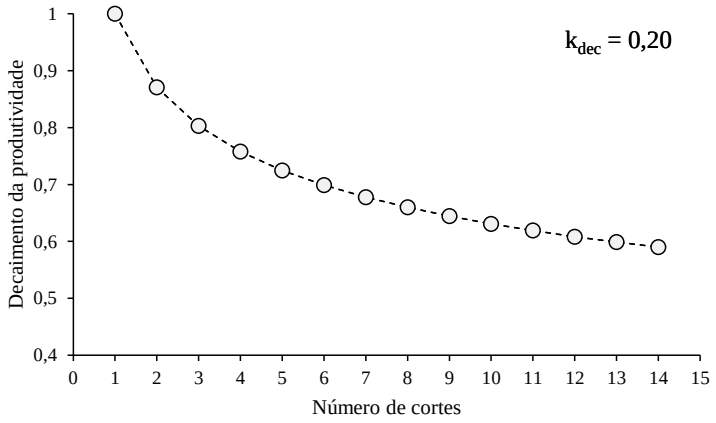


Figura 2.3 – Fator de decaimento da produtividade de colmos em função do manejo e condições de desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, considerando-se um fator de decaimento (k_{dec}) hipotético de 0,20

2.1.4 Desempenhos dos modelos e abordagem multimodelos

Para a avaliação do desempenho dos modelos, foram utilizados dados de produtividade da cana-de-açúcar das safras 2000/2001 a 2013/2014. A divisão dos dados para o ajuste e para a avaliação dos modelos foi feita por safra. Assim, dados das safras 2002/2003, 2004/2005, 2007/2008, 2009/2010, 2011/2012 e 2013/2014 foram utilizados para ajuste dos modelos, enquanto que para a avaliação com dados independentes foram usados dados das safras

2000/2001, 2003/2004, 2005/2006, 2006/2007, 2008/2009, 2010/2011 e 2012/2013. A seleção das safras foi feita de forma aleatória. A Tabela 2.10 apresenta de forma detalhada o número de dados utilizados no processo de ajuste e avaliação dos modelos, sendo que no total, foram usados 43% dos dados para o ajuste e 57% para a avaliação.

Tabela 2.10 – Número de dados de produtividade utilizados no processo de ajuste e avaliação dos modelos de simulação da cultura da cana-de-açúcar, em função da região e do sistema de produção (sequeiro ou irrigado)

Ajuste		Avaliação	
Região e tipo	nº dados	Região e tipo	nº dados
Sudeste	33	Sudeste	33
Irrigado	28	Irrigado	29
Sequeiro	5	Sequeiro	4
Nordeste	49	Nordeste	40
Irrigado	33	Irrigado	34
Sequeiro	16	Sequeiro	6
Centro-Oeste	194	Centro-Oeste	286
Sequeiro	194	Sequeiro	286
Total Sequeiro	215	Total Sequeiro	296
Total Irrigado	61	Total Irrigado	63
Total Geral	276	Total Geral	359

Para avaliar o desempenho dos modelos, foram utilizados os seguintes indicadores estatísticos: Erro médio (EM); raiz quadrada do erro médio (RQEM); erro absoluto médio (EAM) e seu percentual (EAMP); coeficiente de determinação (R^2); índice de concordância ou acurária (d) (WILLMOTT, 1985); índice de eficiência de modelagem (E) (NASH; SUTCLIFFE, 1970); e índice de confiança (C) (CAMARGO E SENTELHAS, 1997). As equações dos indicadores supramencionados são apresentadas a seguir:

$$\mathrm{EM} = \frac{1}{\mathrm{n}} \times \sum_{i=1}^{\mathrm{n}} \left(\mathrm{Est}_i - \mathrm{Obs}_i\right) \tag{2.11}$$

$$\mathrm{RQEM} = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{n}} \times \sum_{i=1}^{\mathrm{n}} \left(\mathrm{Est}_i - \mathrm{Obs}_i\right)^2} \tag{2.12}$$

$$\mathrm{EAM} = \frac{1}{\mathrm{n}} \times \sum_{i=1}^{\mathrm{n}} \left(\left|\mathrm{Est}_i - \mathrm{Obs}_i\right|\right) \tag{2.13}$$

$$\mathrm{EAMP} = \left[\frac{1}{\mathrm{n}} \times \sum_{i=1}^{\mathrm{n}} \left(\frac{\left| \mathrm{Est}_i - \mathrm{Obs}_i \right|}{\mathrm{Obs}_i} \right) \right] \times 100 \tag{2.14}$$

$$\mathrm{R}^2 = \frac{\frac{1}{\mathrm{n}} \mathrm{x} \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \left[\left(\mathrm{Est}_\mathrm{i} - \overline{\mathrm{Obs}} \right) \mathrm{x} \left(\mathrm{Obs}_\mathrm{i} - \overline{\mathrm{Obs}} \right) \right]^2}{\left[\frac{1}{\mathrm{n}} \mathrm{x} \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \left(\mathrm{Est}_\mathrm{i} - \overline{\mathrm{Est}} \right)^2 \right] \mathrm{x} \left[\frac{1}{\mathrm{n}} \mathrm{x} \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \left(\mathrm{Obs}_\mathrm{i} - \overline{\mathrm{Obs}} \right)^2 \right]} \tag{2.15}$$

$$\mathrm{d} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{\mathrm{n}} \left(\mathrm{Est}_i - \mathrm{Obs}_i \right)^2}{\sum_{i=1}^{\mathrm{n}} \left(\left| \mathrm{Est}_i - \overline{\mathrm{Obs}} \right| + \left| \mathrm{Obs}_i - \overline{\mathrm{Obs}} \right| \right)^2} \tag{2.16}$$

$$\mathrm{E} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{\mathrm{n}} \left(\mathrm{Est}_i - \mathrm{Obs}_i \right)^2}{\sum_{i=1}^{\mathrm{n}} \left(\mathrm{Obs}_i - \overline{\mathrm{Obs}} \right)^2} \tag{2.17}$$

$$\mathrm{C} = \sqrt{\mathrm{R}^2} \ \mathrm{x} \ \mathrm{d} \tag{2.18}$$

em que: Est_i e Obs_i são respectivamente as produtividades de colmos estimada e observada, em t ha^{-1}; $\overline{\mathrm{Est}}$ e $\overline{\mathrm{Obs}}$ são respectivamente as médias das produtividades de colmos estimada e observada, em t ha^{-1}; n é o número de observações.

Além da avaliação dos modelos separadamente, foi realizada uma análise estatística onde o dado simulado foi composto pela média dos três modelos (MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane). Essa abordagem é conhecida como *Ensemble* e vem sendo recomendada por para minimizar as incertezas das estimativas da produtividade em relação aos valores observados a campo (ASSENG et al., 2013). Nesta etapa, os valores simulados pelos três modelos já levaram em consideração o k_{dec} e os mesmos indicadores estatísticos apresentados acima foram empregados para avaliar o desempenho dessa abordagem.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Fator de decaimento da produtividade da cana-de-açúcar (k_{dec})

A Figura 2.11 apresenta os valores de k_{dec} obtidos para os dados utilizados no ajuste e avaliação dos modelos. No geral, a precisão e o erro entre a equação de decaimento e os dados

observados foram satisfatórios. Os valores variaram entre 0,10 (manejo ótimo) e 0,35 (manejo deficitário). Considerando todos os locais, a média do k_{dec} foi 0,22.

Tabela 2.11 – Fator de decaimento da produtividade entre os sucessivos cortes (k_{dec}) da cultura da cana-de-açúcar para as áreas de estudo e coeficiente de determinação (R^2) e erro absoluto médio (EAM, t ha^{-1}) entre o ajuste da equação de decaimento e dados observados

Local	k_{dec}	R^2	EAM (t ha^{-1})
Piracicaba, SP	0,23	0,94	10,32
Catanduva, SP	0,12	0,66	13,43
Igaraçu do Tietê, SP	0,25	0,90	7,62
Mineiros do Tietê, SP	0,21	0,88	6,50
Taquaritinga, SP	0,25	0,82	10,41
Iturama, MG	0,26	0,74	8,80
Jaíba, MG	0,35	0,99	2,58
Bom Jesus de Goiás, GO	0,21	0,94	2,04
Maracaju, MS	0,13	0,64	3,13
Capim, PB	0,30	0,99	0,94
Campo Alegre, AL	0,15	0,75	7,30
Teotonio Vilela, AL	0,10	0,45	6,73
Juazeiro, BA	0,27	0,90	6,08

2.3.2 Ajuste e avaliação dos modelos de simulação da cultura da cana-de-açúcar

2.3.2.1 Modelo MZA-FAO

Foram realizadas três etapas para ajuste do modelo MZA-FAO. Primeiramente, avaliou-se o modelo com o ky original (Tabela 2.3). Em seguida foi realizada a calibração do ky (Tabela 2.12). Por fim, foi introduzido o k_{dec} com intuito de verificar a influência desse coeficiente no desempenho do modelo. O desempenho do modelo original foi o pior, com EAM superior a 45 t ha^{-1} (Figura 2.4a). Vale ressaltar que esse modelo foi originalmente desenvolvido e vem sendo utilizado, no caso da cultura da cana-de-açúcar, para cálculos em escalas de tempo maiores, como decendial e mensal, porém, neste estudo foi empregado um passo de cálculo diário. A diferença dos valores ajustados em relação aos originais se deve ao fato do modelo ter sido adaptado para os cálculos na escala diária, onde o déficit hídrico é maior, e pelo fato da fase de grande crescimento (elongação dos colmos) ser mais sensível ao déficit hídrico do que as demais fases fenológicas, de acordo com Robertson et al. (1999) e Inman-Bamber e Smith (2005). Com a calibração dos valores de ky para serem empregados na escala diária, onde maior importância é dada para fases de desenvolvimento com dossel

mais desenvolvido, foi possível reduzir substancialmente o erro do modelo (EAM < 30 t ha^{-1}) e aumentar sua acurácia (d = 0,72) e precisão (R^2 = 0,53) (Figura 2.4b). Quando, além do ky calibrado, foi empregado também o k_{dec}, o desempenho do modelo MZA-FAO aumentou expressivamente, resultando em alta acurácia (d = 0,91) e boa precisão (R^2 = 0,70), com EAM inferior a 13 t ha^{-1} (Figura 2.4c). A calibração do ky e a inclusão do k_{dec} possibilitaram também a elevação da concordância, com C subindo de 0,15 para 0,77, e a eficiência, com E passando de -0,02 para 0,66. Na avaliação com dados independentes, o desempenho do modelo MZA-FAO foi similar ao processo de ajuste (Figura 2.5), com boa acurácia (d = 0,89), boa precisão (R^2 = 0,72) e EAM da ordem de 14 t ha^{-1}, resultando em C = 0,72 e E = 0,64. Em ambos os processos, ajuste e avaliação com dados independentes, o EAMP foi inferior a 18%.

Tabela 2.12 – Coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (ky) original e calibrado para as diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar

Fase de desenvolvimento	ky original	ky calibrado
1 - Do plantio até 25% de cobertura	0,75	0,10
2 - De 25-50% de cobertura	0,75	0,10
3 - De 50-75% de cobertura	0,50	0,15
4 - De 75% à cobertura plena	0,50	0,30
5 - Máximo crescimento	0,50	0,77
6 - Senescência	0,50	0,40
7 - Maturação	0,10	0,05

Os resultados encontrados no presente estudo apresentaram acurácia e precisão similares aos simulados com o modelo MZA-FAO por Oliveira et al. (2012), no estado Minas Gerais, por Monteiro e Sentelhas (2014), no estado de São Paulo, e Dias et al. (2015), no estado de Goiás, embora os valores de RQEM tenham sido ligeiramente superiores aos referidos trabalhos, os quais reportam valores inferiores a 10 t ha^{-1}. Todavia, a variabilidade de locais e condições de manejo nos dados utilizados no presente estudo é expressivamente maior do que os obtidos pelos referidos autores. Já Monteiro et al. (2015), utilizando uma base similar de dados, encontraram resultados bem próximos aos obtidos neste estudo, porém com menor número de dados e cálculo na escala decendial.

Mesmo sendo relativamente simples, o modelo MZA-FAO, quando adequadamente calibrado e com o uso do k_{dec}, foi capaz de explicar satisfatoriamente a produtividade de colmos da cana-de-açúcar em diferentes tipos de clima, solo, tipo de cultura (planta ou soca), manejo e sistema de produção (sequeiro ou irrigado).

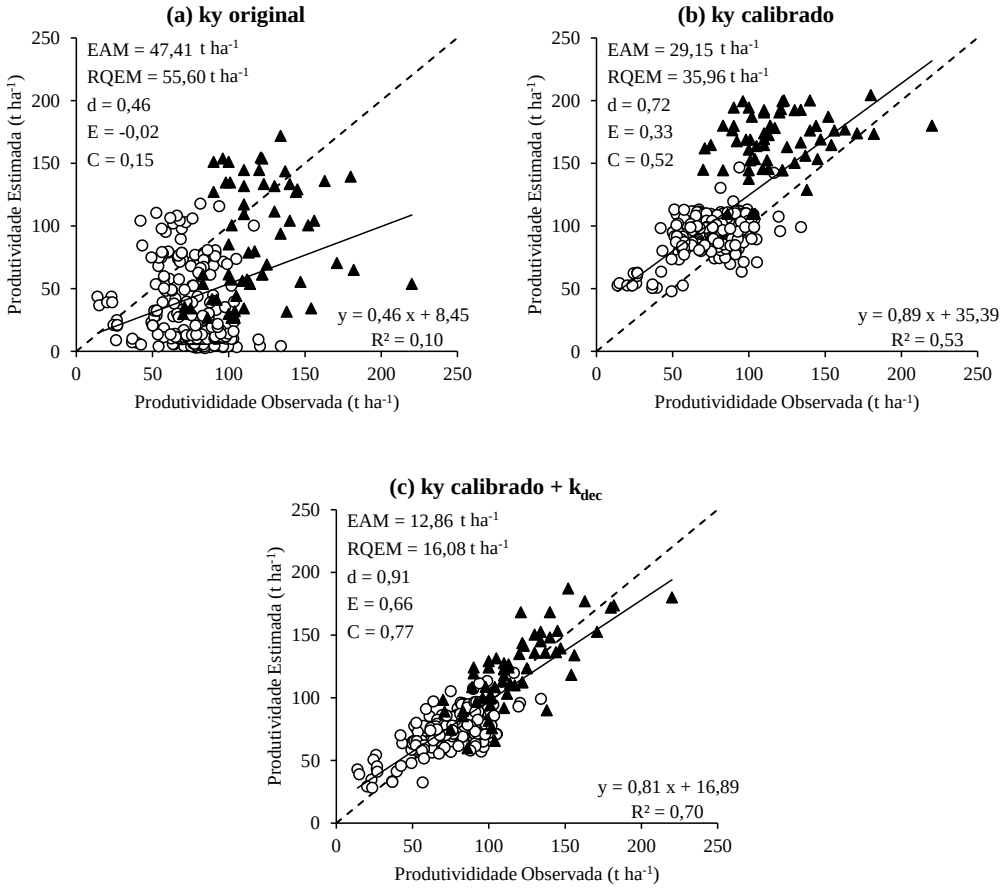


Figura 2.4 – Relação entre a produtividade de colmos da cana-de-açúcar observada e estimada conforme a evolução no processo de ajuste do modelo MZA-FAO. Modelo com ky original (a), com calibração dos valores de ky (b) e com calibração dos valores de ky e introdução do fator de decaimento da produtividade (k_{dec}) (c). Dados provenientes da cultura em condições de sequeiro (○) e irrigada (▲)

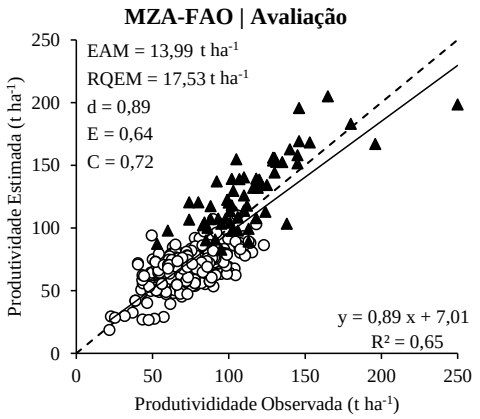


Figura 2.5 – Relação entre a produtividade de colmos da cana-de-açúcar observada e estimada no processo de avaliação (dados independentes) do modelo MZA-FAO com ky calibrado e fator de decaimento da produtividade (k_{dec}). Dados provenientes da cultura em condições de sequeiro (○) e irrigada (▲)

2.3.2.2 Modelo DSSAT/CANEGRO

A avaliação da parametrização para a cultivar padrão do modelo DSSAT/CANEGRO (NCo376) e para as calibrações existentes para diferentes cultivares brasileiras de cana-de-açúcar são apresentadas na Tabela 2.13. Em geral, todas apresentam erros consideráveis e baixa precisão, embora algumas calibrações tenham apresentado boa acurácia (d > 0,70). Isso ocorreu devido ao fato do modelo não considerar aspectos de manejo, o qual culmina no declínio da produtividade entre os cortes. Quando se introduziu o k_{dec} nos valores simulados, os desempenhos de todas as calibrações melhoram expressivamente, sendo que, na maioria dos casos, os EAMs ficaram abaixo de 20 t ha^{-1}.

Tabela 2.13 – Desempenho do modelo DSSAT/CANEGRO para a estimação da produtividade de colmos da cana-de-açúcar com a parametrização da cultivar padrão (NCo376) e para diferentes calibrações para cultivares brasileiras, com e sem o fator de decaimento de produtividade (k_{dec})

Cultivar	Referência	EM	RQEM	EAM	EAMP	d	R^2	E	C
		(t ha^{-1})			(%)				
		sem k_{dec}							
NCo376	Singels et al. (2008)	11,93	24,32	19,48	26,40	0,79	0,48	0,21	0,55
RB72-454	Marin et al. (2011)	49,66	55,50	50,37	68,38	0,55	0,48	0,14	0,38
SP83-2847	Marin et al. (2011)	47,50	53,48	48,34	65,82	0,56	0,47	0,14	0,38
RB92-579	Silva (2012)	37,57	47,22	39,41	51,35	0,64	0,49	0,26	0,45
RB86-7515	Nassif et al. (2012)	37,55	43,10	38,94	54,40	0,63	0,52	0,15	0,45
RB86-7515	Marin et al. (2013)	19,21	28,85	24,08	33,04	0,75	0,49	0,22	0,52
RB86-7515	Marin et al. (2015)	19,07	28,12	23,52	32,50	0,76	0,52	0,25	0,55
Diversas	Vianna e Sentelhas (2015)	30,82	36,99	32,69	45,73	0,68	0,53	0,18	0,50
		com k_{dec}							
NCo376	Singels et al. (2008)	-12,33	20,89	15,54	17,63	0,82	0,67	0,22	0,67
RB72-454	Marin et al. (2011)	16,19	25,11	20,64	28,30	0,82	0,60	0,42	0,63
SP83-2847	Marin et al. (2011)	37,57	47,22	39,41	51,35	0,64	0,49	0,26	0,45
RB92-579	Silva (2012)	6,95	20,38	16,52	21,60	0,88	0,65	0,62	0,71
RB86-7515	Nassif et al. (2012)	6,92	17,61	14,46	20,10	0,88	0,68	0,49	0,73
RB86-7515	Marin et al. (2013)	-6,79	18,33	13,96	16,71	0,86	0,65	0,36	0,69
RB86-7515	Marin et al. (2015)	-7,01	17,10	12,74	15,13	0,88	0,71	0,43	0,74
Diversas	Vianna e Sentelhas (2015)	1,86	15,75	12,60	16,83	0,90	0,70	0,52	0,76

Os parâmetros ajustados do modelo DSSAT/CANEGRO podem ser encontrados na Tabela 2.14. A tentativa de ajuste dos modelos para os dados do projeto resultou numa pequena melhoria nos indicadores estatísticos, revelando que as adaptações para as cultivares brasileiras foram satisfatórias. O EAM ficou abaixo de 13 t ha^{-1} e houve pouca melhoria na

precisão e acurácia (Figura 2.6). No processo de avaliação do modelo com dados independentes (Figura 2.7), os indicadores estatísticos foram similares aos do processo de ajuste.

Tabela 2.14 – Valores dos parâmetros do modelo DSSAT/CANEGRO ajustados para os dados do estudo

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
PARCEmax	10,5	Pl1	89
APFMX	0,92	Pl2	107
STKPFMAX	0,68	PSWITCH	18
SUCA	0,58	MAX_POP	18
TBFT	25	POPTT16	12
Tthalfo	250	TTPLNTEM	208
Tbase	16	TTRATNEM	120
LFMAX	10	CHUPIBASE	448
MXLFAREA	550	TT_POPGROWTH	628
MXLFARNO	22	LG_AMBASE	220

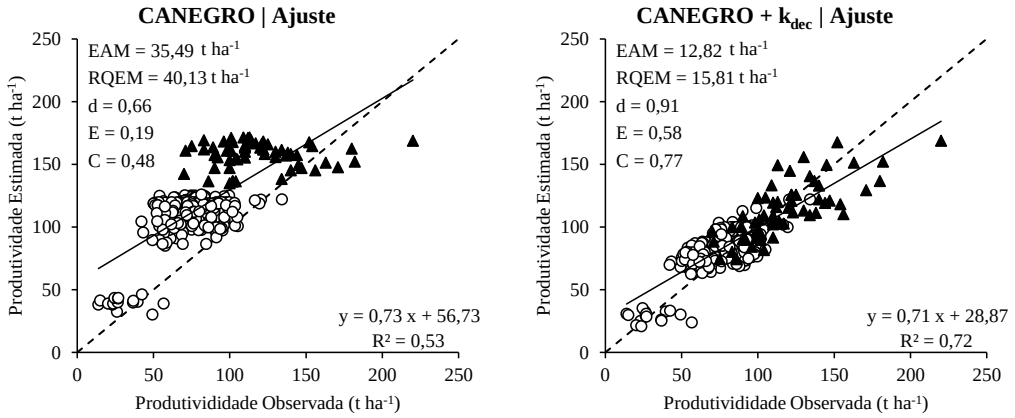


Figura 2.6 – Relação entre a produtividade de colmos da cana-de-açúcar observada e estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO, sem e com o fator de decaimento de produtividade (k_{dec}), durante o processo de ajuste do modelo. Dados provenientes da cultura em condições de sequeiro (○) e irrigada (▲)

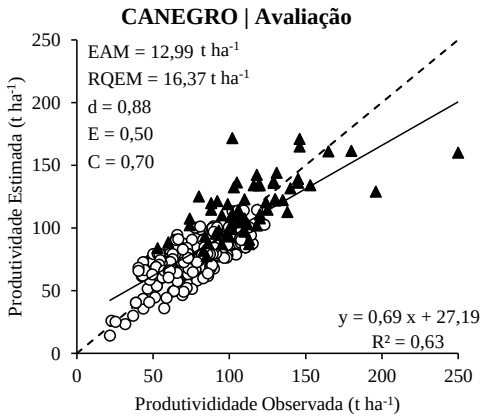


Figura 2.7 – Relação entre a produtividade de colmos da cana-de-açúcar observada e estimada pelo modelo DSSAT/CANEGRO para o processo de avaliação com dados independentes. Dados provenientes da cultura em condições de sequeiro (○) e irrigada (▲)

Os resultados encontrados são similares a estudos utilizando o modelo DSSAT/CANEGRO para a produtividade de colmos nas condições agroclimáticas brasileiras (NASSIF et al., 2012; MARIN et al., 2013, 2015; VIANNA; SENTELHAS, 2015) em termos de precisão e acurácia. Entretanto, os valores RQEMs são menores ou semelhantes. Singels et al. (2010) obtiveram RQEM de 29,8 t ha^{-1} para simulações com o DSSAT/CANEGRO para diversas cultivares em experimento conduzido nas condições de Piracicaba, SP. Os valores de RQEM encontrados neste estudo também são menores ou semelhantes aos que foram obtidos para diversas cultivares conduzidas na África do Sul, Austrália, Zimbábue e Tailândia a partir simulações realizadas pelo DSSAT/CANEGRO (SINGELS et al., 2010). Para diversas cultivares indianas em condições experimentais, o modelo DSSAT/CANEGRO conseguiu explicar 77% da produtividade de colmos (SINGH et al., 2010), ligeiramente superior aos 72% obtido no presente estudo.

Um aspecto que vale ser ressaltado é que o modelo DSSAT/CANEGRO não conseguiu simular produtividades elevadas (acima de 180 t ha^{-1}). Uma das razões pode ser que a equação de respiração de manutenção esteja superestimando o gasto energético proveniente do metabolismo da cultura, fazendo com que não se acumule muita massa seca, conforme apontado por Singels et al. (2014). A eficiência do uso da PAR também pode estar subestimada para cultivares brasileiras, uma vez que o valor do parâmetro PARCEmax calibrado nos estudos de Marin et al. (2011) e Nassif et al. (2012) foi superior ao limite recomendado por Singels et al. (2008). Além desses, outro aspecto que pode estar contribuindo para uma menor produtividade simulada é o fato da população máxima de

colmos ser baixa para a cultivar RB86-7515. Oliveira et al. (2010) encontraram valores máximos próximos a 23 a 25 colmos m^{-1} e pouco superior a 10 colmos m^{-1} no final do ciclo para a cultivar RB86-7515 conduzida sob irrigação plena em Carpina, PE. Neste estudo, a população máxima (parâmetro MAXPOP) de colmos foi alterada de 12-16 para 18 colmos m^{-1} e a população na parte final do ciclo (parâmetro POPTT16) de 10 para 12 colmos m^{-1}, visando melhorar o ajuste entre os dados simulados e observados e a produtividade potencial.

2.3.2.3 Modelo APSIM-Sugarcane

A avaliação da parametrização para a cultivar padrão de cana-de-açúcar do modelo APSIM-Sugarcane (Q117) e para as calibrações existentes para duas cultivares brasileiras são apresentadas na Tabela 2.15. De modo geral, todas as calibrações avaliadas apresentam erros consideráveis e baixa precisão, embora algumas calibrações tenham apresentado razoável acurácia com índice d igual a 0,65 para a cultivar padrão e superior a 0,70 para as cultivares brasileiras. A única exceção é a calibração para cultivar RB86-7515 de Marin et al. (2015) que apresenta EAM inferior a 15,5 t ha^{-1}, que, no entanto, apresentou baixa precisão (R^2 = 0,50) e as produtividades, mesmo em situações bem supridas de água e nitrogênio, não ultrapassaram 143 t ha^{-1} (dados não apresentados). Assim como demais modelos, o uso do k_{dec} propiciou melhoria expressiva nos desempenhos de todas as calibrações, sendo que na maioria dos casos o EAM foi inferior a 16 t ha^{-1}, com exceção da calibração para a cultivar RB86-7515 de Marin et al. (2015), para a qual o uso do k_{dec} piorou o desempenho.

Tabela 2.15 – Desempenho do modelo APSIM-Sugarcane para a estimação da produtividade de colmos da cana-de-açúcar com as parametrizações da cultivar padrão (Q117) e para calibrações para duas cultivares brasileiras, com e sem o fator de decaimento de produtividade (k_{dec})

Cultivar	Referência	EM	RQEM	EAM	EAMP	d	R²	E	C
		(t ha^{-1})			(%)				
				sem k_{dec}					
Q117	Padrão APSIM	29,65	40,55	33,62	46,09	0,65	0,39	0,20	0,41
RB86-7515	Marin et al. (2013)	20,09	29,31	24,73	35,12	0,73	0,47	0,15	0,51
RB86-7515	Marin et al. (2015)	0,67	20,45	15,43	20,01	0,82	0,50	0,17	0,58
SP80-1842	Costa et al. (2014)	19,27	28,93	24,36	34,55	0,73	0,46	0,12	0,50
				com k_{dec}					
Q117	Padrão APSIM)	2,42	19,64	15,93	20,37	0,87	0,59	0,53	0,67
RB86-7515	Marin et al. (2013)	-4,62	17,59	13,08	15,90	0,87	0,65	0,40	0,70
RB86-7515	Marin et al. (2015)	-18,95	26,26	21,24	24,27	0,75	0,60	0,14	0,58
SP80-1842	Costa et al. (2014)	-5,25	17,87	13,22	15,95	0,87	0,65	0,37	0,70

Os parâmetros ajustados para o modelo APSIM-Sugarcane podem ser encontrados na Tabela 2.16. A tentativa de ajuste dos modelos para os dados deste estudo resultou numa pequena melhoria nos indicadores estatísticos, revelando que as adaptações para as cultivares brasileiras foram satisfatórias. O EAM ficou abaixo de 13 t ha^{-1} e houve uma leve melhoria na precisão e acurácia do modelo em estimar a produtividade (Figura 2.8). No processo de avaliação do modelo com dados independentes (Figura 2.9), os indicadores estatísticos foram relativamente piores ao processo de ajuste, mas ainda com desempenho satisfatório.

Tabela 2.16 – Valores dos parâmetros do modelo APSIM-Sugarcane ajustados para os dados do estudo

Parâmetro	Valores				
leaf_size	1500	55000	50000		
leaf_size_no	1	14	20		
cane_fraction	0,72				
sucrose_fraction_stalk	1	0,55			
stress_factor_stalk	0,2	1			
tt_emerg_to_begcane	1025				
tt_begcane_to_flowering	6000				
tt_flowering_to_crop_end	2000				
green_leaf_no	12				
tillerf_leaf_size	1,5	3	2.5	1,5	1
tillerf_leaf_size_no	1	4	10	12	26

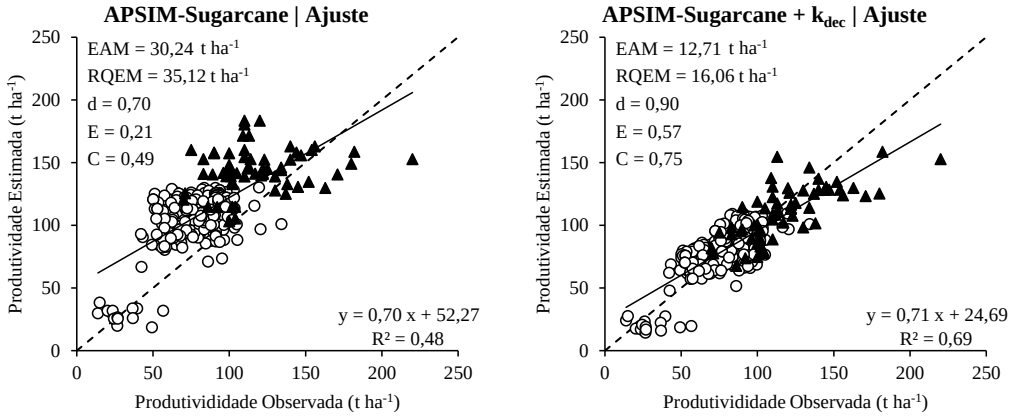


Figura 2.8 – Relação entre a produtividade de colmos da cana-de-açúcar observada e estimada pelo modelo APSIM-Sugarcane, sem e com o fator de decaimento de produtividade (k_{dec}), durante o processo de ajuste do modelo. Dados provenientes da cultura em condições de sequeiro (○) e irrigada (▲)

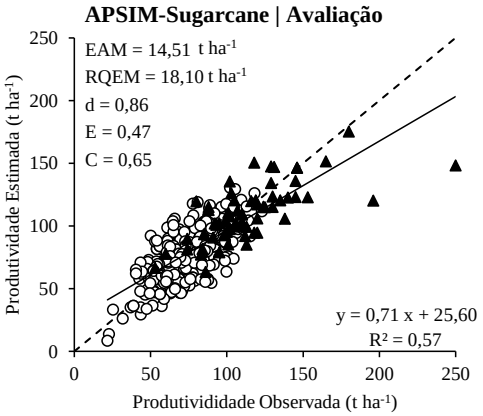


Figura 2.9 – Relação entre a produtividade de colmos da cana-de-açúcar observada e estimada pelo modelo APSIM-Sugarcane para o processo de avaliação, com dados independentes. Dados provenientes da cultura em condições de sequeiro (○) e irrigada (▲)

Os valores de RQEM para a estimativa da produtividade com o modelo APSIM-Sugarcane foram similares ou menores aos encontrados em estudos utilizando esse modelo APSIM-Sugarcane para as condições agroclimáticas brasileiras (MARIN et al., 2013, 2015; COSTA et al., 2014), porém, a precisão e a acurácia foram ligeiramente inferiores (Tabela 2.15 e Figura 2.9). A diferença no desempenho pode ser explicada em razão da natureza dos dados, onde no presente estudo estes são provenientes de condições operacionais, enquanto que os reportados na literatura são de condições experimentais, onde há menor variabilidade devido a fatores de ambiente e de manejo. Porém, a precisão do APSIM-Sugarcane em estimar a produtividade de colmos no processo de ajuste (R^2 = 0,69) foi próxima da encontrada por Keating et al. (1999) no desenvolvimento do modelo (R^2 = 0,72). Segundo Costa et al. (2014), um fator que contribui para o desempenho do modelo APSIM-Sugarcane nas condições brasileiras é o cômputo da umidade dos colmos, o qual pode não ser adequado para as cultivares, já que o desempenho do modelo na simulação da produtividade de colmos em massa fresca não foi equiparável ao de massa seca.

2.3.3 Avaliação da abordagem multimodelos

A Tabela 2.17 apresenta o desempenho dos modelos de simulação da cultura da cana-de-açúcar para estimar a produtividade desta, considerando-se cada modelo individualmente e, também, a combinação desses, sob a abordagem multimodelos, nas fases de ajuste e de avaliação com dados independentes. É possível observar que a abordagem

multimodelos propiciou uma melhoria no desempenho da estimação da produtividade de colmos, tanto na fase de ajuste como na de avaliação com dados independentes, com a RQEM e o EAM sendo minimizados e a acurácia (d) e, principalmente, a precisão (R^2) sendo incrementadas. A RQEM ficou abaixo ou igual aos valores obtidos por trabalhos para as condições experimentais brasileiras com os modelos DSSAT/CANEGRO (NASSIF et al., 2012; MARIN et al., 2011, 2013, 2015), APSIM-Sugarcane (MARIN et al., 2013, 2015; COSTA et al., 2014), SWAP-WOFOST (SCARPARE, 2011) e STC (MARIN, 2014). Marin (2014) observou resultado similar ao estimar a produtividade de colmos para diversas localidades brasileiras com a combinação dos modelos CANEGRO, APSIM-Sugarcane e STC, obtendo RQEM menor que 11 t ha^{-1}. Marin et al. (2015) em estudo comparando os modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane encontraram RQEM = 18 t ha^{-1} para produtividade de colmos utilizando os dois modelos em conjunto para condições experimentais em diversas localidades brasileiras.

Apesar das várias fontes de incerteza neste estudo, como da estrutura dos modelos (algoritmos, número de parâmetros, etc), variabilidade das condições edafoclimáticas, diversas cultivares, épocas de plantio/rebrota, tratos culturais, entre outros, o desempenho dos modelos foi satisfatório. Entretanto, quando os modelos são usados de forma conjunta, o desempenho em simular a produtividade de colmos melhorou ainda mais, minimizando as incertezas das simulações.

Tabela 2.17 – Desempenho dos modelos MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane separadamente e em conjunto (multimodelos), com uso do k_{dec}, para a estimação da produtividade da cana-de-açúcar durante o processo de ajuste e avaliação com dados independentes

Modelo	EM	RQEM	EAM	EAMP	d	R²	E	C
		(t ha^{-1})		(%)				
				Ajuste				
MZA-FAO	0,56	16,08	12,86	17,82	0,91	0,70	0,66	0,77
DSSAT/CANEGRO	4,19	15,81	12,82	17,46	0,91	0,72	0,58	0,77
APSIM-Sugarcane	0,21	16,06	12,71	16,71	0,90	0,69	0,57	0,75
Multimodelos	1,66	14,34	11,52	15,64	0,92	0,75	0,66	0,80
				Avaliação				
MZA-FAO	-1,77	17,53	13,99	17,84	0,89	0,65	0,64	0,72
DSSAT/CANEGRO	2,74	16,37	12,99	17,84	0,88	0,63	0,50	0,70
APSIM-Sugarcane	0,48	16,01	12,56	16,85	0,88	0,64	0,48	0,70
Multimodelos	1,15	15,63	12,41	16,80	0,90	0,67	0,60	0,73

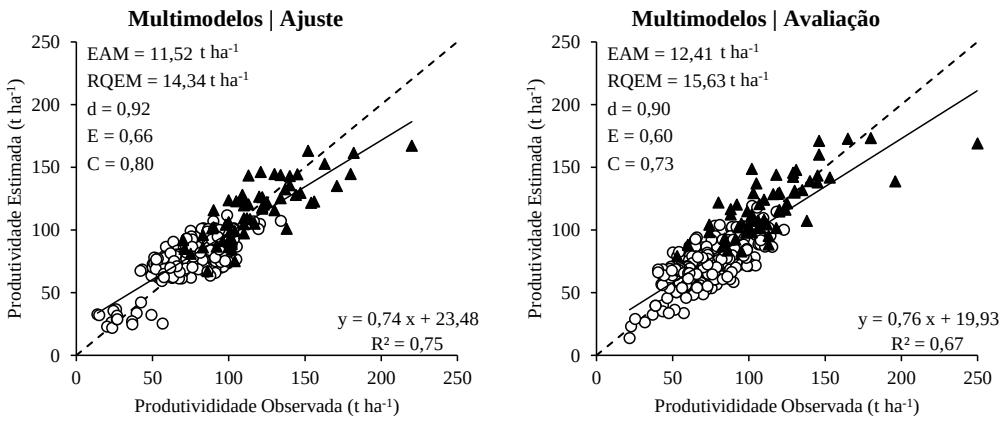


Figura 2.10 – Relação entre a produtividade de colmos da cana-de-açúcar observada e estimada pela combinação dos modelos MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane (multimodelos), com fator de decaimento de produtividade (k_{dec}), para os processos de ajuste dos modelos e avaliação desses com dados independentes. Dados provenientes da cultura em condições de sequeiro (○) e irrigada (▲)

2.4 Conclusões

O modelo MZA-FAO apresentou desempenho satisfatório na escala de cálculo diária, sendo a calibração do coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (ky) fundamental na adaptação do modelo.

A introdução do fator de decaimento da produtividade de colmos ao longo dos sucessivos cortes da cana-de-açúcar (k_{dec}) propiciou melhoria no desempenho de todos os modelos quando avaliados em condições operacionais, com EAMs inferiores a 15 t ha^{-1}, independentemente do nível de complexidade deles.

A abordagem multimodelos, ou seja, a combinação dos modelos MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane, propiciou melhoria no desempenho das simulações da produtividade de colmos de cana-de-açúcar em condições operacionais, minimizando as incertezas relativas a cada um deles, sendo recomendada tal abordagem em estudos agroclimáticos.

Referências

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 291p. (FAO. Irrigation Drainage and Paper, 56).

APSIM. **The Agricultural Production Systems Simulator (APSIM)**. Disponível em: <https://www.apsim.info/Documentation/Model,CropandSoil/CropModuleDocumentation/Plant.aspx>. Acesso em: 9 Jun. 2014.

ASSENG, S.; EWERT, F.; ROSENZWEIG, C.; JONES, J.W.; HATFIELD, J.L.; RUANE, A.C.; BOOTE, K.J.; THORBURN, P.J.; ROTTER, R.P.; CAMMARANO, D.; BRISSON, N.; BASSO, B.; MARTRE, P.; AGGARWAL, P.K.; ANGULO, C.; BERTUZZI, P.; BIERNATH, C.; CHALLINOR, A.J.; DOLTRA, J.; GAYLER, S.; GOLDBERG, R.; GRANT, R.; HENG, L.; HOOKER, J.; HUNT, L.A.; INGWERSEN, J.; IZAURRALDE, R.C.; KERSEBAUM, K.C.; MULLER, C.; KUMAR, S.N.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.; OLESEN, J.E.; OSBORNE, T.M.; PALOSUO, T.; PRIESACK, E.; RIPOCHE, D.; SEMENOV, M.A.; SHCHERBACK, I.; STEDUTO, P.; STOCKLE, C.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; TRAVASSO, M.; WAHA, K.; WALLACH, D.; WHITE, J.W.; WILLIAMS, J.R.; WOLF, J. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, London, v. 3, p. 827-832, 2013.

BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E.V.S.B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugarcane. **Plant and Soil**, The Hague, v. 142, p. 297-305, 1992.

BASSU, S.; BRISSON, N.; DURAND, J.L.; BOOTE, K.; LIZASO, J.; JONES, J.W.; ROSENZWEIG, C.; RUANE, A.C.; ADAM, M.; BARON, C.; BASSO, B.; BIERNATH, C.; BOOGAARD, H.; CONIJN, S.; CORBEELS, M.; DERYNG, D.; DE SANCTIS, G.; GAYLER, S.; GRASSINI, P.; HATFIELD, J.; HOEK, S.; IZAURRALDE, C.; JONGSCHAAP, R.; KEMANIAN, A.; KERSEBAUM, K.C.; KUMAR, N.; MAKOWSKI, D.; MÜLLER, C.; NENDEL, C.; PRIESACK, E.; PRAVIA, M.V.; SOO HYUNG, K.; SAU, F.; SHCHERBAK, I.; TAO, F.; TEIXEIRA, E.; TIMLIN, D.; WAHA, K. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? **Global Change Biology**, Oxford, v. 20, n. 7, p. 2301-2320, 2014.

BATJES, N.H. **A homogenized soil data file for global environmental research:** a subset of FAO, ISRIC and NRCS profiles (Version 1.0). Working Paper and Preprint 95/10b. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen, The Netherlands, 1995.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C. Comparison of five soybean crop growth models for yield estimation in southern Brazil. In: INTERNATIONAL CROP MODELLING SYMPOSIUM, 2016, Berlin. **Proceedings…** 2016, p. 198-199, 435p.

BERNARDES, M.S.; PRELLWITZ, W.P.V.; BRAGA JUNIOR, R.L. do C.; SUGUITANI, C.; BEUCLAIR, E.G.F. de; CÂMARA, G.M. de S. Equação para estimativa de produtividade dos sucessivos cortes associada ao ambiente de produção e manejo da cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 9., 2008, Maceió. **Anais...**, Piracicaba: STAB, 2008. 906p.

BEZUIDENHOUT, C.N.; SINGELS, A. Operational forecasting of South African sugarcane production: Part 2 - System evaluation. **Agricultural Systems**, Essex, v. 92, p. 39-51, 2007.

BOCCA, F.F.; RODRIGUES, L.H.A.; ARRAES, N.A.M. When do I want to know and why? Different demands on sugarcane yield predictions. **Agricultural Systems**, Essex, v. 135, p. 48-56, 2015.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SD.22 - Goiás, SD.23 - Brasília, SE.22 - Goiânia. (Levantamento de Recursos Naturais, 25, 29, 31). Rio de Janeiro. 1981.

CAMARGO, A.P; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

COSTA, L.G.; MARIN, F.R.; NASSIF, D.S.P.; PINTO, H.M.S.; LOPES-ASSAD, M.L.R.C. Simulação do efeito do manejo da palha e do nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 5, p. 469-474, 2014.

DIAS, H.B.; SCARPARE, F.R.; SENTELHAS, P.C.; MONTEIRO, L.A. Cana-de-açúcar nas microrregiões do Sudoeste de Goiás e de Quirinópolis, GO - I: Caracterização edafoclimática e produtividade de colmos sob condições de sequeiro e irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 19., 2015, Lavras. **Anais**… Lavras, 2015, 2517p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 139p. (Irrigation and Drainage paper, 33).

DRIESSEN, P.M.; KONIJN, N.T. **Land-use system analysis**. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1992. 230p.

EVERINGHAM, Y.L; Smyth, C.W.; INMAN-BAMBER, N.G. Ensemble data mining approaches to forecast regional sugarcane crop production. **Agricultural and Foresty Meteorology**, Amsterdam, v. 149, p. 689-696, 2009.

FERRARO, D.O.; RIVERO, D.E.; GHERSA, C.M. An analysis of the factors that influence sugarcane yield in Northern Argentina using classification and regression trees. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 112, p. 149-157, 2009.

FERREIRA JUNIOR, R.A.; SOUZA; J.L. de; ESCOBEDO, J.F.; TEORODO, I.; LYRA, G.B.; NETO, R.A. de A. Cana-de-açúcar com irrigação por gotejamento em dois espaçamentos entrelinhas de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 8, p. 798-804, 2014.

FLEISHER, D.H.; CONDORI, B.; QUIROZ, R.; ALVA, A.; ASSENG, S.; BARREDA, C.; BINDI, M.; BOOTE, K.J.; FERRISE, R.; FRANKE, A.C.; GOVINDAKRISHNAN, P.M.; HARAHAGAZWE, D.; HOOGENBOOM, G.; NARESH KUMAR, S.; MERANTE, P.; NENDEL, C.; OLESEN, J.E.; PARKER, P.S.; RAES, D.; RAYMUNDO, R.; RUANE, A.C.; STOCKLE, C.; SUPIT, I.; VANUYTRECHT, E.; WOLF, J.; WOLI, P. A Potato Model Inter-comparison Across Varying Climates and Productivity Levels. **Global Change Biology**, Oxford, DOI: 10.1111/gcb.13411, 2016.

GARSIDE, A.L.; SMITH, M.A.; CHAPMAN, L.S.; HURNEY, A.P.; MAGAREY, R.C. The yield plateau in the Australian sugar industry: 1970–1990. In: Keating, B.A.; Wilson, J.R. **Intensive Sugarcane Production**: Meeting the Challenges Beyond. 1997. 531p.

GIJSMAN, A.J.; THORNTON, P.K.; HOOGENBOOM, G. Using the WISE database to parameterize soil inputs for crop simulation models. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 56, p. 85–100, 2007.

GLOVER, J. The simultaneous growth of sugarcane roots and tops in relation to soil and climate. **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**, Mount Edgecombe, p. 143-159, 1967.

GOMATHI, R.; RAO, P.N.G.; RAKKYAPPAN, P.; SUNDARA, B.P.; SHIYAMALA, S. Physiological studies on ratoonability of sugarcane varieties under tropical indian condition. **American Journal of Plant Sciences**, v. 4, p. 274-281, 2013.

GOUVÊA, J.R.F.; SENTELHAS, P.C.; GAZZOLA, S.T.; SANTOS, M.C. Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical Southern Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 593-605, 2009.

INMAN-BAMBER, N.G. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal of Plant and Soil**, Mount Edgecombe, v. 8, n. 2, p. 93-99, 1991.

_____. Effect of age and season on components of yield of sugarcane in South Africa. **Proceedings of International Sugar Technologists Association**, Mount Edgecombe, v. 68, p. 23–27, 1994b.

_____. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 36, p. 41-51, 1994a.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 185-202, 2005.

INMAN-BAMBER, N.G.; ZUND, P.R.; MUCHOW, R.C. Water use efficiency and soil water availability for sugarcane. **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**, Mount Edgecombe, v. 22, p. 264-269, 2000.

JONES C.A.; KINIRY J.R. (Ed.). **Ceres-Maize**: a simulation model of maize growth and development College Station. Texas, A & M University, 1986. 194p.

JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, London, v. 18, p. 235-265, 2003.

KEATING, B.A.; CARBERRY, P.S.; HAMMER, G.L.;, PROBERT, M.E.; ROBERTSON, M.J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N.I.; HARGREAVES, J.N.G.; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; MCLEAN, G.; VERBURG, S. SNOW, V.; DIMES, J.P.; SILBURN, M.; WANG, E; BROWN, S.; BRISTOW, K.L.; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; MCCOWN, R.L.; FREEBAIRN, D.M.; SMITH, C.J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, London, v. 18, p. 267-288, 2003.

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

LI, T.; HASEGAWA, T.; YIN, T.; ZHU, Y.; BOOTE, K.; ADAM, M.; BREGAGLIO, S.; BUIS, S.; CONFALONIERI, R.; FUMOTO, T.; GAYDON, D.; MARCAIDA III, M.; NAKAGAWA, H.; ORIOL, P.; RUANE, A.C.; RUGET, F.; SINGH, B.; SINGH, U.; TANG, L.; TAO, F.; WILKENS, P.; YOSHIDA, H.; ZHANG, Z.; BOUMAN, B. Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions. **Global Change Biology**, Oxford, v. 21, n. 3, p. 1328-1341, 2015.

LISSON, S.N; INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; KEATING, B.A. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 321-335, 2005.

LIU, D.L.; BULL, T.A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 144, p. 181-211, 2001.

MARIN, F.R. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira:** estado atual e cenário futuro baseado em simulações multimodelos. 2014. 262p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

MARIN, F.R.; DE CARVALHO, G.L. Spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency in the state of Sao Paulo, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 149-156, 2012.

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J.L.; PALLONE FILHO, W.J.; NASSIF, D.S.P. Parametrization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian sugarcane. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, n. 2, p. 304-315, 2011.

MARIN, F.R.; THORBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G. Sugarcane model intercomparison: Structural differences and uncertainties under current and potential future climates. **Environmental Modelling and Software**, London, v. 72, p. 372–386, 2015.

MARIN, F.R.; THORBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G.; REZENDE, A.S.; ANDRADE JUNIOR, A.S. Evaluation of APSIM-SUGAR and DSSAT-CANEGRO for widely grown brazilian sugarcane cultivar. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 28. , 2013. São Paulo. **Proceedings**… São Paulo, 2013.

MARTRE, P.; WALLACH, D.; ASSENG, S.; EWERT, F.; JONES, J.W.; RÖTTER, R.P.; BOOTE, K.J.; RUANE, A.C.; THORBURN, P.J.; CAMMARANO, D.; HATFIELD, J.L.; ROSENZWEIG, C.; AGGARWAL, P.K.; ANGULO, C.; BASSO, B.; BERTUZZI, P.; BIERNATH, C.; BRISSON, N.; CHALLINOR, A.J.; DOLTRA, J.; GAYLER, S.; GOLDBERG, R.; GRANT, R.F.; HENG, L.; HOOKER, J.; HUNT, L.A.; INGWERSEN, J.C.; IZAURRALDE, R.C.; KERSEBAUM, K.C.; MÜLLER, C.; KUMAR, S.N.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.J.; OLESEN, J.E.; OSBORNE, T.M.; PALOSUO, T.; PRIESACK, E.; RIPOCHE, D.; SEMENOV, M.A.; SHCHERBAK, I.; STEDUTO, P.; STÖCKLE, C.O.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; TRAVASSO, M.; WAHA, K.; WHITE, J.W.; WOLF, J. Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. **Global Change Biology**, Oxford, v. 21, p. 911-925, 2015.

MONTEIRO, L.A. **Sugarcane yield gap in Brazil**: a crop modelling approach. 2015. 131p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P.C. Potential and actual sugarcane yields in Southern Brazil as a function of climate conditions and crop management. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, p. 264-276, 2014.

MONTEIRO, L.A; SENTELHAS, P.C.; PEDROSO, D.B. Calibration and validation of a simple agrometeorological model to estimate sugarcane yield under operational field conditions. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 19., 2015, Lavras. **Anais**… Lavras, 2015. 2517p.

MUCHOW, R.C.; EVENSON, C.; OSGOOD, R.V.; ROBERTSON, M.J. Yield accumulation in irrigated sugarcane II. Utilization of intercepted radiation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 646-652, 1997.

MUCHOW, R.C; ROBERTSON, M.J.; WOOD, A.W. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia: II. Radiation use, biomass accumulation and partitioning. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 48, p. 11-25, 1996.

NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, p. 282-290, 1970.

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; PALLONE, W.J.; RESENDE, R.S.; PELLEGRINO, G.Q. Parameterization and evaluation of the DSSAT/Canegro model for Brazilian sugarcane varieties. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 311-318, 2012.

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.

OLIVEIRA, E.C.A. de; OLIVEIRA, R.I. de; ANDRADE, B.M.T. de; FREIRE, F.J.; LIRA JÚNIOR, M.A.; MACHADO, P.R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 9, p. 951-960, 2010.

OLIVEIRA, R.A.; SANTOS, R.S.; RIBEIRO, A.; ZOLNIER, S.; BARBOSA, M.H.P. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE. R **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 549-557, 2012.

PALOSUO, T.; KERSEBAUMB, K.C.; ANGULOC, C.; HLAVINKAD, P.; MORIONDO, M.; OLESEN, J.E.; PATIL, R.H.; RUGET, F.; RUMBAUR, C.; TAKÁC, J.; TRNKA, M.; BINDI, M.; ÇALDAG, B.; EWERT, F.;FERRISE, R.; MIRSCHEL, W.; SAYLAN, L.; SISKA, B.; RÖTTER, R. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. **European Journal of Agronomy**, London, v. 35, p. 103-114, 2011.

PEREIRA, A.B.; SENTELHAS, P.C.; VILLA NOVA, N.A. Estimativa do balanço de energia radiante em função de elementos climáticos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, p. 201-206, 1998.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. Condicionamento climático da produtividade potencial. In: _____. **Agrometeorologia**: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. cap. 20, p. 413-432.

PRADO, H. **Pedologia fácil**: aplicação em solos tropicais. 4. ed. Piracicaba: O Autor, UFV, 2014. 284p.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, New York, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

PROBERT, M.E.; DIMES, J.P.; KEATING, B.A.; DALAL, R.C.; STRONG, W.M. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. **Agricultural Systems**, Essex, v. 56, n. 1, p. 1-28, 1998.

RAMBURAN, S.; WETTERREEN, T.; BERRY. S.D.; SHONGWE, B. Genetic, environmental and management contributions to ratoon decline in sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 146, p. 105-112, 2013.

REYNOLDS, J.F.; ACOCK, B. Predicting the response of plants to increasing carbon-dioxide - a critique of plant-growth models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 29, p. 107-129, 1985.

RITCHIE, J.T. Soil water balance and plant water stress. In: TSUGI, G.Y.; HOOGENBOOM, G. THORNTON P.K. (Ed.). **Understanding Options for Agricultural Production**. Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 41-54.

RITCHIE, J.T.; KINIRY, J.R.; JONES, C.A.; DIKE, P.T. Model inputs. chap. 2. In: **CERES-Maize**: A Simulation Model of Maize Growth and Development. JONES C.A.; KINIRY J.R. (Ed.). Ceres-Maize: a simulation model of maize growth and development College Station. Texas, A & M University, 1986. 194p.

ROBERTSON, M.J.; BONNETT, G.D.; HUGHES, R.M.; MUCHOW, R.C.; CAMPBELL, J.A. Temperature and leaf area expansion of sugarcane: integration of controlled-environment, field and model studies. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 25, n. 7, p. 819-829, 1998.

ROBERTSON, M.J.; INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 64, p. 211-227, 1999.

ROBERTSON, M.J.; WOOD, A.W.; MUCHOW, R.C. Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia: I. Radiation use, biomass accumulation and partitioning. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 48, p. 11-25, 1996.

RÖTTER, R.P., PALOSUO, T., KERSEBAUM, K.C., ANGULO, C., BINDI, M., EWERT, F., FERRISE, R., HLAVINKA, P., MORIONDO, M., NENDEL, C. Simulation of spring barley yield indifferent climatic zones of Northern and Central Europe: a comparison of nine crop models. **Field Crops Research**, Amsterdam. v. 133, p. 23–36, 2012.

SCARPARE, F.V. **Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST**. 2011. 163p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SILVA, R.F. da. **Calibração do modelo DSSAT/CANEGRO para cana-de-açúcar e seu uso para avaliação do impacto das mudanças climáticas**. 2012. 56p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C.N. A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro sugarcane model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 78, p. 151-164, 2002.

SINGELS, A.; DONALDSON, R.A.; SMIT, M.A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 291-303, 2005.

SINGELS, A.; JONES, M.; MARIN, F.; RUANE, A.; THORBURN, P. Predicting Climate Change Impacts on Sugarcane Production at Sites in Australia, Brazil and South Africa Using the Canegro Model. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, n. 4, p. 347-355, 2014.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DEN BERG, M. **DSSAT v4.5 - CANEGRO Sugarcane plant module**: scientific documentation. Mount Edgecombe: South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34p.

SINGELS, A.; JONES, M.R.; PORTER, C.; SMIT, M.A.; KINGSTON G.; MARIN, F.; CHINORUMBA, S.; JINTRAWET, A.; SUGUITANI, C.; VAN DEN BERG, M.; SAVILLE, G. The DSSAT4.5 CANEGRO model: a useful decision support tool for research and management of sugarcane production. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 27, 2010, Vera Cruz. **Proceedings**… Vera Cruz, 2010.

SINGH, K.K; MALL; R.K.; SINGH; R.S; SRIVASTAVA, A.K. Evaluation of CANEGRO Sugarcane Model in East Uttar Pradesh, India. **Journal of Agrometeorology**, Anand, v. 12, n. 2, p. 181-186, 2010.

THORBURN, P.J.; PROBERT, M.E.; ROBERTSON, F.A. Modelling Decomposition of Sugar Cane Surface Residues with APSIM-Residue. **Field Crops Research**, Amsterdam v.70, n. 3, p. 223-232, 2001.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.

VAN ANTWERPEN, R. **Modelling root growth and water uptake of sugarcane cultivar NCo376**. 1998. 133 p. Ph.D. Thesis. University of the Orange Free State, Bloemfontein, 1998.

VERBURG, K.; ROSS, P.J.; BRISTOW, K.L. **SWIM v2.1 Manual**. CSIRO Division of Soils Divisional Report No. 130, CSIRO, Australia, 1996. 93p.

VIANNA, M. dos S.; SENTELHAS, P.C. Performance of DSSAT CSM-CANEGRO under operational conditions and its use in determining the ‘saving irrigation’ impact on sugarcane crop. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 17, p. 1-12, 2015.

WALLACH, D.; GENARD, M. Effect of uncertainty in input and parameter values on model prediction error. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 105, p. 337-345, 1998.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O’DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

WILSON, R.G.; ROUSE, W.R. Moisture and temperature limits of the equilibrium evapotranspiration model. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 11, p. 436-443, 1972.

WIT, C.T. Photosynthesis of leaf canopies. **Agricultural Research Report**, Wageningen, v. 663, p.1-56, 1965.

3 QUEBRA DE PRODUTIVIDADE DE COLMOS DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

Resumo

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar no mundo. O cultivo da referida cultura é concentrado nas regiões centro-sul e nordeste do país e os níveis de produtividade de colmos variam consideravelmente entre as regiões produtoras, resultando em diferentes magnitudes de quebra de produtividade. Os objetivos deste estudo foram determinar a magnitude da quebra de produtividade da cana-de-açúcar em diferentes regiões produtoras do Brasil e suas principais causas (deficiência hídrica ou manejo da cultura) por meio de abordagem multimodelos. Três modelos de simulação, adequadamente ajustados para cana planta, foram utilizados, sendo eles o Modelo da Zona Agroecológica da FAO (MZA-FAO), o DSSAT/CANEGRO e o APSIM-Sugarcane. Foram avaliadas as produtividades e as quebras de produtividade estimadas para 30 localidades bem distribuídas pelas regiões produtoras do Brasil. A quebra de produtividade de colmos total média (Q_T) para essas localidades foi 121 t ha^{-1}. A maior parte da quebra de produtividade foi devido à deficiência hídrica (Q_{DH}), perfazendo aproximadamente 72% da Q_T, o que corresponde a 87 t ha^{-1}. A quebra de produtividade devido ao manejo da cultura (Q_M) variou com a região e com as práticas adotadas pelos produtores, sendo, em média, da ordem de 28% da Q_T, mas podendo chegar a 46%. A região Nordeste apresentou os maiores valores de Q_{DH}. O estado de São Paulo apresentou os menores valores de Q_M. As principais causas da Q_M podem estar relacionadas ao sistema de produção baseado em monocultura e à compactação dos solos devido à intensa mecanização observada nos últimos anos, conforme observado em outros países produtores de cana-de-açúcar. Possíveis soluções para mitigar a quebra de produtividade, devido tanto a deficiência hídrica quanto ao manejo da cultura, foram discutidas.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Abordagem multimodelos; Deficiência hídrica; Manejo

Abstract

Brazil is the largest sugarcane producer in the world. The levels of sugarcane yield in the different regions of the country vary substantially, resulting in yield gaps of different magnitudes. This study aimed to investigate the sugarcane yield gaps in Brazil, their magnitude and causes (water deficit or crop management), with a multi-model approach. Three different crop simulation models, FAO-Agroecological Zone (MZA-FAO), DSSAT/CANEGRO and APSIM-Sugarcane, properly calibrated for plant cane, were used. These models were applied to simulate plant cane yields and yield gaps for 30 locations in different Brazilian regions. The total yield gap (YG_T) for 30 locations across Brazil was 121 t ha^{-1}. The results showed that the main part of the YG_T was caused by water deficit (YG_{WD}), followed by sub-optimal crop management (YG_{CM}). The YG_{WD} accounted for about 72% of total yield losses (~ 87 t ha^{-1}). The yield loss due to crop management was dependent on the region and practices adopted by sugarcane growers, representing on average 28% of the YG_T (~ 34 t ha^{-1}), however, reaching 46%. The highest YG_{WD} was found in the northeastern region. The São Paulo State showed the lowest YG_{CM}. The main causes of YG_{CM} could be related to the production system based on monoculture and soil compaction due to

intense mechanization in recent years, as observed in other countries where sugarcane is grown. Possible solutions to mitigate the YG were discussed.

Keywords: *Saccharum* spp.; Multi-model approach; Water deficit; Crop management

3.1 Introdução

Em razão da elevada taxa de crescimento da população mundial, há uma previsão de aumento expressivo da demanda por alimentos, fibras, energia e água. Para atender as demandas relacionadas aos produtos agrícolas será necessário expandir a área de cultivo de modo sustentável mas, principalmente, intensificar a produção das áreas já cultivadas (VAN ITTERSUM et al., 2013; GOLDEMBERG et al., 2014; FISCHER et al., 2014). É esperado um aumento da demanda de etanol oriundo da cana-de-açúcar, dado o potencial da substituição de combustíveis fósseis por este produto, além de seu uso levar à diminuição da emissão de gases de efeito estufa (LEAL et al., 2013a; GOLDEMBERG et al., 2014).

O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma área cultivada de aproximadamente 10 milhões de ha (IBGE, 2016). Nas safras 2013/2014 e 2014/2015 pouco mais da metade da cana-de-açúcar produzida no Brasil foi destinada à produção de etanol (UNICA, 2016). A expansão do cultivo da cana-de-açúcar tem ocorrido, majoritariamente, em áreas ocupadas anteriormente por pastagens degradadas (RUDORFF et al., 2010; ADAMI et al., 2012) e em locais com considerável deficiência hídrica. Apesar do aumento da área cultivada, não vem sendo observado um incremento na produtividade de colmos da cultura na mesma magnitude, o que indica que as quebras de produtividade, ocasionadas pelo déficit hídrico e pelo manejo agrícola, vêm sendo mais intensas.

A análise de quebra de produtividade das culturas (do inglês, *yield gap*) fornece uma base para identificar os principais fatores limitantes da produtividade e pode fornecer valiosas informações para direcionar pesquisas, políticas públicas e intervenções das partes interessadas (LOBELL et al., 1999; VAN ITTERSUM et al., 2013). A diferença entre os níveis de produtividade de uma cultura determina a quebra de produtividade e seus fatores determinantes. Baseado em diversos trabalhos (RABBINGE, 1993; LÖVENSTEIN et al.; 1995; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997; LOBELL et al., 1999; VAN ITTERSUM et al., 2013), a produtividade potencial (PP) é a produtividade de um cultivar que não tem seu crescimento e desenvolvimento afetados por limitações de ordem hídrica e nutricional e por fatores bióticos (como pragas, doenças e plantas daninhas). Nessa situação, a produtividade é determinada pela radiação solar incidente, temperatura do ar, fotoperíodo, concentração de CO_2, características do genótipo e população de plantas (fatores determinantes). A

produtividade atingível ou limitada pela água (PA) é similar a PP, todavia, influenciada pela deficiência hídrica (fator limitante), a qual é condicionada pela quantidade e distribuição das chuvas, tipo de solo (textura, estrutura e exploração das raízes) e topografia do terreno (escoamento superficial). Portanto, é a PA é a produtividade em sequeiro em condições ótimas de manejo agrícola. A produtividade real (PR) é aquela obtida pelos produtores no campo, considerando-se os fatores determinantes, limitantes e redutores, ou seja, manejo agrícola sub-ótimo.

Mesmo em experimentos de campo conduzidos sob alta tecnologia e padrão de manejo para controle dos fatores redutores de produtividade, é praticamente impossível assegurar que não ocorrerá nenhum tipo de interferência nas plantas ao longo de seu ciclo (LOBELL et al., 2009; VAN INTTERSUM et al., 2013). Além disso, tal manejo não é viável economicamente, pois o retorno financeiro aos insumos aplicados é baixo quando objetiva-se atingir o máximo nível de produtividade (LOBELL et al., 1999). Desse modo, a produtividade ótima econômica (P_{eco}), como definido por Fisher (2015), ou explorável (P_{exp}), conforme definição de van Ittersum et al. (2013), é a produtividade obtida pelos produtores quando as práticas agrícolas são economicamente ótimas e diferentes níveis de insumos são adotados em dadas condições agrometeorológicas ao longo do ciclo da cultura. A P_{eco} ou P_{exp} varia de 75 a 85% da PP ou PA para a maioria das culturas de grãos no mundo (VAN ITTERSUM et al., 2013).

Uma vez que o manejo da cultura é um importante aspecto no rendimento das culturas, o nível deste adotado pelos produtores ao longo do ciclo das culturas precisa ser levado em consideração, conforme abordagem adotada por Sentelhas et al. (2015), em estudo da quebra de produtividade da soja no Brasil. Uma representação esquemática dos tipos de produtividade é apresentada na Figura 3.1. Além da PP, PA e PR, mais quatro diferentes níveis foram abordados, os quais representam a produtividade de uma cultura de sequeiro em condições sub-ótimas e deficientes de manejo (PS_O e PS_D, respectivamente) e irrigada plena em condições sub-ótimas e deficientes de manejo (PI_O e PI_D, respectivamente). A PI_O e a PS_O de uma cultura são equivalentes à P_{exp} ou P_{eco} e a PR pode ser considerada a PI_D ou PS_D. Assumindo tal equivalência, a quebra de produtividade total (Q_T) de uma cultura pode ser a diferença entre PI_O e PS_D. Já a diferença de produtividade entre a PI_O e a PS_O é a quebra de produtividade devido a deficiência hídrica (Q_{DH}), uma vez que os outros fatores são efetivamente controlados. Por fim, a diferença entre a PS_O e a PS_D é a quebra de produtividade devido ao manejo da cultura (Q_M). Muitos trabalhos na literatura se referem a PI_O e a PS_O como PP e PA, respectivamente.

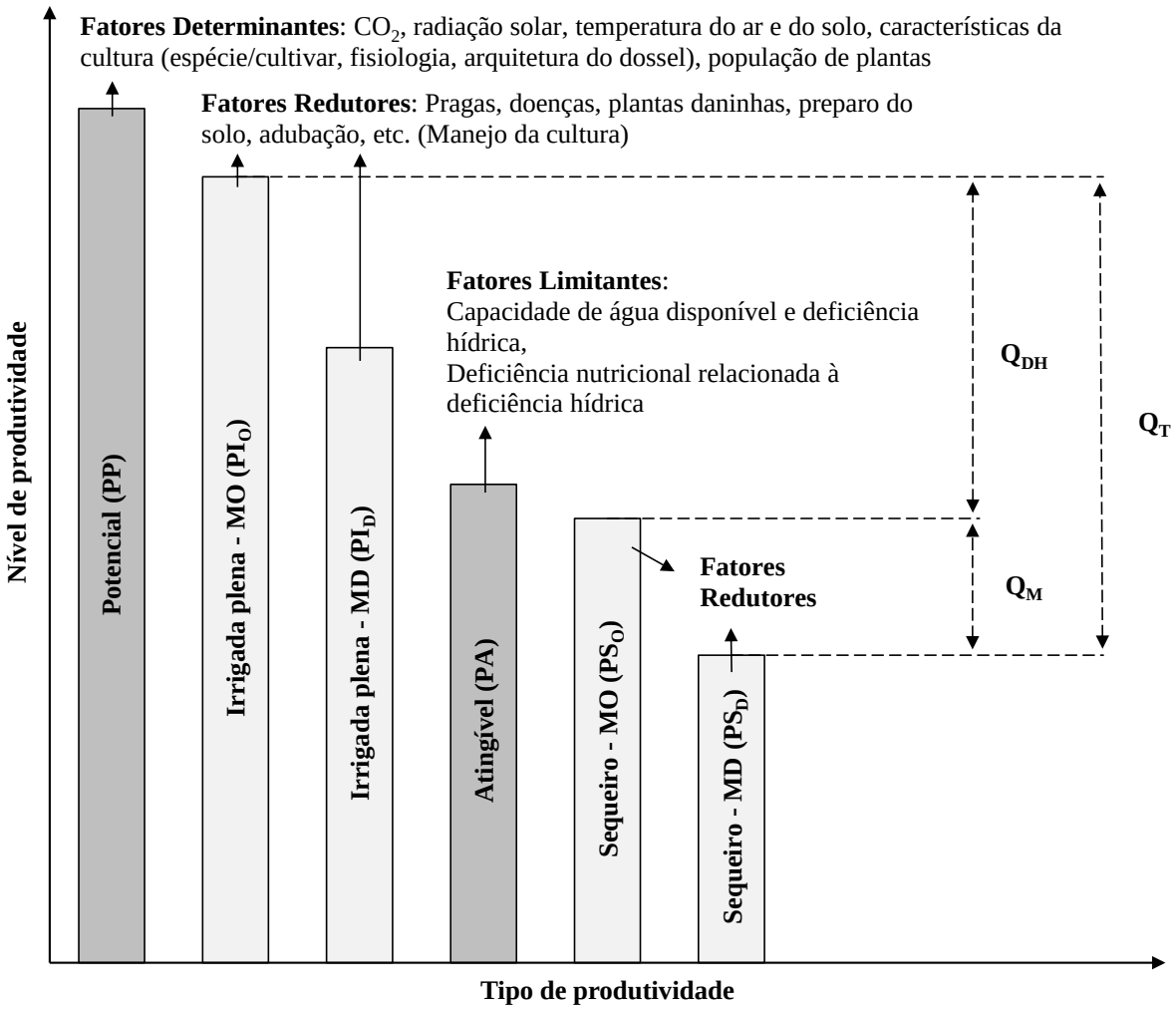


Figura 3.1 – Tipos e níveis de produtividade, seus respectivos fatores condicionantes, quebra de produtividade total (Q_T), quebra devido à deficiência hídrica (Q_{DH}) e ao manejo (Q_M) de uma dada cultura. MO e MD são condições de manejo ótimo e deficiente, respectivamente. (Adaptado de RABBINGE, 1993; LÖVENSTEIN et al.; 1995; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997; LOBELL et al., 1999; VAN ITTERSUM et al., 2013; SENTELHAS et al., 2015)

Há basicamente quatro abordagens para se calcular a PP e PA (VAN ITTERSUM et al., 2013): i) experimentos de campo; ii) competição de produtividade de cultivares; iii) máxima produtividade obtida em base de dados; e iv) modelos de simulações de culturas. Van Ittersum et al. (2015) apresentam as limitações dessas abordagens e recomendam o uso dos modelos de simulação de culturas, já que esses levam em consideração os aspectos biológicos, bioquímicos e biofísicos, ou seja, a resposta das culturas aos diversos fatores ambientais.

Para a cultura da cana-de-açúcar há diversos modelos de simulação, com destaque para os modelos mecanísticos sul-africano DSSAT/CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS; BEZUIDENHOUT, 2002) e australiano APSIM-Sugarcane (KEATING et al.,

1999). O modelo da Zona Agroecológica da FAO (MZA-FAO, DOORENBOS; KASSAM, 1979) é um modelo mais simples em estrutura (processos simulados e parâmetros) que os demais supramencionados, contudo tem apresentado resultados satisfatórios para estudos agrometeorológicos para cana-de-açúcar no Brasil (GOUVÊA et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2012; MARIN; CARVALHO, 2012; MONTEIRO; SENTELHAS, 2014; MONTEIRO, 2015).

Modelos complexos apresentam incertezas inerentes à sua estrutura, parâmetros e dados de entrada (O'NEILL, 1973 citado por REYNOLDS; ACOCK, 1985; WALLACH; GENARD, 1998). Pesquisas recentes têm demonstrado que o uso de modelos em conjunto (abordagem multimodelos) tem permitido reduzir as incertezas associadas às simulações de cada modelo individualmente. Isso foi observado nas culturas do trigo (PALOSUO et al., 2011; ASSENG et al., 2013; MARTRE et al., 2015), cevada (RÖTTER et al., 2012), milho (BASSU et al., 2014), arroz (LI et al., 2015), soja (BATTISTI; SENTELHAS, 2016) e batata (FLEISHER et al., 2016). Para a cultura da cana-de-açúcar, Marin et al. (2015) avaliaram o desempenho dos modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane para simulação da cana planta em condições experimentais em diversos locais no Brasil e constaram melhoria do valor estimado da produtividade de colmos e do índice de área foliar quando utilizados em conjunto.

Para calcular a quebra de produtividade de sistemas de produção de sequeiro de modo confiável são necessários 15 a 20 anos de dados meteorológicos e de produtividades observadas a campo, ou seja, PR (VAN ITTERSUM et al, 2013; GRASSINI et al., 2015; VAN BUSSEL et al., 2015). Contudo, em locais altamente favoráveis e de elevadas produtividades, apenas cinco anos são necessários (VAN ITTERSUM et al, 2013), o que não parece ser o caso da maioria dos sistemas de produção de cana-de-açúcar no Brasil.

A maioria dos estudos de quebra de produtividade no mundo envolvem grãos. No Brasil estudos focando a quebra de produtividade, baseados em modelos de simulação de culturas, foram realizados para o milho (AFFHOLDER et al., 2003; BATTISTI et al., 2012), soja (BATTISTI et al., 2012; SENTELHAS et al., 2015), feijão (MEIRELES et al., 2013); trigo (BATTISTI et al., 2012), sorgo (MARIN et al., 2006) e girassol (MARIN et al., 2000; ROLIM et al., 2001).

No caso da cana-de-açúcar, Cheeroo-Nayamuth et al. (2011) compararam as simulações de produtividade de colmos realizadas pelo modelo DSSAT/CANEGRO (versão 3.1) com os dados reportados nas Ilhas Maurício e encontraram que há uma estagnação da

produtividade, tanto nas áreas irrigadas como nas de sequeiro, embora as simulações tenham apresentado uma tendência de incremento na PP. Os autores atribuíram esse fato às práticas de manejo e à limitação da prática de irrigação. Van den Berg e Singels (2013) conduziram um estudo sobre a quebra de produtividade da cana-de-açúcar na África do Sul, fazendo distinção entre grandes e pequenos produtores. O modelo de simulação CANESIM (BEZUIDENHOUT; SINGELS, 2007), o qual é uma simplificação do DSSAT/CANEGRO, foi utilizado para simular a PA. Na média para o período de 1988 a 2010, os grandes produtores atingiram 77% da PA, enquanto que os pequenos produtores não chegaram a 50%. Os autores concluíram que o uso da modelagem pode contribuir para o melhor entendimento das tendências de produção de cana-de-açúcar no país, separando os efeitos do clima dos demais que influenciam a produtividade de colmos. Em recente estudo, Jones e Singels (2015), utilizaram o modelo CANESIM, identificaram uma tendência de declínio das produtividades de colmos e consequente aumento da quebra de produtividade na maioria das regiões produtoras de cana-de-açúcar na África do Sul, durante os anos de 1981 a 2010, como também observado na Austrália (GARSIDE et al., 1997) e nas Ilhas Maurício (CHEEROO-NAYAMUTH et al., 2011). Os autores observaram ainda que tal tendência ocorreu independentemente do tamanho dos produtores.

No Brasil, estudos preliminares com o modelo MZA-FAO para cana-de-açúcar foram conduzidos por Marin et al. (2008) e Marin e Carvalho (2012), visando avaliar a eficiência agrícola (relação entre a PR e a PA) para o estado de São Paulo entre as safras 1990/1991 e 2005/2006. Os autores observaram que a produtividade de colmos é da ordem de 50% do potencial da cultura e frisaram que fatores econômicos contribuem consideravelmente para a eficiência do sistema produtivo da cana-de-açúcar no referido estado. Entretanto, não há menção da magnitude da diferença entre a PP e a PR, em termos de t ha^{-1}.

Estudos recentes têm buscado avaliar a quebra de produtividade da cana-de-açúcar para regiões produtoras do centro-sul (MONTEIRO; SENTELHAS, 2014; MARIN et al., 2016) e a nível de nacional (VIANNA; SENTELHAS, 2014; MONTEIRO, 2015), todavia, utilizando apenas um modelo de simulação.

Dada a importância que a definição da quebra de produtividade da cana-de-açúcar tem para a definição de ações que possam minimizá-las, este estudo teve por objetivos determinar a quebra de produtividade de colmos em diferentes regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil por meio de abordagem multimodelos, assim como determinar suas principais causas e as discutir possíveis soluções para minimizar tal quebra.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Descrição resumida dos modelos de simulação

O modelo MZA-FAO foi adaptado da proposta original de Doorenbos e Kassam (1979), para a escala diária de cálculo. O modelo é basicamente dividido em duas partes. A primeira parte calcula a PP, baseado na abordagem de de Wit (1965), o qual é função dos fatores determinantes (como radiação solar, temperatura do ar e fotoperíodo) para calcular a fotossíntese bruta em termos de massa seca, com correções para o tipo de cultura, como metabolismo de fixação de CO_2, respiração de manutenção, índice de área foliar, coeficiente de colheita e umidade do produto colhido. As equações de correção podem ser encontradas nos trabalhos de Doorenbos e Kassam (1979) e Monteiro e Sentelhas (2014). O índice de área foliar (IAF) utilizado neste estudo é apresentado na Tabela 3.1. O coeficiente de colheita utilizado foi 0,77 e a umidade do colmo igual a 80% (DOORENBOS; KASSAM, 1979; MONTEIRO, 2015). Uma vez calculada a PP para o ciclo da cultura, essa é penalizada em função da deficiência hídrica relativa (1-ETr/ETc), calculada em função da evapotranspiração real (ETr) e a máxima da cultura (ETc), e do coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (ky) para cada fase de desenvolvimento da cultura, obtendo-se a produtividade atingível (PA). A ETc foi calculada mediante o produto entre a evapotranspiração de referência (ETo) e o coeficiente de cultivo (kc). A ETo foi calculada pelo método de Priestley e Taylor (1972) e os valores de kc utilizados para as diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 3.1. A ETr foi calculada por meio do balanço hídrico de Thorntwhaite e Mather (1955). Os valores de ky foram ajustados para os dados do projeto, os quais diferem dos utilizados por Doorenbos e Kassam (1979), Monteiro e Sentelhas (2014) e Monteiro (2015), pois o modelo foi adaptado para os cálculos na escala diária, em que o déficit hídrico é maior, e pelo fato da fase de grande crescimento (elongação do colmo) ser mais sensível à deficiência hídrica (ROBERTSON et al., 1999; INMAN-BAMBER e SMITH, 2005). Os valores de ky são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar e seus respectivos valores de índice de área foliar (IAF), coeficiente de cultura (kc) e coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (ky)

Fase de desenvolvimento	Duração da fase (dias)[1]	kc[1]	IAF[1]	ky[2]
1 - Do plantio até 25% de cobertura	30	0,55	2,0	0,10
2 - De 25-50% de cobertura	30	0,80	2,5	0,10
3 - De 50-75% de cobertura	15	0,90	3,0	0,15
4 - De 75% à cobertura plena	50	1,00	3,5	0,30
5 - Máximo crescimento	180	1,05	4,5	0,77
6 - Senescência	30	0,80	4,0	0,40
7 - Maturação	30	0,60	3,5	0,05
Total de dias do ciclo	365			

[1]Doorenbos e Kassam (1979); Monteiro e Sentelhas (2014); [2] Calibrado no Capítulo 2. Para maiores detalhes ver itens 2.1.2.1 e 2.3.2.1

O modelo CANEGRO (versão 4.5), pertencente à plataforma do DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), simula o crescimento e o desenvolvimento da cana-de-açúcar considerando dados meteorológicos diários e informações de cultivares, solos e manejo como dados de entrada. O modelo foi primeiramente desenvolvido por Inman-Bamber (1991) com base no modelo CERES-MAIZE, passando por diversas adaptações e melhorias até a compilação realizada por Singels et al. (2008). No modelo é simulado: desenvolvimento da cultura ao nível de folhas e perfilhos; captura da radiação por meio do IAF; balanço hídrico usando princípios de dinâmica do sistema solo-planta-atmosfera; acúmulo de biomassa seguindo uma abordagem de eficiência do uso da radiação/respiração; e partição da biomassa para diferentes componentes da planta (incluindo sacarose nos colmos) por meio da relação fonte-dreno, sendo essa etapa influenciada pela idade fisiológica da cultura e estresses hídrico e térmico (SINGELS et al., 2008).

O DSSAT/CANEGRO contempla 74 parâmetros de cultura, sendo 23 de espécie, 31 de ecótipo e 20 de cultivar, os quais são descritos por Singels et al. (2008). Todavia, sugere-se que apenas os parâmetros de ecótipo e cultivar sejam ajustados. Há distinção entre as temperaturas base para os cálculos de fenologia e de acúmulo de biomassa, as quais podem ser encontradas em Singels et al. (2008). Contudo, não há temperatura ótima ou máxima para esses cálculos. No modelo, a fenologia da cultura é condicionada pelo acúmulo de graus-dia.

No desenvolvimento da parte aérea, o DSSAT/CANEGRO utiliza um modelo de IAF derivado do desenvolvimento de folhas individuais e perfilhos baseado no tempo térmico. Tal modelo simula o desenvolvimento de folhas individuais e perfilhos, sendo que a área foliar de cada perfilho é extrapolada para o nível de dossel pela multiplicação da área foliar individual

pelo nº de perfilhos por unidade de área. A interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é calculada de acordo com a Lei de Beer, usando dois coeficientes de extinção durante o desenvolvimento do dossel, os quais são variáveis em função do número de folhas formadas no colmo primário (INMAM-BAMBER, 1991). Para o aparecimento das folhas o modelo considera dois filocronos, em função do número de folhas emergidas, seguindo abordagem de Inman-Bamber (1994). A senescência das folhas é acentuada pelo estresse hídrico e ocorre quando um valor máximo de folhas por colmo é atingido.

O acúmulo de biomassa é baseado na eficiência do uso da PAR, o qual sofre influência da temperatura do ar, deficiência hídrica e respiração de crescimento (SINGELS; BEZUIDENHOUT, 2002). A respiração de manutenção foi derivada do trabalho de Liu e Bull (2011), a qual varia exponencialmente com a temperatura do ar, considerando que essa variação ocorre em função de uma temperatura de referência de 10 ºC (INMAM-BAMBER, 1991). A partição da biomassa entre os diferentes órgãos é regulada pela relação fonte/dreno, em que a capacidade do dreno é regida pelas condições de crescimento, total de biomassa de colmos e características do cultivar (SINGELS; BEZUIDENHOUT, 2002).

O crescimento radicular tem um algoritmo expresso em termos de extensão da profundidade de raízes, bem como o aumento da massa radicular e do comprimento das raízes por camada de solo. O sistema radicular juntamente com as condições hídricas do solo, determina o potencial de absorção (extração) de água pela planta, o qual é usado posteriormente para o cálculo do nível de estresse hídrico, seguindo abordagem de Ritchie (1998). O balanço hídrico do solo no DSSAT é descrito por Ritchie (1998), o qual interfere em praticamente todos os processos de crescimento e desenvolvimento da cultura. A ETo é estimada pelo método Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), mas também pode ser adotado o método de Priestley e Taylor (1972), o qual foi utilizado neste estudo devido à ausência de dados de umidade relativa do ar e velocidade do vento. No caso do modelo da cana-de-açúcar, o balanço de nitrogênio não é simulado.

O ajuste dos parâmetros de cultivar foi realizado a partir das calibrações de Marin et al. (2015) e Vianna e Sentelhas (2015) para a cultivar RB86-7515 e para um conjunto de cultivares, respectivamente. Na Tabela 3.2 são apresentados os valores dos parâmetros de cultivar utilizada no projeto, onde se buscou alterar parâmetros de fenologia e da partição de biomassa, sem extrapolar os limites recomendados por Singels et al. (2008) e calibrados para cultivares brasileiras.

Tabela 3.2 – Parâmetros do modelo DSSAT/CANEGRO para a cultivar padrão (NCo376) e ajustados para os dados do presente estudo, considerando-se diversas cultivares

Parâmetro[1]	Cultivar NCo376	Diversas cultivares
PARCEmax	9,9	10,5
APFMX	0,88	0,92
STKPFMAX	0,65	0,68
SUCA	0,58	0,58
TBFT	25	25
Tthalfo	250	250
Tbase	16	16
LFMAX	12	10
MXLFAREA	360	550
MXLFARNO	15	22
Pl1	69	89
Pl2	169	190
PSWITCH	18	18
MAX_POP	30	18
POPTT16	13,3	12
TTPLNTEM	428	208
TTRATNEM	203	120
CHUPIBASE	1050	448
TT_POPGROWTH	600	628

[1] A descrição desses parâmetros encontra-se nas Tabelas 2.5 e 2.6 do Capítulo 2

No modelo da cana-de-açúcar incorporado como um módulo na plataforma APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*, versão 7.4) as simulações podem ser resumidas, segundo Keating et al. (1999), basicamente em quatro abordagens: eficiência do uso da radiação (RUE, sigla em inglês); interceptação da radiação incidente pelo dossel da cultura; produção de biomassa; e partição da massa seca e fotoassimilados.

A fenologia da cana-de-açúcar é dividida em cinco fases no modelo: i) do plantio ou corte até a brotação; ii) da brotação à emergência; iii) da emergência ao início do crescimento dos colmos; iv) do crescimento dos colmos ao florescimento; v) e desse até a colheita. O florescimento é desativado nas simulações. Portanto, a última fase vai do crescimento dos colmos até a maturação/colheita. A fenologia é regulada pelo acúmulo de graus-dia, o qual varia de acordo com a cultivar. Diferentemente do DSSAT/CANEGRO, o APSIM-Sugarcane considera apenas uma temperatura base (9 ºC) para todo o desenvolvimento da cultura. No entanto, há uma temperatura ótima (32 ºC) e máxima (45 ºC) para o cálculo dos graus-dia, baseado na cultura do milho (RITCHIE, 1986). A base experimental do algoritmo de expansão do dossel da cultura é descrita por Robertson et al. (1998). O IAF de folhas verdes é

o produto da área foliar de folhas verdes por colmos e o nº de colmos por unidade de área. A área foliar é específica da cultivar, a qual é condicionada pelo acúmulo de graus-dia e pelo balanço de biomassa e é usada para o cálculo da interceptação da radiação incidente. A taxa diária de senescência de folhas verdes é determinada por quatro fatores: idade fisiológica da cultura; competição por luz; estresse hídrico; e estresse por baixas temperaturas. A senescência foliar é induzida quando a fração da radiação solar interceptada é superior a 85%. A interceptação da radiação solar é baseada na Lei de Beer, a qual utiliza o IAF e apenas um coeficiente de extinção.

A simulação do acúmulo de massa seca é dada pela RUE e pela eficiência transpiratória. São utilizados diferentes valores de RUE para cana planta e soca, mas os mesmos coeficientes de extinção e transpiração. Nessa abordagem de RUE, a respiração não é diretamente computada. A RUE e a expansão do dossel são afetadas por extremos de temperatura, estresse hídrico (deficiência ou excedente) e deficiência de nitrogênio.

O efeito da deficiência hídrica no crescimento e desenvolvimento da cultura utiliza a abordagem sumarizada por Ritchie (1986), a mesma adotada na plataforma DSSAT. O efeito da deficiência de nitrogênio no crescimento e desenvolvimento da planta é dado por meio de limites máximos, mínimos e críticos do referido nutriente na folha (KEATING et al., 1999). O crescimento não é afetado até que o conteúdo de nitrogênio na folha fique abaixo do limite crítico.

A partição da biomassa entre os diferentes órgãos é descrita por Keating et al. (1999). Com relação às raízes, a quantidade de biomassa dessas aumenta a cada dia em função da biomassa diária produzida. A biomassa destinada ao sistema radicular também varia em função da fase fenológica, sendo que o máximo de 30% da biomassa produzida acima do solo é direcionado na fase de emergência.

O balanço hídrico (módulos SoilWat), de carbono e nitrogênio (módulo SoilN) no solo do APSIM é descrito por Probert et al. (1998). A estimação da transpiração baseada no método de Priestley e Taylor (1972). O modelo também permite simular a dinâmica de resíduos, como palha, por exemplo, por meio do módulo SurfaceOM, de acordo com Thorburn et al. (2001).

A fração da água disponível que pode ser extraída por dia foi arbitrada como sendo 0,1, 0,08, 0,06, 0,04, 0,02 e 0,01 mm dia^{-1} para as camadas 0-30, 30-60, 60-90, 90-120, 120-150 cm ou mais de profundidade do solo, respectivamente (INMAN-BAMBER et al., 2000; APSIM, 2014).

O ajuste dos parâmetros foi realizado a partir das calibrações de Marin et al. (2013) e Costa et al. (2014) para a cultivar RB86-7515 e SP80-1842, respectivamente. Na Tabela 3.3 são apresentados os parâmetros de cultivar utilizados neste estudo, em que foram alterados aqueles relacionados à fenologia e à partição da biomassa, tomando-se por base as calibrações já existentes para as cultivares brasileiras.

Tabela 3.3 – Parâmetros para a cultivar padrão do modelo APSIM-Sugarcane (Q117) e valores ajustados para os dados do presente estudo para diversas cultivares

Parâmetro*	Q117					Diversas cultivares				
leaf_size	1500	55000	55000			1500	55000	50000		
leaf_size_no	1	14	20			1	14	20		
cane_fraction	0,7					0,72				
sucrose_fraction_stalk	1	0,55				1	0,55			
stress_factor_stalk	0,2	1				0,2	1			
tt_emerg_to_begcane	1900					1025				
tt_begcane_to_flowering	6000					6000				
tt_flowering_to_crop_end	2000					2000				
green_leaf_no	13					12				
tillerf_leaf_size	1,5	3	2,5	1	1	1,5	3	2,5	1,5	1
tillerf_leaf_size_no	1	4	10	12	26	1	4	10	12	26

* A descrição desses parâmetros encontra-se nas Tabelas 2.9 e 2.10 do Capítulo 2

3.2.2 Avaliação dos modelos

Os dados de produtividade de colmos na colheita de cana planta (massa fresca) empregados na avaliação dos modelos de simulação da cana-de-açúcar foram obtidos de empresas do setor sucroenergético Usinas Japungu, Goiasa e outras que não permitiram divulgação do nome) e da NETAFIM, empresa que atua no ramo da irrigação, tanto em sistema de cultivo de sequeiro quanto sob irrigação. Da região sudeste do Brasil, foram utilizados 10 dados de produtividade de colmos no total, sendo oito provenientes de condições sob irrigação e dois de sequeiro. Da região nordeste, oito dados foram provenientes de locais irrigados e quatro de locais sem irrigação, totalizando 12 dados no total. Na região Centro-Oeste, não se dispunha de dados de condições irrigadas, apenas de condições de sequeiro, onde 19 dados foram utilizados na avaliação dos modelos. Ao todo, 41 dados de produtividade de foram utilizados no processo de avaliação, sendo 60% em condições de sequeiro e os 40% restantes de áreas irrigadas. A Figura 3.2 apresenta a distribuição espacial das localidades de onde os dados de produtividade são provenientes. Apenas dados do ciclo de 11 a 13 meses foram utilizados no estudo e do primeiro corte, ou seja, cana planta. A

profundidade de plantio foi 15 cm. A quantidade de gemas utilizadas no plantio variou de 12 a 15 por metro, enquanto que o espaçamento variou de 140 a 150 cm para as condições de sequeiro. Para as condições irrigadas, a quantidade de gemas utilizadas no plantio também variou entre 12 a 15 por metro, enquanto que o espaçamento variou entre 140 x 40 cm, 140 x 60 cm e 150 x 40 cm em função da disposição dos tubos gotejadores. Os canaviais foram conduzidos com elevado padrão de manejo. Mais detalhes sobre as localidades, a condição de cultivo e o número de safras empregadas podem ser encontrados na Tabela 3.4. Apesar de conduzidas sob condições operacionais, as áreas irrigadas foram conduzidas como ensaios em grandes áreas. O método de irrigação empregado nos ensaios foi o gotejo subsuperficial, com a aplicação de lâminas de água variando de 500 a 750 mm nas épocas mais críticas, sendo que houve ensaios em que irrigação foi plena, com lâminas de 2000 mm (Tabela 3.4). Dos três modelos utilizados, apenas o APSIM-Sugarcane simula o balanço de nitrogênio, todavia, como não se dispunham de dados da quantidade de nitrogênio aplicado, admitiram-se as seguintes fertilizações: 100 kg N ha^{-1} para áreas de sequeiro; e 150 kg N ha^{-1} para as áreas irrigadas. No caso das condições de sequeiro, a aplicação de nitrogênio foi realizada 30 dias após o plantio. Já para as condições irrigadas, a dose foi parcelada em 75 kg aplicados 30 e 60 dias após plantio. A profundidade de aplicação foi 7,5 cm. As cultivares não foram informadas na maioria dos casos, portanto, a avaliação dos modelos de simulação foi realizada para as cultivares de modo conjunto.

Os dados meteorológicos (temperaturas máxima e mínima do ar, precipitação, radiação solar global ou insolação) foram obtidos da estação meteorológica mais próxima junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO), Agência Nacional de Águas (ANA), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP) e de estações próprias das empresas parceiras. Quando da ausência de dados de radiação solar global, esta variável foi estimada a partir dos métodos de Angström-Prescott, quando os dados de insolação estavam disponíveis, e de Hargreaves, quando havia apenas dados de Tmax e Tmin, conforme recomendações de Allen et al. (1998). O saldo de radiação (Rn), necessário para o cálculo da ETo foi estimado como sendo 57,3% da Qg (PEREIRA et al., 1998; FERREIRA-JUNIOR et al., 2014). Para o cálculo do coeficiente W, da equação de ETo de Priestley-Taylor, foram utilizadas duas equações propostas por Wilson e Rouse (1972).

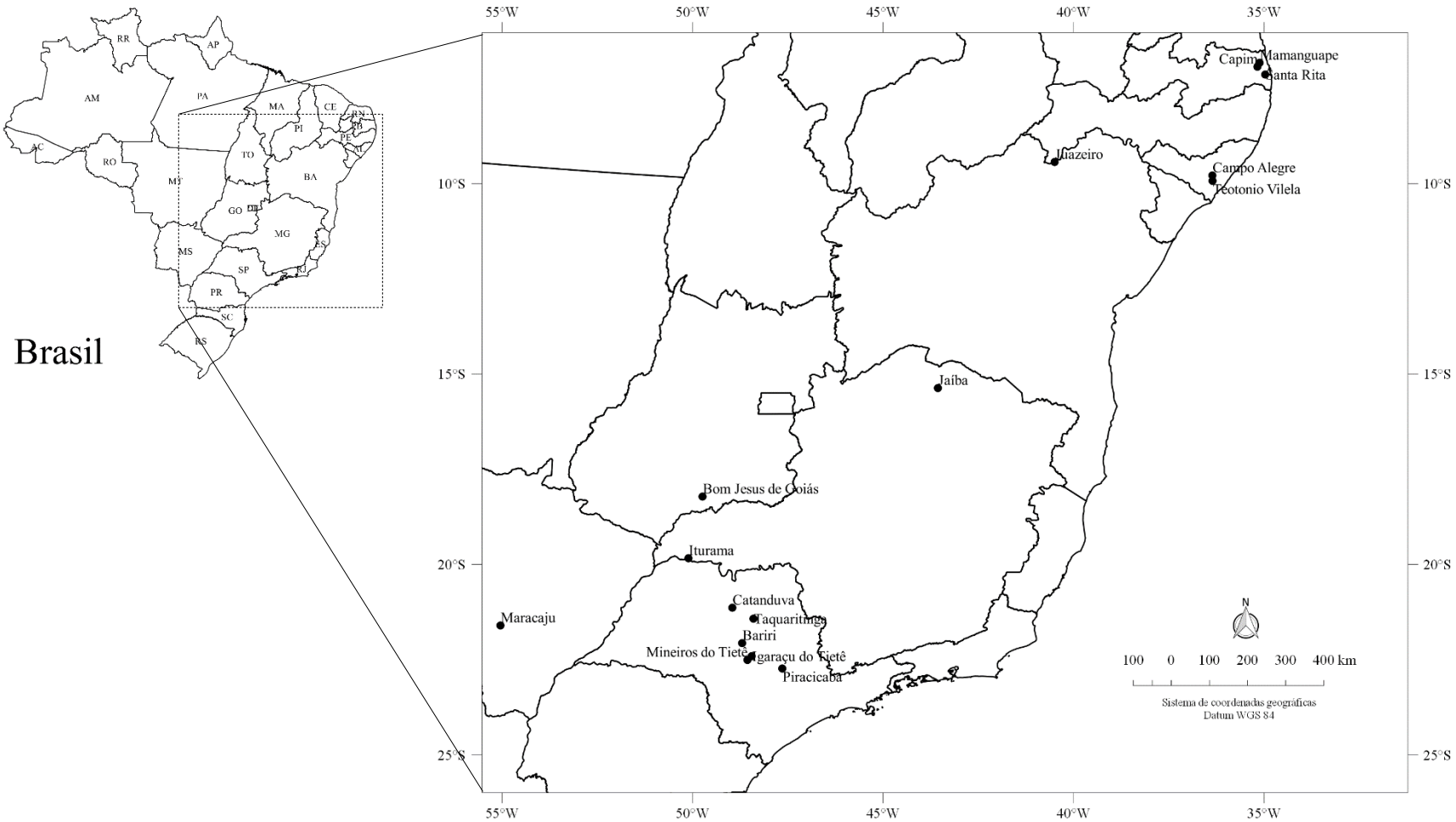


Figura 3.2 – Distribuição das localidades de onde foram obtidos os dados de produtividade da cultura da cana-de-açúcar utilizados na avaliação dos modelos de simulação

Tabela 3.4 – Localidades empregadas no presente estudo com suas respectivas coordenadas geográficas, altitude, sistema de cultivo (sequeiro ou irrigado) e safras utilizadas no processo de avaliação dos modelos de simulação da cultura da cana-de-açúcar. Os valores entre parênteses nos sistemas irrigados correspondem às lâminas aplicadas (mm ciclo^{-1})

Localidade	Latitude	Longitude	Altitude	Sistema de cultivo	Safras
	(graus e décimos)		(m)		
Piracicaba, SP	-22,71	-47,63	546	Sequeiro	07/08
Bariri, SP	-22,05	-48,74	500	Irrigado (500)	12/13 a 13/14
Catanduva, SP	-21,11	-48,93	534	Irrigado (600)	07/08 a 08/09
Igaraçu do Tietê, SP	-22,46	-48,41	498	Irrigado (525)	07/08 a 09/10
Mineiros do Tietê, SP	-22,50	-48,52	669	Irrigado (500)	07/08 e 08/09
Taquaritinga, SP	-21,36	-48,42	565	Irrigado (567)	05/06 e 06/07
Iturama, MG	-19,72	-50,13	402	Irrigado (600)	01/02
Jaíba, MG	-15,33	-43,58	484	Irrigado (2000)	08/09 a 11/12
Maracaju, MS	-21,58	-55,17	385	Sequeiro	10/11 a 13/14
Bom Jesus de Goiás, GO	-18,07	-49,68	630	Sequeiro	10/11 a 13/14
Juazeiro, BA	-9,38	-40,48	370	Irrigado (2000)	00/01 a 12/13
Capim, PB	-6,91	-35,17	47	Sequeiro	06/07 a 09/10
Mamanguape, PB	-6,83	-35,11	35	Irrigado (900)	13/14
Santa Rita, PB	-7,13	-35,01	20	Irrigado (1070)	13/14
Campo Alegre, AL	-9,83	-36,35	137	Irrigado (720)	02/03, 08/09 e 09/10
Teotônio Vilela, AL	-9,89	-36,36	112	Irrigado (525)	00/01, 01/02 e 10/11

A identificação dos solos foi reportada pelas empresas parceiras. Para os cálculos do balanço hídrico, usados no modelo MZA-FAO, foram necessários valores de capacidade de água disponível do solo (CAD), os quais foram baseados em Driessen e Konijn (1992) e Prado (2014). A Tabela 3.5 apresenta os tipos de solos, suas texturas e as respectivas CADs para cada um dos locais empregados na avaliação dos modelos de simulação. Como os modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane utilizam dados de solo mais complexos, esses dados foram obtidos junto ao banco de dados RadamBrasil (BRASIL, 1981) e WISE (*World Inventory of Soil Emission Potentials*) (BATJES et al., 1995; GIJSMAN et al., 2007), buscando-se características similares ao tipo de solo informado.

Tabela 3.5 – Localidades em que foram obtidos os dados de produtividade da cana-de-açúcar, com seus respectivos tipos de solo, textura, capacidade de água disponível (CAD, em mm m^{-1}) e fonte dos dados

Localidade	Tipo de solo	Textura	CAD (mm m^{-1})	Fonte
Piracicaba, SP	Argissolos e Cambissolos	Média	80	Parceiro
Bariri, SP	Latossolo	Média	80	NETAFIM
Catanduva, SP	Latossolo	Argilosa	130	NETAFIM
Igaraçu do Tietê, SP	Latossolo	Argilosa	130	NETAFIM
Mineiros do Tietê, SP	Latossolo	Média	80	NETAFIM
Taquaritinga, SP	Neossolo Quartzarênico	Arenosa	30	NETAFIM
Iturama, MG	Argissolo	Média	80	NETAFIM
Jaíba, MG	Argissolo	Média	80	NETAFIM
Maracaju, MS	Latossolo	Média	80	Parceiro
Bom Jesus de Goiás, GO	Latossolo	Média	80	Usina Goiasa
Juazeiro, BA	Vertissolo	Argilosa	130	NETAFIM
Capim, PB	Neossolo Quartzarênico	Arenosa	27	Usina Japungu
Mamanguape, PB	Latossolo	Médio-arenosa	55	NETAFIM
Santa Rita, PB	Neossolo Quartzarênico	Arenosa	30	NETAFIM
Campo Alegre, AL	Latossolo	Média-arenosa	55	NETAFIM
Teotonio Vilela, AL	Argissolo	Média-arenosa	55	NETAFIM

Para avaliar o desempenho dos modelos, foram utilizados os seguintes indicadores estatísticos: raiz quadrada do erro médio (RQEM); erro absoluto médio (EAM) e seu percentual (EAMP); coeficiente de determinação (R^2); e índice de acurácia (d) (WILLMOTT, 1985).

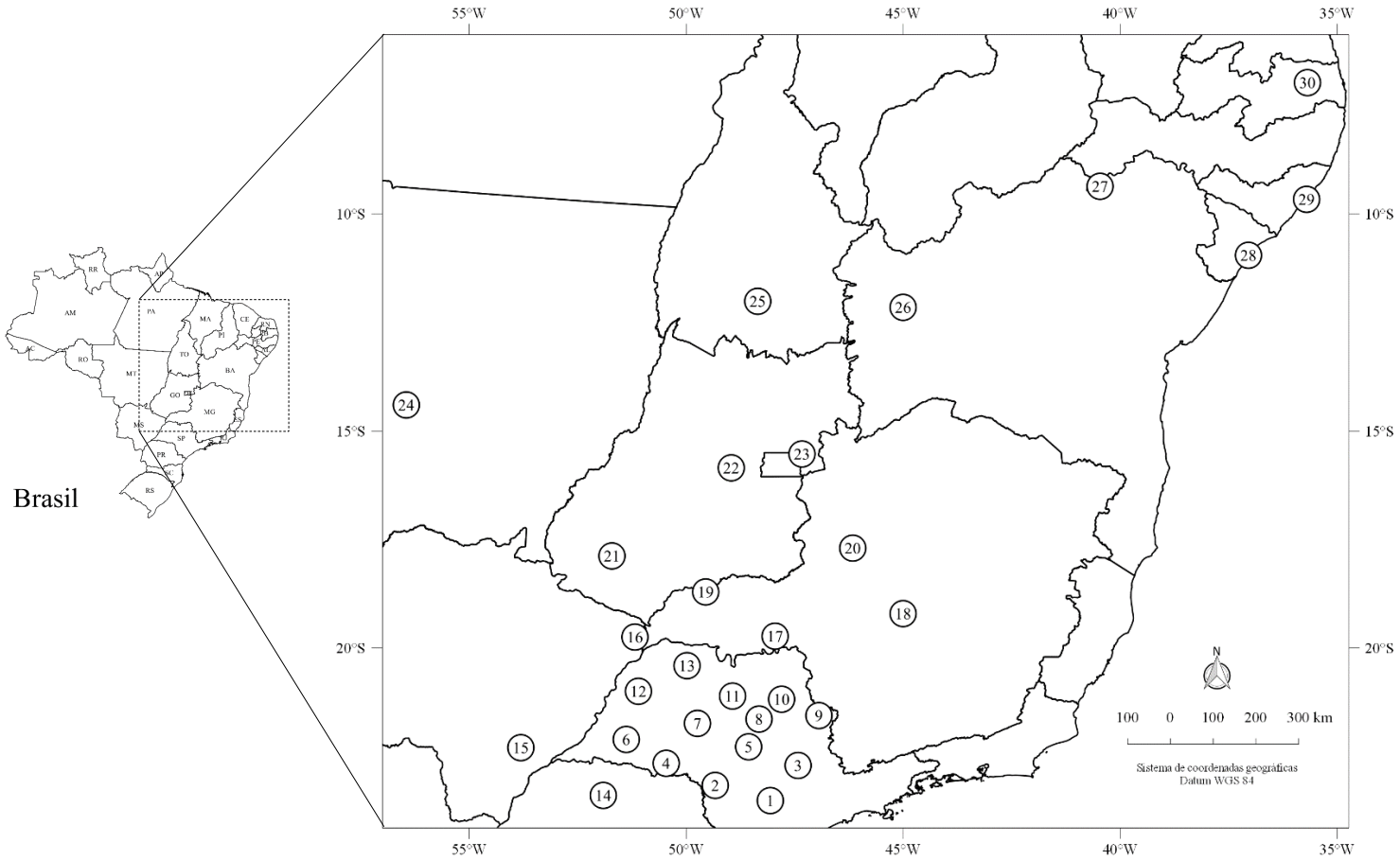
Além da avaliação dos modelos separadamente, foi realizada uma análise conjunta deles, denominada de *Ensemble*, por meio da média das produtividades estimadas pelos três modelos, com intuito de se minimizar as incertezas da produtividade de colmos estimada quando comparada aos valores observados a campo. Para esta análise, os mesmos indicadores estatísticos apresentados acima foram empregados.

3.2.3 Quebra de produtividade

A distribuição dos locais em que se avaliou a quebra de produtividade da cana-de-açúcar, em toneladas de colmos por hectare (t ha^{-1}), é apresentada na Figura 3.3. Os dados de PR de colmos da cultura da cana-de-açúcar para as diferentes localidades foram obtidos junto ao banco de dados de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016) para os anos de 1993 a 2012, correspondendo às safras de 1994/95 a 2013/14, totalizando 20 anos de dados. Essa quantidade de anos para o cálculo das quebras de

produtividade é considerada suficiente de acordo com a recomendação da literatura (VAN ITTERSUM et al, 2013; GRASSINI et al., 2015; VAN BUSSEL et al., 2015). Para cada local considerado, o dado de produtividade de cada ano foi a média dos dados dessa localidade e dos municípios limítrofes, situados na mesma microrregião, desde que apresentassem séries históricas maiores do que 10 anos. Esse procedimento foi adotado para que discrepâncias observadas na série de dados fossem minimizadas. A relação dos municípios utilizados pode ser encontrada no ANEXO A. Para locais com claro incremento de produtividade ao longo das safras, a tendência tecnológica da produtividade da cana-de-açúcar foi removida, conforme procedimento utilizado por Heinemann e Sentelhas (2011).

Os dados meteorológicos de cada localidade (temperaturas máxima e mínima do ar, precipitação, radiação solar global ou insolação) foram obtidos das estações meteorológicas do INMET, INPE, CIIAGRO, ANA e ESALQ-USP. Quando da ausência de dados de radiação solar global, essa variável foi estimada a partir do método de Angström-Prescott, quando os dados de insolação estavam disponíveis, ou pelo método de Hargreaves, quando haviam apenas dados de temperatura do ar, conforme recomendações de Allen et al. (1998). As falhas de temperatura nas séries de dados foram corrigidas da seguinte forma: i) falhas menores ou iguais a três dias - interpolação linear entre os dados dos dias anterior e posterior ao período faltante; e ii) falhas maiores do que três dias - preenchimento com dados do sistema NASA/POWER (http://power.larc.nasa.gov). As poucas falhas de chuva foram preenchidas com dados das estações pluviométricas da ANA, adotando-se o critério da estação mais próxima. A Tabela 3.6 apresenta as coordenadas geográficas de cada local, a fonte dos dados meteorológicos dessas localidades e uma breve caracterização agroclimática, em função dos valores anuais médios de temperatura do ar, chuva, deficiência hídrica e excedente hídrico.



Nº	Local
1	Itapetininga, SP
2	Manduri, SP
3	Piracicaba, SP
4	Assis, SP
5	Jaú, SP
6	Presidente Prudente, SP
7	Lins, SP
8	Matão, SP
9	São José do Rio Pardo, SP
10	Ribeirão Preto, SP
11	Catanduva, SP
12	Andradina, SP
13	Votuporanga, SP
14	Maringá, PR
15	Ivinhema, MS
16	Paranaíba, MS
17	Uberaba, MG
18	Pompéu, MG
19	Capinópolis, MG
20	João Pinheiro, MG
21	Jataí, GO
22	Pirenópolis, GO
23	Formosa, GO
24	Diamantino, MT
25	Peixe, TO
26	Barreiras, BA
27	Petrolina, PE
28	Aracaju, SE
29	Maceió, AL
30	Areia, PB

Figura 3.3 – Distribuição das localidades empregadas no estudo da quebra de produtividade da cultura da cana-de-açúcar no Brasil

Tabela 3.6 – Localidades empregadas no estudo da quebra de produtividade da cultura da cana-de-açúcar no Brasil e suas respectivas coordenadas geográficas, altitude, temperatura média anual (Tmed), precipitação pluviométrica anual média (P), deficiência hídrica anual média (DH) e excedente hídrico anual médio (EXC)

Local	Latitude	Longitude	Altitude	Tmed	P	DH[1]	EXC[1]
	(graus e décimos)		(m)	(ºC)	(mm)		
Itapetininga, SP	-23,52	-48,06	712	20,9	1315	319	478
Manduri, SP	-23,17	-49,33	589	21,1	1477	414	534
Piracicaba, SP	-22,71	-47,42	580	22,3	1342	469	425
Assis, SP	-22,66	-50,46	515	21,8	1423	457	482
Jaú, SP	-22,28	-48,56	580	22,7	1476	468	563
Presidente Prudente, SP	-22,11	-51,38	436	24,2	1348	550	416
Lins, SP	-21,74	-49,74	480	24,1	1259	539	440
Matão, SP	-21,64	-48,32	613	23,5	1343	493	525
São José do Rio Pardo, SP	-21,56	-46,94	720	23,1	1588	387	655
Ribeirão Preto, SP	-21,18	-47,80	621	23,0	1451	510	587
Catanduva, SP	-21,11	-48,93	570	24,4	1223	639	377
Andradina, SP	-21,00	-51,10	400	24,6	1201	599	367
Votuporanga, SP	-20,41	-49,98	503	24,6	1342	653	436
Maringá, PR	-23,40	-51,91	542	23,0	1649	402	606
Ivinhema, MS	-22,30	-53,81	369	24,3	1498	500	477
Paranaíba, MS	-19,75	-51,18	331	25,1	1400	664	505
Uberaba, MG	-19,73	-47,95	737	23,4	1643	599	704
Pompéu, MG	-19,21	-45,00	691	23,5	1247	738	502
Capinópolis, MG	-18,71	-49,55	621	25,0	1442	747	557
João Pinheiro, MG	-17,70	-46,16	760	24,0	1362	833	559
Jataí, GO	-17,88	-51,71	663	23,9	1609	551	691
Pirenópolis, GO	-15,85	-48,96	740	24,3	1677	634	793
Formosa, GO	-15,53	-47,33	935	23,1	1359	779	574
Diamantino, MT	-14,40	-56,45	286	26,4	1927	545	1009
Peixe, TO	-12,01	-48,35	242	27,4	1439	857	597
Barreiras, BA	-12,15	-45,00	439	25,9	970	984	302
Petrolina, PE	-9,36	-40,46	370	27,3	446	1479	58
Aracaju, SE	-10,95	-37,04	5	26,3	1230	923	363
Maceió, AL	-9,66	-35,70	65	25,4	1718	687	780
Areia, PB	-6,97	-35,68	575	23,6	1385	664	543

[1] Obtido pelo método de Thornthwaite e Mather (1955), com evapotranspiração de referência calculada por Priestley e Taylor (1972) e capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm, na escala de cálculo diária

Como foram utilizadas 30 localidades, em diferentes regiões do país, nem sempre os perfis de solos, requeridos pelos modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane, estavam disponíveis. Desse modo, foram definidos três tipos de solos que pudessem representar diferentes condições de disponibilidade hídrica. Esses solos foram obtidos junto à base WISE.

Para representar um solo com baixa disponibilidade hídrica, foi utilizado o perfil de um Neossolo Quartzarênico, com disponibilidade hídrica de 0,56 mm água cm^{-1} de solo. Já para um solo com média disponibilidade hídrica, foi utilizado um perfil de um Latossolo de textura média, com 0,88 mm cm^{-1}. Por fim, um perfil de Latossolo de textura muito argilosa, com 1,51 mm cm^{-1}, foi utilizado para representar um solo de alta disponibilidade hídrica. A Tabela 3.7 apresenta as principais características físico-hídricas dos três solos utilizados neste estudo. No caso do modelo MZA-FAO, o qual utiliza apenas o valor da CAD, foram utilizados 56, 88 e 151 mm lo para representar respectivamente os solos com baixa, média e alta disponibilidade hídrica. Os valores do número da curva (do inglês, *Curve Number*) foram 61 para o Neossolo Quartzarênico, e 76 para os Latossolos. Os valores de albedo do solo foram 0,14 para o Neossolo Quartzarênico, e 0,13 para os Latossolos. Os valores da taxa de drenagem do solo foram 0,4, para o Neossolo Quartzarênico e o Latossolo de textura muito argilosa, enquanto que para o Latossolo de textura média o valor utilizado foi 0,6.

No caso do modelo DSSAT/CANEGRO é necessário inserir o fator de enraizamento, o qual pode ser encontrado para cada tipo de solo e suas camadas na Tabela 3.8. Tal fator determina o crescimento das raízes em cada camada do solo e é calculado pelo DSSAT de acordo com as características físico-hídricas de cada perfil. O modelo CANEGRO usa esse fator para particionar a biomassa destinada às raízes em cada camada do perfil do solo. Desse modo, o crescimento das raízes está diretamente relacionado a este fator, o que irá influenciar o potencial de absorção de água da planta e, portanto, a penalização da produtividade pela deficiência hídrica. No caso do modelo APSIM, a fração da água disponível que pode ser extraída por dia foi considerada como sendo 0,1, 0,08, 0,06, 0,04, 0,02 e 0,01 mm dia^{-1} para as camadas 0-30, 30-60, 60-90, 90-120, 120-150 cm ou mais de profundidade, respectivamente (INMAN-BAMBER et al., 2000; APSIM, 2014).

Como não se dispunha de informações do tipo e características físico-hídricas dos solos de cada localidade estudada, foi realizada uma avaliação visando a determinar a proporção de solos com baixa, média e alta disponibilidade hídrica para cada uma delas. Por meio de um Sistema de Informações Geográficas (QuantumGis®) foi realizado um “buffer” de 100 km em torno da localização geográfica das estações de estudo junto ao mapa de solos de textura do RadamBrasil (BRASIL, 1981) para verificar quais os tipos de solos existentes e determinar, a partir daí, a proporção de solos com baixa, média e alta disponibilidade hídrica. A proporção das classes de disponibilidade hídrica para cada localidade é apresentada na Tabela 3.9

Tabela 3.7 – Características físico-hídricas dos solos empregados neste estudo com baixa (Neossolo Quartzarênico), média (Latossolo de textura média) e alta (Latossolo de textura muito argilosa) disponibilidade hídrica

Prof.	Horiz.	Areia	Silte	Argila	Ds[1]	PMP[2]	CC[3]	θs[4]	Ksat[5]	CAD[6]
(cm)	-	-------- (%) ---------			(g cm^{-3})	------ (cm^3 cm^{-3}) ------			(cm h^{-1})	(mm)
				Neossolo Quatzarênico						
0-6	Ah_1	93	4	3	1,40	0,028	0,111	0,430	31,38	5,0
0-19	Ah_2	95	3	2	1,48	0,025	0,093	0,408	43,05	8,8
19-50	Ah_3	96	2	2	1,46	0,020	0,070	0,410	40,45	15,5
50-75	AC	96	2	2	1,53	0,021	0,090	0,394	43,40	17,3
75-150	C	94	3	3	1,57	0,030	0,080	0,360	51,92	37,5
				Latossolo de textura média						
0-28	Ah	82	3	15	1,55	0,040	0,171	0,378	5,95	36,7
28-56	BA_1	76	4	20	1,38	0,100	0,180	0,420	8,41	22,4
56-85	BA_2	75	5	20	1,32	0,100	0,180	0,420	9,85	23,2
85-165	Bw	72	5	23	1,36	0,110	0,190	0,420	7,54	64,0
				Latossolo de textura muito argilosa						
0-30	A	16	8	76	1,14	0,256	0,405	0,541	0,45	44,7
30-60	BA	12	11	77	1,21	0,236	0,388	0,519	0,45	45,6
60-150	Bw	13	10	77	1,26	0,236	0,388	0,507	0,38	136,8

[1] Densidade do solo; [2] Ponto de murcha permanente (-1500 kPa); [3] Capacidade de campo (-10 kPa); [4] Ponto de saturação medido; [5] Condutividade hidráulica saturada; [6] Capacidade de água disponível

Tabela 3.8 – Fator de enraizamento dos solos empregados neste estudo, considerando-se baixa (Neossolo Quartzarênico), média (Latossolo de textura média) e alta (Latossolo de textura muito argilosa) disponibilidade hídrica

Neossolo Quatzarênico		Latossolo de textura média		Latossolo de textura muito argilosa	
Prof. (cm)	Fator	Prof. (cm)	Fator	Prof. (cm)	Fator
0-6	1	0-28	1	0-30	1
0-19	1	28-56	0,43	30-60	0,41
19-50	0,5	56-85	0,24	60-150	0,12
50-75	0,29	85-165	0,08	-	-
75-150	0,08	-	-	-	-

Tabela 3.9 – Proporção de solos com baixa, média e alta disponibilidade hídrica para as localidades empregadas no estudo de quebra de produtividade da cana-de-açúcar no Brasil

Local	Disponibilidade hídrica dos solos		
	Baixa	Média	Alta
Itapetininga, SP	0,14	0,49	0,37
Manduri, SP	0,16	0,50	0,34
Piracicaba, SP	0,16	0,44	0,40
Assis, SP	0,08	0,46	0,46
Jaú, SP	0,17	0,47	0,36
Presidente Prudente, SP	0,15	0,54	0,31
Lins, SP	0,21	0,66	0,13
Matão, SP	0,11	0,47	0,42
São José do Rio Pardo, SP	0,14	0,46	0,41
Ribeirão Preto, SP	0,17	0,47	0,36
Catanduva, SP	0,11	0,89	0,00
Andradina, SP	0,15	0,53	0,32
Votuporanga, SP	0,00	0,64	0,36
Maringá, PR	0,16	0,43	0,41
Ivinhema, MS	0,00	0,00	1,00
Paranaíba, MS	0,03	0,55	0,42
Uberaba, MG	0,00	0,50	0,50
Pompéu, MG	0,00	0,57	0,43
Capinópolis, MG	0,00	0,57	0,43
João Pinheiro, MG	0,17	0,47	0,36
Jataí, GO	0,17	0,47	0,36
Pirenópolis, GO	0,00	0,57	0,43
Formosa, GO	0,00	0,47	0,53
Diamantino, MT	0,51	0,37	0,12
Peixe, TO	0,13	0,49	0,37
Barreiras, BA	0,17	0,47	0,36
Petrolina, PE	0,21	0,57	0,22
Aracaju, SE	0,22	0,62	0,16
Maceió, AL	0,49	0,51	0,00
Areia, PB	0,53	0,47	0,00

Como os modelos foram avaliados com dados operacionais e em ótimas condições de manejo, o valor obtido foi considerado como o máximo econômico explorável para as regiões, seguindo abordagem de van Ittersum et al. (2013). As PI_O e PS_O foram, assim, assumidas como sendo equivalentes à PP e à PA, respectivamente. Dessa forma, foram obtidos nas simulações valores próximos à produtividade potencial (PI_O) e atingível (PS_O) da cultura da cana-de-açúcar, seguindo abordagem discutida no item 3.1. Como no estudo os dados de

produtividade do IBGE foram provenientes de locais sem irrigação, a PS_D foi considerada como a PR. Foi assumida uma situação de manejo ótimo, portanto, não há perda de produtividade ao longo dos sucessivos cortes e o valor estimado corresponde à média de um canavial de mais ou menos cinco a seis cortes.

Para cada modelo (MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane), local e tipo de solo (baixa, média e alta disponibilidade hídrica) foram simuladas canas de 12 meses, com plantios no primeiro dia de cada mês. A PP e a PA foram obtidas por meio da média dos valores estimados pelos três modelos (MZA-FAO, DSSAT-CANEGRO e APSIM-Sugarcane), procedimento adotado visando reduzir as incertezas associadas às simulações individuais de cada modelo.

Para Aracaju, SE, Areia, PB e Maceió, AL foram consideradas as canas colhidas de setembro a março, visto que os meses mais chuvosos se concentram no outono e inverno no litoral nordestino. Para as demais localidades foram consideradas canas colhidas de abril a dezembro, período que corresponde à safra regular da cana-de-açúcar. Foi utilizada a mesma proporção de cana para cada mês de colheita, assim sendo, o valor estimado final foi considerado como a média aritmética dos meses de colheita considerados. Após essa etapa, foi realizada a ponderação mediante proporção de cada tipo de solo e obtido o valor final de PP e PA.

A quebra de produtividade foi determinada conforme discutido no item 3.1, em que a quebra de produtividade total (Q_T) foi determinada como sendo a diferença entre PP e PR. Já a quebra devido à deficiência hídrica (Q_{DH}) foi determinada pela diferença entre PP e PA, enquanto que a quebra devido ao déficit de manejo agrícola (Q_M) foi determinada pela diferença entre PA e PR. Nos casos em que PA foi menor do que a PR, a Q_M foi considerada como sendo nula. Esse tipo de problema pode ser decorrente de falhas nos dados meteorológicos ou nos dados de produtividade real. As safras de 2011/12 a 2013/14 para João Pinheiro, MG, de 2008/09 a 2013/14 para Jataí, GO, e de 2009/10 a 2013/14 para Formosa, GO, não entraram nos cálculos da quebra de produtividade, devido à clara evidência de uso de irrigação nessas áreas. Os gráficos da variabilidade interanual da PP, PA e PR para as 30 localidades estudadas ao longo da série histórica estão nos ANEXOS B a G.

Inferências sobre as principais causas da quebra de produtividade da cana-de-açúcar, devido ao manejo agrícola, foram feitas. Embora os aspectos sócio-político-econômicos exerçam influência na quebra de produtividade, estes não foram abordados. Possíveis

soluções para minimizar as quebras de produtividade da cana-de-açúcar no Brasil, tanto em termos da deficiência hídrica como de manejo agrícola, foram discutidas.

3.4 Resultados e Discussão

3.3.1 Avaliação dos modelos de simulação

A Figura 3.4 apresenta os resultados da comparação entre a produtividade observada e a estimada pelos modelos para diferentes locais, épocas de plantio e sistemas de manejo (sequeiro e irrigado). Os resultados da avaliação dos modelos MZA-FAO (Figura 3.4a), DSSAT/CANEGRO (Figura 3.4b) e APSIM-Sugarcane (Figura 3.4c) apresentaram desempenho satisfatório, ou seja, boa precisão ($R^2 > 0,77$) e acurácia ($d > 0,91$). Os valores de EAM e RQEM foram inferiores a 20 e 25 t ha^{-1}, respectivamente. O EAMP ficou abaixo de 21% para todos os modelos. Os valores de d e RQEM obtidos são similares aos obtidos em outros trabalhos realizados no Brasil, para condições experimentais, com os modelos DSSAT/CANEGRO (NASSIF et al., 2012; MARIN et al., 2011, 2013, 2015; MARIN, 2014), APSIM-Sugarcane (MARIN et al., 2013, 2015; MARIN, 2014; COSTA et al., 2014), SWAP-WOFOST (SCARPARE, 2011) e STC (MARIN, 2014). Todavia, a precisão, no geral, foi inferior à encontrada para alguns trabalhos da literatura citada acima (COSTA et al., 2014; MARIN et al., 2013, 2015; MARIN, 2014), o que pode estar relacionado à natureza dos dados utilizados na avaliação (condições operacionais) e pelo fato de terem sido usados apenas os dados obtidos no momento da colheita da cultura.

A abordagem multimodelos propiciou redução do RQEM e EAM e, por consequência, redução do EAMP, o qual ficou abaixo de 14% (Figura 3.4d). A precisão e acurácia também melhoraram nessa abordagem, com $R^2 = 0,83$ e $d = 0,95$. O melhor resultado obtido com a abordagem multimodelos corrobora os recentes resultados encontrados para culturas anuais no mundo (PALOSUO et al., 2011; RÖTTER et al., 2012; ASSENG et al., 2013; BASSU et al., 2014; LI et al., 2015; MARTRE et al., 2015; FLEISHER et al., 2016) e no Brasil (BATTISTI; SENTELHAS, 2016), assim como os resultados obtidos para a cana-de-açúcar no Brasil (MARIN et al., 2015). Marin et al. (2015) avaliando os modelos DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane para cana planta em diversos experimentos no Brasil encontraram RQEM de 18,27 e 20,09 t ha^{-1}, respectivamente, enquanto que utilizando a médias dos valores simulados pelos dois modelos o RQEM foi reduzido para 18,01 t ha^{-1}. Esses resultados confirmam a importância da abordagem multimodelos em estudos para a avaliação de riscos climáticos na agricultura.

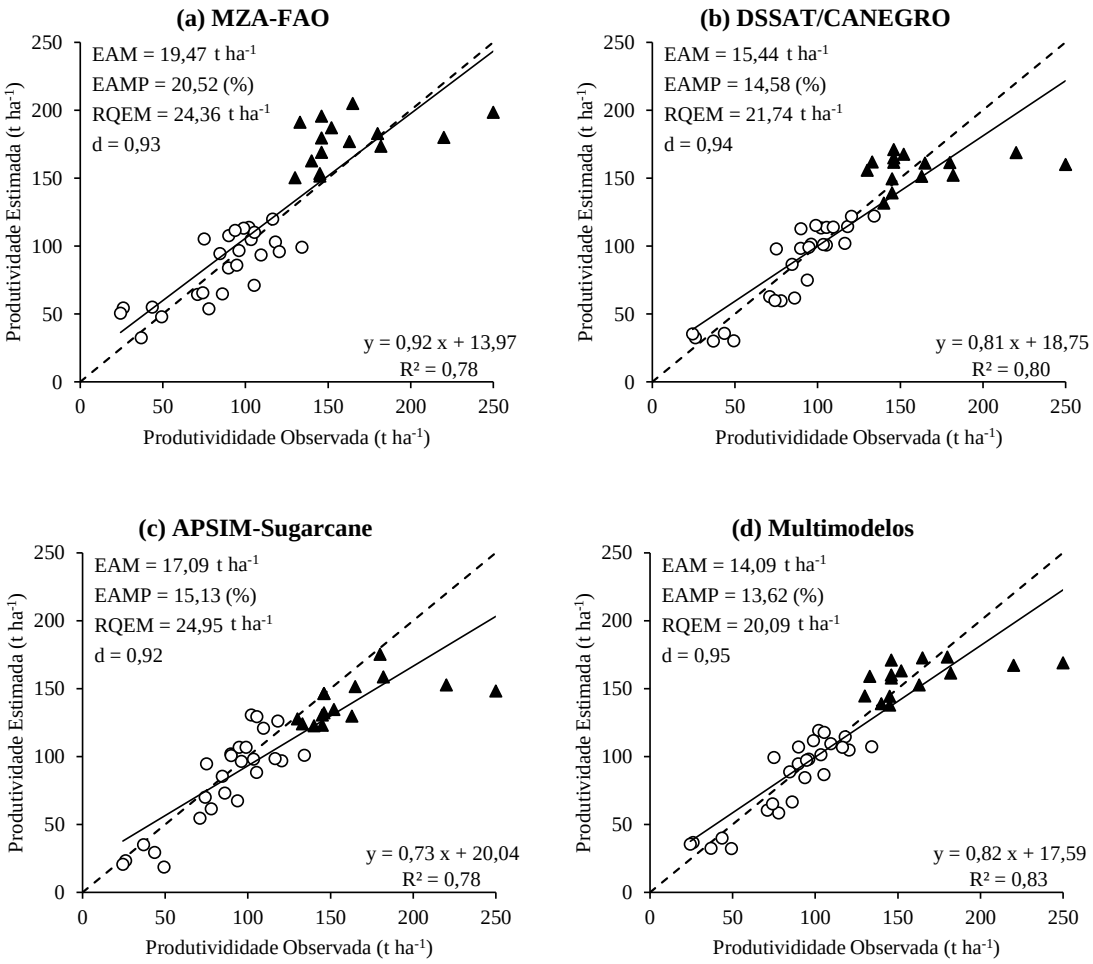


Figura 3.4 – Relação entre a produtividade de colmos observada e estimada pelos modelos MZA-FAO (a), DSSAT/CANEGRO (b), APSIM-Sugarcane (c) e utilizando abordagem multimodelos (d) para cana planta de 12 meses em diversas localidades brasileiras. Dados provenientes da cultura em condições de sequeiro (○) e irrigada (▲)

3.3.2 Quebra de produtividade: magnitude e causas

As probabilidades de ocorrência dos diferentes níveis de produtividade de colmos (PP, PA e PR) para as 30 localidades e 20 anos de estudo são apresentadas na Figura 3.5a. Em 50% dos anos, a PP foi superior a 195 t ha^{-1}. Em 20% dos anos, a PP e a PA foram superiores a 204 e 120 t ha^{-1}, respectivamente.

A PP média dos locais do centro-sul e norte/nordeste do país foram 189 e 209 t ha^{-1}, respectivamente (Tabela 3.10). Os menores valores de PP (< 170 t ha^{-1}) foram encontrados nas regiões mais frias, como Itapetininga e Manduri, SP, enquanto que os maiores valores (> 210 t ha^{-1}) foram obtidos em Petrolina, PE, Aracaju, SE e Maceió, AL (Figura 3.6), onde altas temperaturas e radiação solar incidente ao longo do ciclo resultam em maiores taxas de fotossíntese e, portanto, maior acúmulo de biomassa.

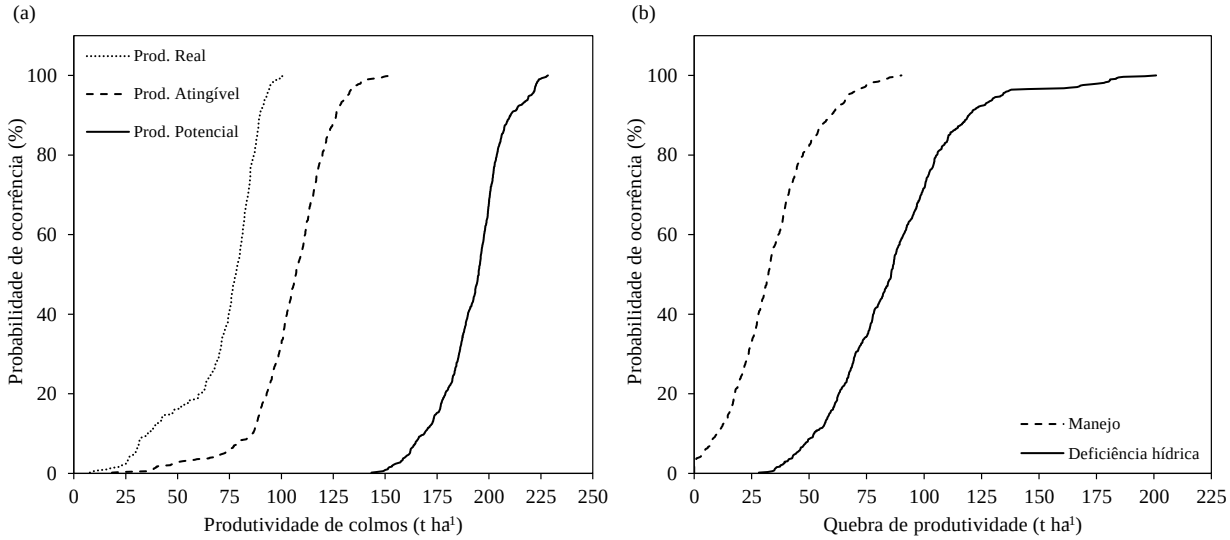


Figura 3.5 – Probabilidade acumulada de ocorrência das produtividades real, atingível e potencial (a) e dos fatores causadores da quebra de produtividade (b) da cana-de-açúcar para 30 localidades estudadas no Brasil

A PP para as principais regiões produtoras do estado de São Paulo é da ordem de 170 a 210 t ha^{-1} (Figura 3.6 e Tabela 3.10), valores que são similares aos encontrados em experimentos com irrigação plena realizados em Pradópolis, SP (GUAZZELI; PAES, 1997), Botucatu, SP (DALRI et al., 2008) e em Jaú, SP (GAVA et al., 2011; SILVA et al., 2014). Para regiões onde a cultura da cana-de-açúcar tem se expandido, como nos estados de Goiás, Tocantins e sudoeste da Bahia, a PP é da ordem de 190 a 210 t ha^{-1}. Produtividades de colmos variando de 145 a 193 t ha^{-1} para as cultivares RB85-5453 e SP80-1816, em segundo corte, foram obtidas em experimentos com irrigação plena em Janaúba, MG, na safra 2010/11, em um solo de média disponibilidade hídrica (Latossolo Vermelho de textura média) (OLIVEIRA et al., 2011a). Tal local tem características agroclimáticas relativamente similares ao sudoeste da Bahia. Em recente estudo, Araújo et al. (2016) encontraram produtividade de colmos para a cultivar CTC4 de cerca de 172 t ha^{-1} em cana irrigada em Santo Antônio de Goiás, GO, na safra 2014/15, sendo esta cultivada em solo de média disponibilidade hídrica (Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média). Em experimento realizado no litoral de do estado de Pernambuco com diversas cultivares na safra 2007/08, foram encontradas produtividades de colmos para cana planta de 17 meses variando de 155 a 255,6 t ha^{-1} (OLIVEIRA et al., 2011b), valores próximos aos encontrados para o litoral nordestino neste estudo, apesar das durações dos ciclos terem sido diferentes.

Os resultados da PP do presente estudo são similares aos obtidos por simulações com o modelo MZA-FAO para o estado de São Paulo, realizadas por Monteiro e Sentelhas (2014),

os quais encontraram PP entre 140 e 200 t ha^{-1}, e por Monteiro (2016) que obteve valores entre 140 e 180 t ha^{-1} para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do referido estado. Vianna e Sentelhas (2015) obtiveram valores médios de PP simulados pelo modelo DSSAT/CANEGRO variando de 137 a 170 t ha^{-1}, para boa parte dos locais de estudo.

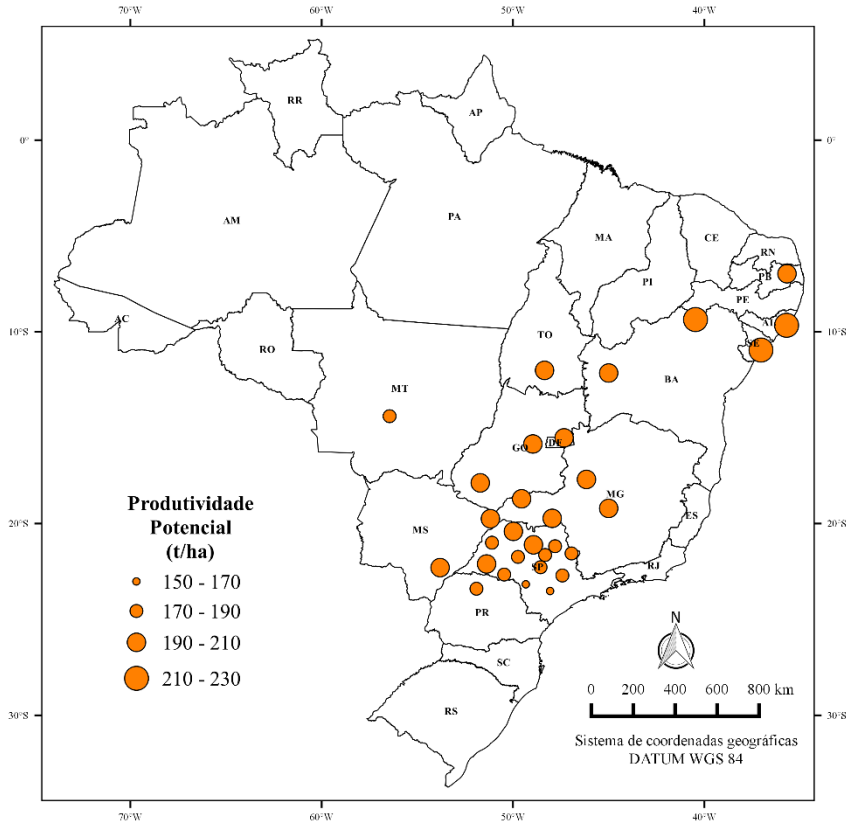


Figura 3.6 – Produtividade potencial média de colmos de cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras do Brasil, para o período de 1993 a 2012, simulada pela combinação dos modelos de simulação MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane

A PA, por outro lado, é maior nas regiões de maior latitude, o que está associado geralmente à menor deficiência hídrica, o que resulta das menores taxas de evapotranspiração, e aos solos com maior disponibilidade hídrica (Figura 3.7 e Tabela 3.6). A PA média dos locais do centro-sul e norte/nordeste do país foram, respectivamente, 110 e 87 t ha^{-1} (Tabela 3.10).

As faixas de PA encontradas no presente estudo são similares às produtividades relatadas na literatura em condições experimentais sob cultivo de sequeiro nas regiões centro-leste (GUAZZELI; PAES, 1997; DALRI; CRUZ; 2002; COSTA et al., 2007; VITTI et al., 2007; GAVA et al., 2011; SILVA, 2008; SILVA et al., 2008; AMBROSANO et al., 2011;

FERNANDES JUNIOR et al., 2013; FORTES et al., 2013; CRUSCIOL et al., 2014; CASTRO et al., 2014) e oeste/noroeste (DIAS et al., 1999; MAULE et al., 2001; BENETT et al., 2011; ZAMBROSI, 2011; FERNANDES JUNIOR et al., 2013) do estado de São Paulo e nos estados do Paraná (AQUINO; MEDINA, 2014; AQUINO et al., 2015), Pernambuco (OLIVEIRA et al., 2011a; SOUZA et al., 2011), Alagoas (ABREU et al., 2013; TEODORO et., 2015) e Paraíba (SILVA et al., 2013).

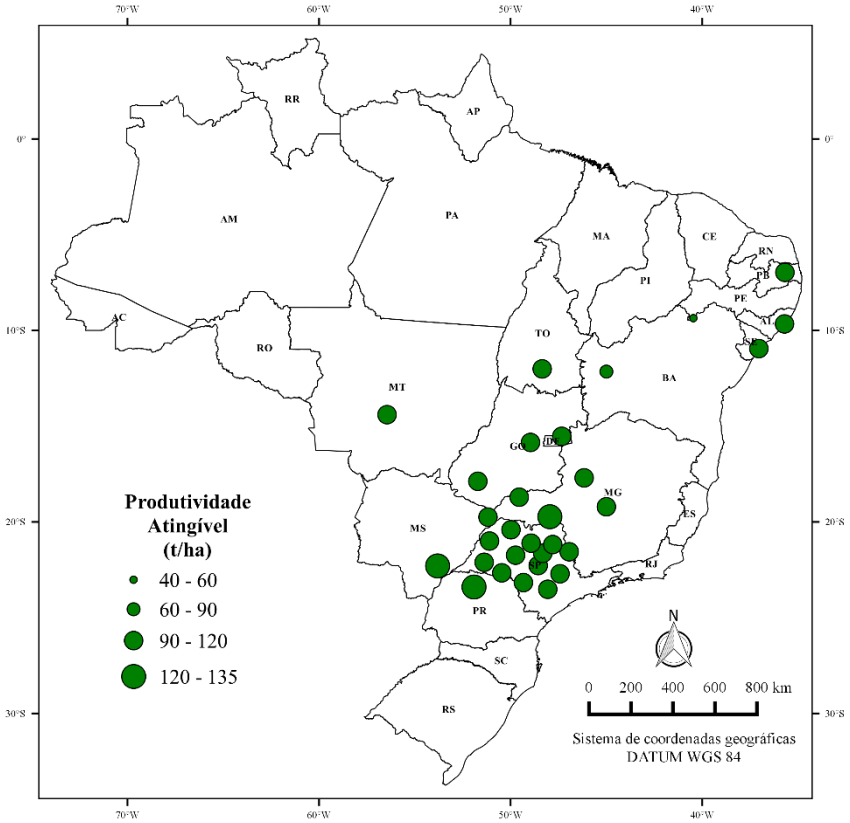


Figura 3.7 – Produtividade atingível média de colmos de cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras do Brasil, para o período de 1993 a 2012, simulada pela combinação dos modelos de simulação MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane

A PR se mostrou bastante variável entre os locais de estudo (Figura 3.8 e Tabela 3.10), em função das condições de clima, de solo e especialmente das práticas de manejo. Para as principais regiões produtoras do estado de São Paulo e regiões limítrofes, a PR é da ordem 65 a 95 t ha^{-1}. Na média, a PR dos locais do centro-sul e norte/nordeste do país são da ordem de 78 e 43 t ha^{-1}, respectivamente. Os maiores valores de PR (acima de 85 t ha^{-1}) são encontrados em Andradina, Manduri e Catanduva, SP, Uberaba, MG e Pirenópolis, GO (Figura 3.8 e Tabela 3.10). Em Andradina, SP, Uberaba, MG, e Pirenópolis, GO, é provável que haja algum

tipo de irrigação nas fases iniciais do canavial, visando minimizar a morte dos toletes ou soqueiras, o que pode estar contribuindo para esses maiores níveis de PR. Os menores valores de PR são encontrados em Petrolina e Areia, PE, e nas áreas de expansão da cultura da cana-de-açúcar, como Peixe, TO, Barreiras, BA e Formosa, GO (Figura 3.8 e Tabela 3.10).

As probabilidades de ocorrência das causas da quebra de produtividade da cultura da cana-de-açúcar (Q_{DH} e Q_M) para as 30 localidades e 20 anos de estudo são apresentadas na Figura 3.5b. Em 50% dos anos, a Q_{DH} é da ordem de 86 t ha^{-1}, enquanto que a Q_M é bem inferior, sendo de aproximadamente 32 t ha^{-1}. Em 20% dos anos, a Q_{DH} e a Q_M foram superiores a 105,6 e 47,3 t ha^{-1}, respectivamente.

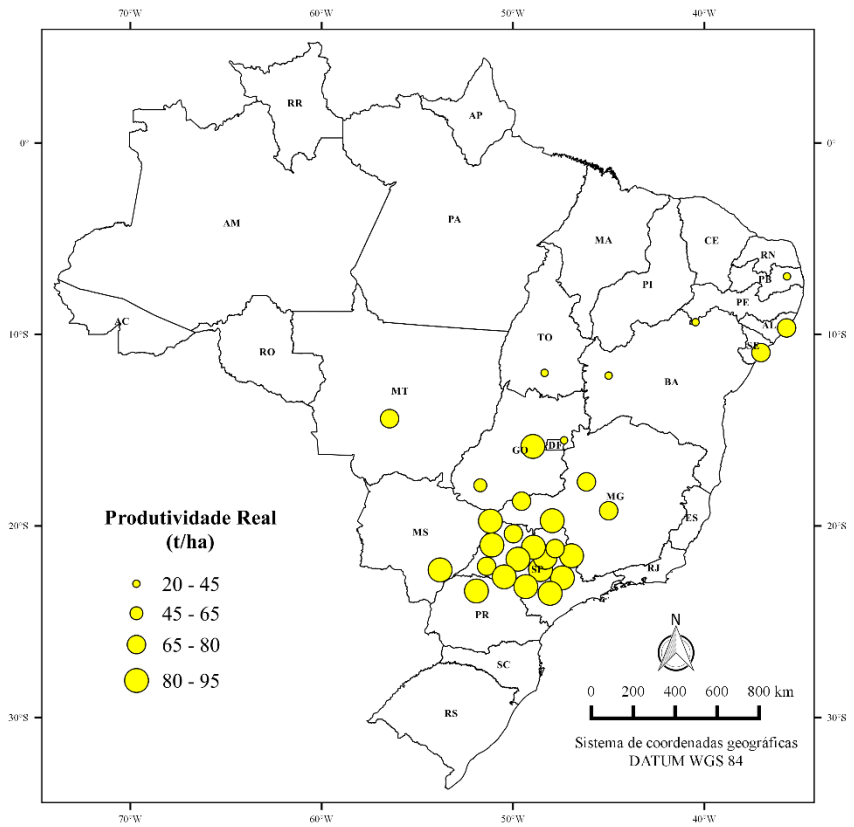


Figura 3.8 – Produtividade real média de colmos de cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras do Brasil, considerando-se o banco de dados do IBGE para o período de 1993 a 2012

A Figura 3.9 apresenta a variabilidade da Q_{DH} entre os locais avaliados. O maior valor de Q_{DH} é encontrado na região de Petrolina, PE, onde deficiência hídrica média anual é de 1479 mm (Tabela 3.6) e a quebra da produtividade de colmos média é de 178 t ha^{-1} (Tabela 3.10). Os valores obtidos são similares aos de Monteiro (2016), que obteve Q_{DH} entre 160 e 170 ha^{-1} para essa mesa região. As menores Q_{DH} foram obtidas nas regiões leste e sul do

estado de SP, em Maringá, PR, e Ivinhema, MS, locais com menor PP e deficiência hídrica. Nos demais locais de estudo, a Q_{DH} variou de 55 a 127 t ha^{-1} (Tabela 3.10). A magnitude da Q_{DH} é dependente do clima de cada região, sua variabilidade interanual, e do tipo de solo, os quais definem a magnitude e a duração do período com deficiência hídrica aos quais a cultura da cana-de-açúcar fica exposta, aspectos fundamentais para a produtividade da cana-de-açúcar (ROBERTSON et al., 1999; INMAN-BAMBER, 2004; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

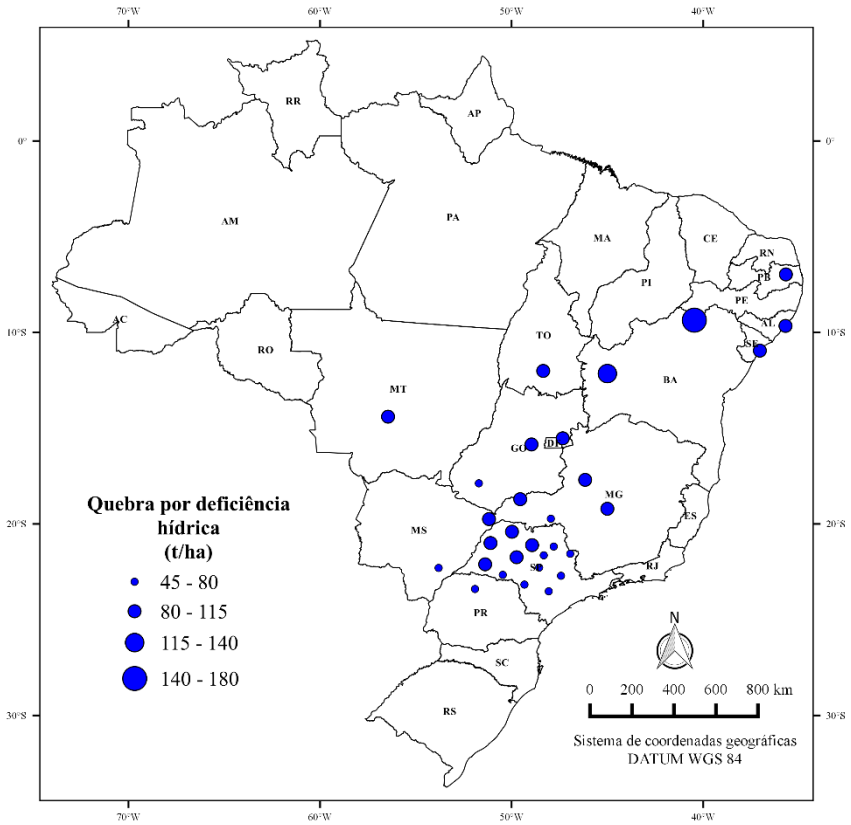


Figura 3.9 – Quebra média de produtividade de colmos de cana-de-açúcar devido à deficiência hídrica nas principais regiões produtoras do Brasil, para o período de 1993 a 2012, sendo PP e PA estimadas pela combinação dos modelos MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane

Além do efeito da deficiência hídrica na produtividade, o efeito das práticas de manejo pode ser obtido pela diferença entre PA e PR. A Figura 3.10 apresenta a variabilidade da Q_M entre os locais analisados. Os maiores valores de Q_M (62 a 72 t ha^{-1}) são encontrados em regiões de recente avanço da cana-de-açúcar, como Jataí e Formosa no estado de GO e Peixe, TO (Tabela 3.10). No estado de SP, a Q_M é da ordem de 8 a 35 t ha^{-1}, sendo que os menores valores de Q_M são encontrados em Catanduva, Andradina e Lins (Tabela 3.10). O valor médio de Q_M = 34 t ha^{-1} encontrado para as condições brasileiras é similar ao que foi determinado

por Monteiro (2016), que obteve 32 t ha^{-1}, porém menor que o relatado por Marin et al. (2016), os quais obtiveram uma Q_M média de 52 t ha^{-1}. Entretanto, no presente estudo não foi levado em consideração a ponderação pela área cultivada.

Tabela 3.10 – Produtividade média de colmos de cana-de-açúcar potencial (PP), atingível (PA) e real (PR) e valores médios da quebra de produtividade devido a deficiência hídrica (Q_{DH}), manejo (Q_M) e total (Q_T), em valores absolutos (t ha^{-1}) e relativos (%) para diferentes localidades do Brasil

Local	PP	PA	PR	Q_{DH}		Q_M		Q_T
	(t ha^{-1})	(t ha^{-1})	(t ha^{-1})	(t ha^{-1})	(%)[1]	(t ha^{-1})	(%)[1]	(t ha^{-1})
Itapetininga, SP	155,6	107,8	83,7	47,8	67,2	24,1	32,8	71,9
Manduri, SP	167,5	116,8	86,3	50,7	62,9	30,5	37,1	81,2
Piracicaba, SP	182,4	112,5	81,7	69,8	69,5	30,9	30,5	100,7
Assis, SP	174,6	118,4	83,4	56,3	61,6	35,0	38,4	91,3
Jaú, SP	181,3	112,2	82,6	69,0	69,7	29,6	30,3	98,6
Presidente Prudente, SP	197,2	111,9	76,8	85,2	71,0	35,1	29,0	120,4
Lins, SP	178,7	94,6	81,0	84,1	87,2	15,7	12,8	97,7
Matão, SP	176,8	103,5	81,4	73,3	77,3	22,0	22,7	95,4
São José do Rio Pardo, SP	173,3	117,8	84,7	55,5	62,0	33,1	38,0	88,6
Ribeirão Preto, SP	181,9	106,6	78,1	75,3	72,7	28,5	27,3	103,7
Catanduva, SP	193,3	94,6	85,3	98,8	91,5	9,8	8,5	108,1
Andradina, SP	184,2	97,6	90,4	86,6	92,3	8,2	7,7	93,8
Votuporanga, SP	199,7	110,9	79,0	88,7	74,2	31,9	25,8	120,6
Maringá, PR	187,8	130,2	81,7	57,6	54,1	48,5	45,9	106,1
Ivinhema, MS	194,7	132,9	80,4	61,8	54,1	52,5	45,9	114,3
Paranaíba, MS	199,8	111,2	80,8	88,6	74,9	30,5	25,1	119,0
Uberaba, MG	197,9	122,1	90,2	75,8	70,3	31,9	29,7	107,7
Pompéu, MG	195,0	90,8	71,5	104,3	84,5	19,6	15,5	123,5
Capinópolis, MG	205,9	108,7	78,7	97,2	76,6	30,0	23,4	127,2
João Pinheiro, MG	209,7	95,1	72,2	114,6	83,8	22,9	16,2	137,5
Jataí, GO	190,4	118,1	55,9	72,2	53,5	62,2	46,5	134,5
Pirenópolis, GO	197,2	115,6	87,3	81,6	74,1	28,3	25,9	109,9
Formosa, GO	201,1	109,0	38,5	92,1	56,6	70,5	43,4	162,7
Diamantino, MT	189,2	95,2	69,6	93,9	78,3	25,6	21,7	119,6
Peixe, TO	203,8	99,9	31,2	103,9	60,2	68,7	39,8	172,6
Barreiras, BA	202,2	75,4	36,4	126,8	76,8	39,0	23,2	165,8
Petrolina, PE	220,4	42,4	21,6	178,0	89,8	21,8	10,2	198,8
Aracaju, SE	222,9	109,4	65,8	113,5	72,1	43,6	27,9	157,1
Maceió, AL	210,1	105,0	67,9	105,1	73,9	37,1	26,1	142,2
Areia, PB	194,6	94,1	37,8	100,5	63,9	56,3	36,1	156,8
Centro/Sul	188,1	109,8	78,4	78,4	71,7	31,5	28,3	109,7
Norte/Nordeste	209,0	87,7	43,5	121,3	72,8	44,4	27,2	165,5
Média Geral	192,3	105,3	71,4	87,0	71,9	34,1	28,1	120,9

[1] Percentual em relação a Q_T

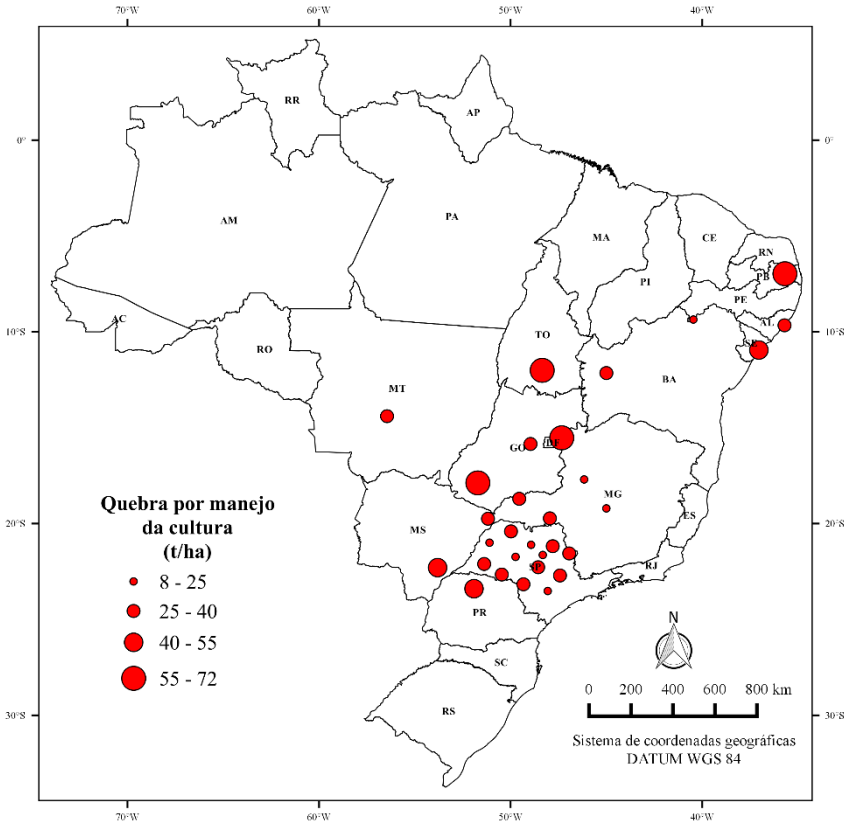


Figura 3.10 – Quebra média de produtividade de colmos de cana-de-açúcar devido ao manejo agrícola nas principais regiões produtoras do Brasil, para o período de 1993 a 2012, sendo PA estimada pela combinação dos modelos de simulação MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane e PR proveniente do banco de dados do IBGE

Analisando a Q_M em termos percentuais em relação a PA, os valores médios encontrados para a região centro-sul e norte-nordeste foram 28% e 51%, respectivamente. A magnitude dos resultados obtidos se enquadra nos encontrados para grandes (23%) e pequenos (53%) produtores na África do Sul por van den Berg e Singels (2013). Para estudos realizados no Brasil, a Q_M média representa cerca de 37% e 39% da PA, segundo dados de Monteiro (2015) e Marin et al. (2016), respectivamente.

Quando os efeitos da deficiência hídrica e das práticas de manejo são analisados de modo conjunto (Figura 3.11 e Tabela 3.10), a porção norte dos estados de Minas Gerais e Goiás e as regiões norte e nordeste apresentam a maior quebra total de produtividade (Q_T), com valores acima de 135 t ha^{-1}. A maior Q_T é encontrada na região de Petrolina, PE, próximo a 200 t ha^{-1} (Tabela 3.10), onde o clima semi-árido impõe sérias restrições ao cultivo da cana-de-açúcar. As regiões tradicionais de cultivo no estado de São Paulo apresentam as menores Q_T, abaixo dos 105 t ha^{-1}, porém, podendo chegar a 120 t ha^{-1} na região noroeste do

estado. Os resultados obtidos são similares em relação aos obtidos por Monteiro (2015), que empregou apenas o modelo MZA-FAO.

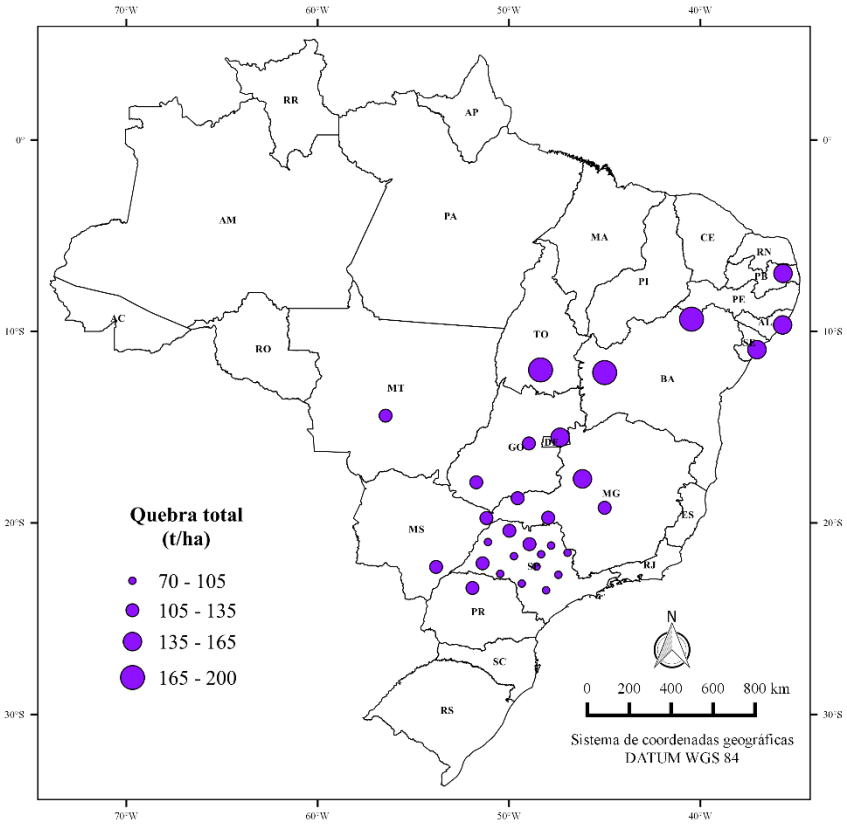


Figura 3.11 – Quebra total média de produtividade de colmos de cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras do Brasil, para o período de 1993 a 2012, sendo PP estimada pela combinação dos modelos de simulação MZA-FAO, DSSAT/CANEGRO e APSIM-Sugarcane e PR proveniente do banco de dados do IBGE

A Figura 3.12 apresenta a relação entre a PP e a Q_T para os 30 locais analisados, durante os 20 anos. A regressão linear mostra uma correlação positiva, em que a PP explica 70% da Q_T. Portanto, quanto maior a PP, maior é a Q_T. Isso está relacionado ao fato de que nos locais com elevado potencial de produção há maior insolação/radiação solar incidente e, portanto, menores volumes de chuva. Tal relação também foi observada por Deihimfard et al. (2015) utilizando o modelo APSIM-Wheat para as principais regiões produtoras da cultura do trigo no Irã.

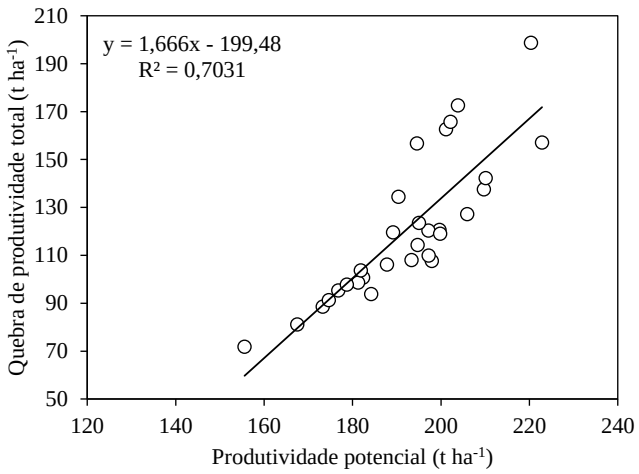


Figura 3.12 – Relação entre a produtividade potencial e a quebra de produtividade total da cana-de-açúcar médias para as 30 localidades brasileiras analisadas neste estudo

Uma visão geral da magnitude da quebra de produtividade de colmos de cana-de-açúcar e a participação, em termos percentuais da Q_T, dos efeitos da deficiência hídrica e das práticas de manejo são apresentadas na Figura 3.13. Em todos os locais analisados, a deficiência hídrica foi a principal causa da perda de produtividade da cultura. Em termos relativos, a deficiência hídrica representa, em média, 72% da Q_T, valor um pouco inferior aos 76% encontrados por Monteiro (2016). A maior participação da deficiência hídrica na quebra de produtividade também foi observada na cultura da soja no Brasil (SENTELHAS et al., 2015).

A participação das práticas de manejo da cultura na Q_T é variável para os locais analisados (Figura 3.13). Em termos relativos, as deficiências de tais práticas levam a uma Q_T média de 28%, valor um pouco superior aos 24% encontrados por Monteiro (2015) para todo o Brasil. Menor participação do manejo agrícola na Q_T é encontrada nos estados de São Paulo e Minas Gerais, o que pode ser explicado pela maior tradição dessas áreas no cultivo da cana-de-açúcar. Em áreas menos tradicionais como Jataí e Formosa, GO, e nos estados do Tocantins e da Bahia o manejo apresenta participação considerável na Q_T, podendo chegar a 46%. Na região Nordeste do Brasil, outra região tradicional no cultivo da cana-de-açúcar, o manejo representa cerca de 30% da Q_T, o que está associado às limitações impostas para o manejo pelas condições edafoclimáticas. Em Maringá, PR, e Ivinhema, MS, locais com elevada PA (Figura 3.7), o manejo tem participação considerável na Q_T (~ 46 t ha^{-1}), já que o déficit hídrico não é o fator limitante para a cultura da cana.

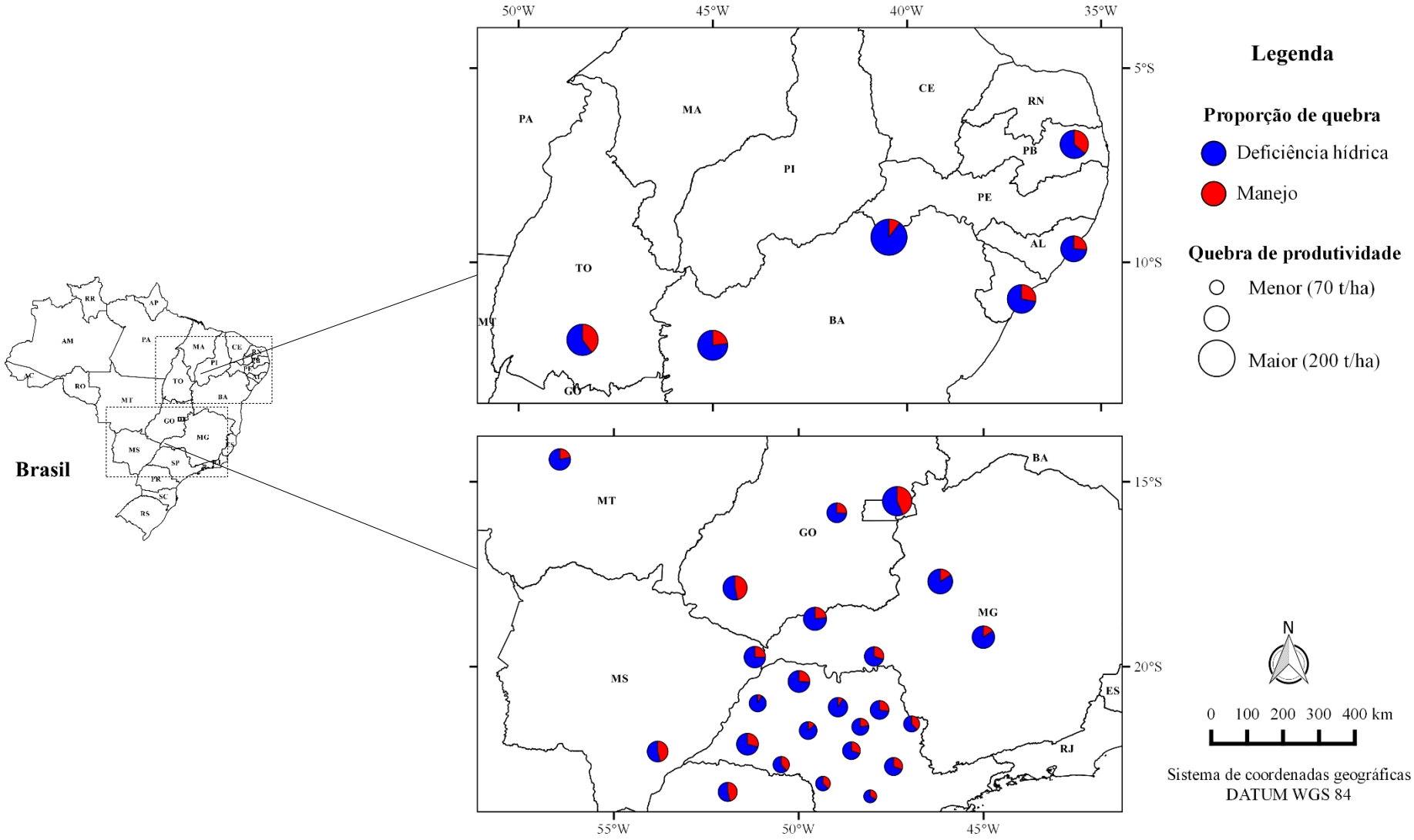


Figura 3.13 – Quebra de produtividade de colmos de cana-de-açúcar em condições de sequeiro e suas principais causas (deficiência hídrica e manejo agrícola) em diversas regiões produtoras do Brasil

Merlos et al. (2015) verificaram que em anos climáticos favoráveis, como em anos de "El Niño", a Q_M tende a ser maior em cultivos anuais (soja, trigo e milho) na Argentina. No entanto, esse comportamento para os sistemas de produção de cana-de-açúcar no Brasil precisa ser estudado com mais detalhe.

O monocultivo da cana-de-açúcar e a mecanização de alto impacto nos sistemas de produção são considerados os principais causadores do declínio na produtividade de colmos e sacarose em países com tradição no cultivo dessa cultura, como na Austrália (GARSIDE et al., 2005) e na África do Sul (JONES; SINGELS, 2015). No Brasil, esses dois aspectos também predominam e podem ser os principais causadores da Q_M.

O sistema de monocultivo da cana-de-açúcar levou a degradação das propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos, incluindo acidificação dos perfis devido à exaustão de nutrientes, perdas de conteúdo de matéria orgânica e compactação desses devido à mecanização (GARSIDE et al., 2005; JONES; SINGELS, 2015). Assim, a degradação da qualidade do solo pode limitar a produtividade de colmos devido à redução da fotossíntese e da densidade de colmos (BELL; GARSIDE; 2005)

A colheita da cana-de-açúcar hoje no Brasil é predominantemente realizada com cana crua (sem queima prévia), na qual boa parte da palha é deixada no campo. O uso de colhedoras é fundamental para a eficiência de tal processo, sendo que nas áreas produtoras no estado de São Paulo o índice de colheita mecanizada atingiu 93,6% na safra 2014/15 (UNICA, 2016). O tráfego de máquinas pesadas, sobretudo na colheita, leva à compactação dos solos (BRAUNACK; MCGARRY, 2006; SOUZA et al., 2014), o que limita a exploração das raízes no perfil do solo (OTTO et al., 2011) e a disponibilidade hídrica para as plantas (ROQUE et al., 2011), além de favorecer o arranquio e o pisoteio das soqueiras (BRAUNACK; MCGARRY, 2006), resultando na diminuição da densidade de colmos e, por consequência, redução da produtividade e longevidade dos canaviais (BRAUNACK; MCGARRY, 2006; SOUZA et al., 2014).

As plantas daninhas, pragas e doenças também exercem papel de agentes redutores da produtividade da cana-de-açúcar. Com relação as plantas daninhas, as de maior destaque nos canaviais brasileiros são o capim-brachiaria (*Urochloa decumbens*), o capim-marmelada (*Urochloa decumbens*), o capim-colonião (*Panicum maximum*), o capim-colchão (*Digitaria* spp.), o capim-amargoso (*Digitaria insularis*), a grama-seda (*Cynodon dactylon*), a tiririca (*Cyperus rotundus*) e o picão-preto (*Bidens* spp.) (KUVA et al., 2003; CHRISTOFFOLETI et al., 2016). As pragas de maior importância para cana-de-açúcar no Brasil são a broca-da-cana

(*Diatraea saccharalis*) e a broca-gigante (*Telcin licus*) (DINARDO-MIRANDA, 2008a). Nematóides também têm causado prejuízos importantes (DINARDO-MIRANDA, 2008b). Dentre as doenças, vale destacar o carvão-da-cana (*Ustilago scitaminea*), a escaldadura das folhas (*Xanthomonas albilineans*) e as ferrugens marrom e alaranjada (*Puccinia* spp.) (SANTOS, 2008; ALMEIDA, 2008).

Entretanto, os resíduos deixados no campo após a colheita têm alterado a dinâmica de alguns agentes fitossanitários nos sistemas de produção de cana-de-açúcar no Brasil (CHRISTOFFOLETI et al., 2007; DINARDO-MIRANDA; FRACASSO, 2013). No caso das plantas daninhas, as plantas com germinação do tipo fotoblástica negativa como a corda-de-viola (*Ipomea grandiflora*), o amendoin-bravo (*Euphorbia heterophylla*), a mucuna-preta (*Mucuna aterrima*) e a mamona (*Ricinus communis*) tem ganhado expressão, enquanto que para algumas das plantas daninhas predominantes a infestação tem sido reduzida pela presença de palha (CHRISTOFFOLETI et al., 2007; MONQUERO et al., 2009). Já no caso das pragas, a cigarrinha-das-raízes (*Manaharva frimbiolata*), antes considerada uma praga secundária, tem tido importância cada vez maior, assim como o curculionídeo *Sphenophorus levis* (DINARDO-MIRANDA; FRACASSO, 2013).

3.3.3 Possíveis ações para minimização da quebra de produtividade da cana-de-açúcar no Brasil

O cultivo da cana-de-açúcar tem se expandido para áreas mais quentes e com ausência de chuvas por um período relativamente longo, o que resulta em maior deficiência hídrica no ciclo da cultura. Mesmo em regiões úmidas, a variabilidade interanual das chuvas pode ocasionar limitações à produtividade da cana-de-açúcar. Além da questão da deficiência hídrica, a mecanização intensa e a presença da palha ou não após a colheita são outros componentes do sistema de produção da referida cultura que atualmente interferem no manejo e nos níveis de produtividade da cultura.

A avaliação das cultivares existentes e o melhoramento genético para introdução de novas cultivares, que se adaptam a esse sistema, são fatores imprescindíveis para a obtenção de uma produção eficiente de cana-de-açúcar. Cultivares de cana-de-açúcar tolerantes à deficiência hídrica podem minimizar as perdas de produtividade em condições de sequeiro (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; SILVA et al., 2008; MACHADO et al., 2009; MEDEIROS et al., 2013). Os modelos de simulação de culturas podem contribuir com os programas de melhoramento genético da cana-de-açúcar no entendimento da relação

genótipo-ambiente em locais com limitação de recursos hídricos (INMAN-BAMBER et al., 2012). A seleção de cultivares tolerantes/resistentes às pragas e às doenças e adaptadas à colheita mecânica também são características importantes para esse sistema de produção (GARSIDE et al., 1997).

Uma vez que a deficiência hídrica é o maior fator limitante para a produtividade de colmos da cana-de-açúcar nas condições brasileiras, o uso da irrigação visando suprir a demanda hídrica da cultura, mesmo que parcialmente, é fundamental para aumentar a produção de cana-de-açúcar no Brasil sem que haja necessidade de se aumentar a área cultivada. Como o melhoramento genético requer alguns anos para liberar novas cultivares, a irrigação pode ser a prática adotada a curto e médio prazos para minimizar a quebra de produtividade devido à deficiência hídrica. Para locais mais secos, como o norte do estado de Minas Gerais e na região nordeste do país, produtividades da ordem de 136 a 256 t ha^{-1} foram obtidas em diversos experimentos irrigados, para lâminas variando de 470 a 1539 mm $ciclo^{-1}$ (OLIVEIRA et al., 2011a; OLIVEIRA et al., 2011b; ANDRADE JUNIOR et al., 2012; SILVA et al., 2013). Em estudo no estado de Goiás, produtividades de colmos variando entre 109 e 170 t ha^{-1} foram obtidas com irrigação suplementar da ordem de 50% da ETc (~ 370 mm $ciclo^{-1}$) (CAMPOS et al., 2014). Em outro estudo conduzido em Goiás, Araújo et al. (2016) obtiveram produtividades de colmos entre 168 e 173 t ha^{-1} com suplementação hídrica próxima ao nível pleno. Mesmo em regiões tradicionais de cultivo da cana-de-açúcar, como no estado de São Paulo, onde a irrigação não é uma prática comum, diversos experimentos vêm mostrando produtividades de colmos variando entre 101 a 190 t ha^{-1} para diferentes cultivares e ciclos sob suplementação hídrica (GUAZZELI; PAES, 1997; DALRI et al., 2008; GAVA et al., 2011; SILVA et al., 2014).

A adoção do controle de tráfego visando minimizar o efeito da compactação do solo, sobretudo na colheita, mostrou-se como uma prática benéfica nos sistemas de produção de cana-de-açúcar na Austrália (BRAUNACK; MCGARRY, 2006; TULLBERG et al., 2007). No Brasil, especificamente na região de Pradópolis, SP, experimentos foram conduzidos por Souza et al. (2012, 2014, 2015) para avaliar o efeito do controle de tráfego na compactação do solo e no desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar. Os autores verificaram que com o uso do controle de tráfego houve preservação das propriedades físicas do solo e melhor desenvolvimento das raízes, o que resultou em melhores produtividades. Além do controle de tráfego, na Austrália o preparo mínimo do solo ou mesmo plantio direto vem permitindo reduzir os custos operacionais, minimizando os efeitos na biota do solo e conservando a

matéria orgânica (GARSIDE et al., 2005), o que poderia ser também empregado nas condições brasileiras.

Outro aspecto importante no contexto do manejo da cultura da cana-de-açúcar é a cobertura do solo com palha após a colheita. Ainda não há consenso sobre recomendações técnicas quanto a deixar ou recolher a palha do campo. Em geral, a quantidade de palha (folhas secas mais ponteiros) varia de 7 a 30 t massa seca ha^{-1} em função da cultivar e da produtividade da cultura (TRIVELIN et al., 1995; PAES; OLIVEIRA; 2005; LEAL et al., 2013b). O crescente interesse na obtenção de bioeletricidade e etanol de segunda geração, os quais tem como matéria prima os resíduos lignocelulósicos como o bagaço e a palha (GOLDEMBERG et al, 2014), tem feito com que uma certa quantidade de palha seja retirada do campo, o que pode variar em função da região e do sistema de produção. Todavia, sabe-se que a manutenção da palha no campo minimiza os impactos da erosão do solo (SPAROVEK; SCHNUG, 2001), favorece o acúmulo de matéria orgânica (GALDOS et al., 2009; CERRI et al., 2011) e nutrientes a longo prazo (OLIVEIRA et al., 1999; BASANTA et al., 2003; TRIVELIN et al., 2013), conserva a umidade do solo (TOMINAGA et al., 2002), minimiza a infestação de plantas daninhas comumente problemáticas nos canaviais (CHRISTOFFOLETI et al., 2007) e pode incrementar a produtividade (TRIVELIN et al., 2002).

A rotação de culturas na reforma do canavial é considerada outro fator importante no contexto da cultura da cana-de-açúcar, juntamente com o preparo mínimo do solo e o controle de tráfego, para mitigar o declínio de produtividade nos canaviais australianos (GARSIDE et al., 2005). Os adubos verdes podem ser uma alternativa para a rotação de culturas. O uso de adubos verdes não implica na perda de nenhuma safra, já que são cultivados no intervalo entre a colheita e o plantio, no processo de reforma do canavial, tendo custo relativamente baixo e com alto potencial para incrementar a produtividade de colmos e sacarose (AMBROSANO et al., 2005). Além disso, os adubos verdes contribuem para a proteção do solo contra erosão, aumentam o teor de macro e micronutrientes no solo e minimizam os impactos de determinadas plantas daninhas, pragas e nematóides (GARSIDE et al., 1997, 2005; AMBROSANO et al., 2005; DINARDO-MIRANDA, 2008a, 2008b). As plantas de maior destaque no centro-sul do país utilizadas adubos verdes são a crotalária (*Crotalaria juncea*) e a mucuna-preta (*Mucuna aterrima*), contudo, também podem ser utilizados cultivos comerciais como a soja (*Glycine max*) e o amendoim (*Arachis hypogaea*) (AMBROSANO et al., 2005). Apesar dos benefícios, o uso de adubos verdes e rotação de culturas ainda são pouco utilizados nos sistemas de produção de cana-de-açúcar no Brasil.

3.4 Conclusões

Os modelos de simulação, com a abordagem multimodelos, permitiram determinar as quebras da produtividade de colmos de cana-de-açúcar em diferentes regiões do Brasil e suas principais causas. Tal abordagem identificou que a principal causa da quebra de produtividade da cana-de-açúcar nas condições brasileiras é devido à deficiência hídrica ao longo do ciclo.

A quebra de produtividade devido ao manejo agrícola é dependente da região e das práticas adotados pelos produtores, podendo chegar a 46% da quebra de produtividade total de colmos.

O presente estudo mostrou que a produção de cana-de-açúcar no Brasil pode ser incrementada sem aumento expressivo da área cultivada, desde que haja a adoção de cultivares mais tolerantes ao déficit hídrico, para reduzir a quebra por deficiência hídrica, e de práticas de manejo (como controle de tráfego, uso de adubos verdes e rotação de culturas) que possam mitigar a quebra por manejo e, consequentemente, a quebra de produtividade total.

Referências

ABREU, M.L. de; SILVA, M. de A.; TEODORO, I.; HOLANDA, L.A. de; SAMPAIO NETO, G.D.S. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Bragantia**, Campinas, v. 72, n. 3, p. 262-270, 2013.

ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T., FREITAS, R.M.F.; AGUIAR, D.A.; SUGAWARA, L.M. MELLO, M.P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, Basel, v. 4, p. 574-585, 2012.

AFFHOLDER, F.; POEYDEBAT, C.; CORBEELS, M.; SCOPEL, E.; TITTONELL, P. The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: assessment and analysis through field surveys and modelling. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 143, p. 106-118, 2013.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 291p. (FAO. Irrigation Drainage and Paper, 56).

ALMEIDA, I.M.G. de. Doenças causadas por bactérias. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. cap. 20, p. 437-450.

AMBROSANO, E.A.; TRIVELIN, P.C.O.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G.M.B.; SCHAMMASS E.A.; GUIRADO, N.; ROSSI, F.; MENDES, P.C.D.; MURAOKA, T. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, p. 534-542, 2005.

AMBROSANO, E.J.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G.M.B.; SCHAMMAS, E.A.; DIAS, F.L.F.; ROSSI, F.; TRIVELIN, P.C.O.; SACHS, R.C.C.; AZCÓN, R. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 810-818, 2011.

ANDRADE JUNIOR, A.S de; BASTOS, E.A.; RIBEIRO, V.Q.; DUARTE, J.A.L.; BRAGA, D.L.; NOLETO, D.H. Irrigation, nitrogen and potassium levels under subsurface drip on sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 76-84, 2012.

APSIM. **The Agricultural Production Systems Simulator (APSIM)**. Disponível em: <https://www.apsim.info/Documentation/Model,CropandSoil/CropModuleDocumentation/Plant.aspx>. Acesso em: 9 Jun. 2014.

AQUINO, G.S. de; MEDINA, C. de C. Produtividade e índices biométricos e fisiológicos de cana-de-açúcar cultivada sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 3, p. 172-180, 2014.

AQUINO, G.S. de; MEDINA, C. de C.; PORTEIRA JUNIOR, A.L.; SANTOS, L.O.; CUNHA, A.C.B.; KUSSABA, D.A.O.; SANTOS JÚNIOR, J.H. dos; ALMEIDA, L.A. SANTIAGO, A.D. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 12, p. 1150-1159, 2015.

ARAÚJO, R.; ALVES JUNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A.W.P. Variation in the sugar yield in response to drying-off of sugarcane before harvest and the occurrence of low air temperatures. **Bragantia**, Campinas v. 75, n. 1, p. 118-127, 2016.

ASSENG, S.; EWERT, F.; ROSENZWEIG, C.; JONES, J.W.; HATFIELD, J.L.; RUANE, A.C.; BOOTE, K.J.; THORBURN, P.J.; ROTTER, R.P.; CAMMARANO, D.; BRISSON, N.; BASSO, B.; MARTRE, P.; AGGARWAL, P.K.; ANGULO, C.; BERTUZZI, P.; BIERNATH, C.; CHALLINOR, A.J.; DOLTRA, J.; GAYLER, S.; GOLDBERG, R.; GRANT, R.; HENG, L.; HOOKER, J.; HUNT, L.A.; INGWERSEN, J.; IZAURRALDE, R.C.; KERSEBAUM, K.C.; MULLER, C.; KUMAR, S.N.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.; OLESEN, J.E.; OSBORNE, T.M.; PALOSUO, T.; PRIESACK, E.; RIPOCHE, D.; SEMENOV, M.A.; SHCHERBACK, I.; STEDUTO, P.; STOCKLE, C.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; TRAVASSO, M.; WAHA, K.; WALLACH, D.; WHITE, J.W.; WILLIAMS, J.R.; WOLF, J. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, London, v. 3, p. 827-832, 2013.

BASANTA, M.V.; DOURADO NETO, D.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; OLIVIERA, J.C.M.; TRIVELIN, P.C.O.; TIMM, L.C.; TOMINAGA, T.T.; CORRECHEL, T.; CÁSSARO, F.A.M; PIRES, L.F.; MACEDO, J.R. Management effects on nitrogen recovery in a sugarcane crop grown in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, p. 235-248, 2003.

BASSU, S.; BRISSON, N.; DURAND, J.L.; BOOTE, K.; LIZASO, J.; JONES, J.W.; ROSENZWEIG, C.; RUANE, A.C.; ADAM, M.; BARON, C.; BASSO, B.; BIERNATH, C.; BOOGAARD, H.; CONIJN, S.; CORBEELS, M.; DERYNG, D.; DE SANCTIS, G.; GAYLER, S.; GRASSINI, P.; HATFIELD, J.; HOEK, S.; IZAURRALDE, C.; JONGSCHAAP, R.; KEMANIAN, A.; KERSEBAUM, K.C.; KUMAR, N.; MAKOWSKI, D.; MÜLLER, C.; NENDEL, C.; PRIESACK, E.; PRAVIA, M.V.; SOO HYUNG, K.; SAU, F.; SHCHERBAK, I.; TAO, F.; TEIXEIRA, E.; TIMLIN, D.; WAHA, K. How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors? **Global Change Biology**, Oxford, v. 20, n. 7, p. 2301-2320, 2014.

BATJES, N.H. **A homogenized soil data file for global environmental research:** a subset of FAO, ISRIC and NRCS profiles (Version 1.0). Working Paper and Preprint 95/10b. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen, 1995. Netherlands.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C. Comparison of five soybean crop growth models for yield estimation in southern Brazil. In: INTERNATIONAL CROP MODELLING SYMPOSIUM, 2016, Berlin. **Proceedings…** 2016, p. 198-199, 435p.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C.; PILAU, F.G. Eficiência agrícola da produção de soja, milho e trigo no estado do Rio Grande do Sul entre 1980 e 2008. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 1, p. 24-30, 2012.

BELL, M.J.; GARSIDE, A.L. Shoot and stalk dynamics and the yield of sugarcane crops in tropical and subtropical Queensland, Australia. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 231-248, 2005.

BENETT, C.G.S.; BUZETTI, S.; SILVA, K.S.; TEIXEIRA FILHO, M.C.M.; GARCIA, C.M. de P.; MAESTELO, P.R. Produtividade e desenvolvimento da cana-planta e soca em função de doses e fontes de manganês. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1661-1668, 2011.

BEZUIDENHOUT, C.N.; SINGELS, A. Operational forecasting of South African sugarcane production: part 1. System description. **Agricultural Systems**, Essex, v. 92, p. 23–38, 2007.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SD.22 - Goiás, SD.23 - Brasília, SE.22 - Goiânia. (Levantamento de Recursos Naturais, 25, 29, 31). Rio de Janeiro. 1981.

BRAUNACK, M.V.; MCGARRY, D. Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v, 89, p. 86-102, 2006.

CAMPOS, P.F.; ALVES, J.; CASAROLI, D.; FONTOURA, P.R.; EVANGELISTA, A.W.P. Response of sugarcane varieties to supplemental irrigation in Brazilian Savanna. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, p. 1139-1149, 2014.

CASTRO, S.G.Q. de; FRANCO, H.C.J.; MUTTON, M.A. Harvest managements and cultural practices in sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 299-306, 2014.

CERRI, C.C.; GALDOS, M.V.; MAIA, S.M.F.; BERNOUX, M.; FEIGL, B.J.; POWLSON, D.; CERRI, C.E.P. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 62, p. 23-28, 2011.

CHEEROO-NAYAMUTH, B.F.; NAYAMUTH, A.R.H.; KOONJAH, S. Yield analysis in the west sector of the Mauritian sugarcane industry. **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**, Mount Edgecombe, v. 84, p. 106-115, 2011.

CHRISTOFFOLETI, P.J.; CARVALHO, S.J.P. de; LÓPEZ-OVEJERO, R.F.; NICOLAI, N.; HIDALGO E.; SILVA, J.E. da. Conservation of natural resources in Brazilian agriculture: Implications on weed biology and management. **Crop Protection**, Guildford, v. 26, p. 383-389, 2007.

CHRISTOFFOLETI, P.J.; OVEJERO, R.F.L.; NICOLAI, M.; CARVALHO, S.J.P. **Manejo de plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar**: Novas moléculas de herbicidas. Disponível em: <http://www.ipni.net/ppiweb/pbrazil.nsf/>. Acesso em: 29 Fev. 2016.

COSTA, L.G.; MARIN, F.R.; NASSIF, D.S.P.; PINTO, H.M.S.; LOPES-ASSAD, M.L.R.C. Simulação do efeito do manejo da palha e do nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 5, p. 469-474, 2014.

COSTA, M.C.G.; MAZZA, J.A.; VITTI, G.C.; JORGE, L.A. de C. Distribuição radicular, estado nutricional e produção de colmos e de açúcar em soqueiras de dois cultivares de cana-de-açúcar em solos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1503-1514, 2007.

CRUSCIOL, C.A.; FOLTRAN, R.; ROSSATO, O.B.; MCCRAY, J.M.; ROSSETTO, R. Effects of surface application of calcium-magnesium silicate and gypsum on soil fertility and sugarcane yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1843-1854, 2014.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L. Efeito da frequência de irrigação subsuperficial por gotejamento no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Irriga**, Botucatu, v. 7, n.1, p. 29-34, 2002.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L.; GARCIA, C.J.B.; DUENHAS, L.H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n.1, p. 1-11, 2008.

DEIHIMFARD, R.; MAHALLATI, M.N.; KOOCHEKI, A. Yield gap analysis in major wheat growing areas of Khorasanprovince, Iran, through crop modelling. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 184, p. 28-38, 2015.

DIAS, F.L.F.; MAZZA, J.A.; MATSUOKA, S.; PERECIN, D.; MAULE, R.F. Produtividade da cana-de-açúcar em relação a clima e solos da região noroeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 627-334, 1999.

DINARDO-MIRANDA, L.L. Nematóides. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008b. cap. 18, p. 405-422.

DINARDO-MIRANDA, L.L. Pragas. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008a. cap. 17, p. 349-404.

DINARDO-MIRANDA, L.L; FRACASSO, J.V. Sugarcane straw and the populations of pests and nematodes. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, p. 369-374, 2013.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 139p. (Irrigation and Drainage paper, 33).

DRIESSEN, P.M.; KONIJN, N.T. **Land-use system analysis**. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1992. 230p.

FERNANDES JÚNIOR, A.R.; ANDRADE, J.A. da C.; SANTOS, P.C. dos; HOFFMAN, H.P.; CHAPOLA, R.G.; CARNEIRO, M.S.; CURSI, D.E. Adaptabilidade e estabilidade de clones de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 72, n. 3, p. 208-216, 2013.

FERREIRA JUNIOR, R.A.; SOUZA; J.L. de; ESCOBEDO, J.F.; TEORODO, I.; LYRA, G.B.; NETO, R.A. de A. Cana-de-açúcar com irrigação por gotejamento em dois espaçamentos entrelinhas de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 8, p. 798-804, 2014.

FISCHER, R.A. Definitions and determination of crop yield, yield gaps and of rates of change. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 182, p. 9-18, 2015.

FISCHER, R.A., BYERLEE, D., EDMEADES, G.O. **Crop yields and global food security**: will yield increase continue to feed the world? In: ACIAR Monograph No. 158. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, 2014. 436 p. Disponível em: <http://aciar.gov.au/publication/mn158>. Acesso em: 12 Mar. 2016.

FLEISHER, D.H.; CONDORI, B.; QUIROZ, R.; ALVA, A.; ASSENG, S.; BARREDA, C.; BINDI, M.; BOOTE, K.J.; FERRISE, R.; FRANKE, A.C.; GOVINDAKRISHNAN, P.M.; HARAHAGAZWE, D.; HOOGENBOOM, G.; NARESH KUMAR, S.; MERANTE, P.; NENDEL, C.; OLESEN, J.E.; PARKER, P.S.; RAES, D.; RAYMUNDO, R.; RUANE, A.C.; STOCKLE, C.; SUPIT, I.; VANUYTRECHT, E.; WOLF, J.; WOLI, P. A Potato Model Inter-comparison Across Varying Climates and Productivity Levels. **Global Change Biology**, Oxford, DOI: 10.1111/gcb.13411, 2016.

FORTES, C.; TRIVELIN, P.C.O; VITTI, A.C.; OTTO, R.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 1, p. 88-96, 2013.

GALDOS, M.V.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 153, p. 347-352, 2009.

GARSIDE, A.L.; ROBOTHAM, B.G.; MAGAREY, R.C.; BELL, M.J.; STIRLING, G.R. Managing yield decline in sugarcane cropping systems. **International Sugar Journal**, London, v. 107, p. 16-26, 2005.

GARSIDE, A.L.; SMITH, M.A.; CHAPMAN, L.S.; HURNEY, A.P.; MAGAREY, R.C. The yield plateau in the Australian sugar industry: 1970–1990. In: KEATING, B.A.; WILSON, J.R. (Ed.) **Intensive Sugarcane Production**: Meeting the Challenges Beyond. 1997. 531 p.

GAVA, G.J. de C.; SILVA, M.A.; Da SILVA, R.C.; JERONIMO, E.M.; CRUZ, J.C.S.; KÖLLN, O.T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 250-255, 2011.

GOLDEMBERG J, MELLO F.F.C, CERRI C.E.P., DAVIES C.A., CERRI C.C. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. **Energy Policy**, Surrey, v. 69, p. 14-18, 2014.

GOUVÊA, J.R.F.; SENTELHAS, P.C.; GAZZOLA, S.T.; SANTOS, M.C. Climate changes and technological advances: impacts on sugarcane productivity in tropical Southern Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 593-605, 2009.

GRASSINI, P.; VAN BUSSEL, L.; VAN WART, J.; WOLF, J.; CLAESSENS, L.; YANG, H.; BOOGAARD, H.; GROOT, H.; CASSMAN, K.G.; VAN ITTERSUM, M.K. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 177, p. 49-63, 2015.

GUAZZELLI, M.A.N.; PAES, L.A.D. Irrigação de cana-de-açúcar comercial. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1997. 11p.

HEINEMANN, A.B.; SENTELHAS, P.C. Environmental group identification for upland rice production in central Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, p. 540-547, 2011.

INMAN-BAMBER N.G., LAKSHMANAN P., PARK S. Sugarcane for water-limited environments: theoretical assessment of suitable traits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 34, p. 95-104, 2012.

_____. A growth model for sugarcane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal of Plant and Soil**, Mount Edgecombe, v. 8, n. 2, p. 93-99, 1991.

_____. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, p. 107-122, 2004.

_____. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 36, p. 41-51, 1994.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 185–202, 2005.

INMAN-BAMBER, N.G.; ZUND, P.R.; MUCHOW, R.C. Water use efficiency and soil water availability for sugarcane. **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**, Mount Edgecombe, v. 22, p. 264-269, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema de recuperação automática (SIDRA)**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 25 Jan. 2016.

JONES, M.R.; SINGELS, A. Analysing yield trends in the South African sugar industry. **Agricultural Systems**, Essex, v. 141, p. 24-35, 2015.

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

KUVA, M.A.; GRAVENA, R.; PITELLI, R.A.; CHRISTOFFOLETI, P.J.; ALVES, P.L.C.A. Períodos de interferência das plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar. III – Capim-braquiaria (*Brachiaria decumbens*) e Capim-colonião (*Panicum maximum*). **Planta Daninha**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 37-44, 2003.

LEAL, M.R.L.V.; GALDOS, M.V.; SCARPARE, F.V.; SEABRA, J.E.A.; WALTER, A.; OLIVEIRA, C.O.F. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 53, p. 11-19, 2013b.

LEAL, M.R.L.V.; NOGUEIRA, L.A.H.; CORTEZ, L.A.B. Land demand for ethanol production. **Applied Energy**, London, v. 102, p. 266-271, 2013a.

LI, T.; HASEGAWA, T.; YIN, T.; ZHU, Y.; BOOTE, K.; ADAM, M.; BREGAGLIO, S.; BUIS, S.; CONFALONIERI, R.; FUMOTO, T.; GAYDON, D.; MARCAIDA III, M.; NAKAGAWA, H.; ORIOL, P.; RUANE, A.C.; RUGET, F.; SINGH, B.; SINGH, U.; TANG, L.; TAO, F.; WILKENS, P.; YOSHIDA, H.; ZHANG, Z.; BOUMAN, B. Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions. **Global Change Biology**, Oxford, v. 21, n. 3, p. 1328-1341, 2015.

LIU, D.L.; BULL, T.A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 144, p. 181-211, 2001.

LOBELL, D.B.; CASSMAN, K.G.; FIELD, C.B. Crop yield gaps: their importance, magnitudes and causes. **Annual Review of Environmental Resources**, Berlin, v. 34, p. 179-204, 2009.

LÖVENSTEIN, H.; LANTINGA, E.A.; RABBINGE, R.; VAN KEULEN, H. **Principles of production ecology**. Wageningen: Wageningen Agricultural University. 1995. 121p.

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 2, p. 1575-1582, 2009.

MARIN, F.R. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira**: estado atual e cenário futuro baseado em simulações multimodelos. 2014. 262p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

MARIN, F.R.; DE CARVALHO, G.L. Spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency in the state of Sao Paulo, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 149-156, 2012.

MARIN, F.R.; JONES, J.W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, p.1-16, 2014.

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J.L.; PALLONE FILHO, W.J.; NASSIF, D.S.P. Parametrization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian sugarcane. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, n. 2, p. 304-315, 2011.

MARIN, F.R.; LOPES-ASSAD, M.L.; ASSAD, E.D.; VIAN, C.E., SANTOS, M.C. Sugarcane crop efficiency in two growning seasons in São Paulo state, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1449-1455, 2008.

MARIN, F.R.; MARTHA JUNIOR, G.B.; CASSMAN, K.G.; GRASSINI, P. Prospects for Increasing Sugarcane and Bioethanol Production on Existing Crop Area in Brazil. **BioScience**, Washington, DOI:10.1093/biosci/biw009, 2016.

MARIN, F.R.; PANDORFI, H.; SENTELHAS, P.C.; CAMARGO, M.B.P. de; HERNANDEZ, F.B.T. Perda de produtividade potencial da cultura do sorgo no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 1, p. 157-162, 2006.

MARIN, F.R.; SENTELHAS, P.C; UNGARO, M.R.G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 1, p. 1-6, 2000.

MARIN, F.R.; THORBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G. Sugarcane model intercomparison: Structural differences and uncertainties under current and potential future climates. **Environmental Modelling and Software**, London, v. 72, p. 372-386, 2015.

MARIN, F.R.; THORBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G.; REZENDE, A.S.; ANDRADE JUNIOR, A.S. Evaluation of APSIM-SUGAR and DSSAT-CANEGRO for widely grown brazilian sugarcane cultivar. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 28, 2013. São Paulo. **Proceedings**… São Paulo, 2013.

MARTRE, P.; WALLACH, D.; ASSENG, S.; EWERT, F.; JONES, J.W.; RÖTTER, R.P.; BOOTE, K.J.; RUANE, A.C.; THORBURN, P.J.; CAMMARANO, D.; HATFIELD, J.L.; ROSENZWEIG, C.; AGGARWAL, P.K.; ANGULO, C.; BASSO, B.; BERTUZZI, P.; BIERNATH, C.; BRISSON, N.; CHALLINOR, A.J.; DOLTRA, J.; GAYLER, S.; GOLDBERG, R.; GRANT, R.F.; HENG, L.; HOOKER, J.; HUNT, L.A.; INGWERSEN, J.C.; IZAURRALDE, R.C.; KERSEBAUM, K.C.; MÜLLER, C.; KUMAR, S.N.; NENDEL, C.; O'LEARY, G.J.; OLESEN, J.E.; OSBORNE, T.M.; PALOSUO, T.; PRIESACK, E.; RIPOCHE, D.; SEMENOV, M.A.; SHCHERBAK, I.; STEDUTO, P.; STÖCKLE, C.O.; STRATONOVITCH, P.; STRECK, T.; SUPIT, I.; TAO, F.; TRAVASSO, M.; WAHA, K.; WHITE, J.W.; WOLF, J. Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. **Global Change Biology**, Oxford, v. 21, p. 911-925, 2015.

MAULE, R.F.; MAZZA, J.A.; MARTHA JUNIOR, G.B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 295-301, 2001.

MEDEIROS, D.B.; DA SILVA, E.C.; NOGUEIRA, R.J.M.C.; TEIXEIRA, M.M.; BUCKERIDGE, M.S. Physiological limitations in two sugarcane varieties under water suppression and after recovering. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, Stuttgart, v. 25, n. 3, p. 213-222, 2013.

MEIRELES, E.J.L.; PEREIRA, A.R.; SENTELHAS, P.C.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, F.J.P. Risco climático de quebra de produtividade da cultura do feijoeiro em Santo Antônio de Goiás, GO. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 1, p. 163-171, 2003.

MERLOS, F.A.; MONZON, R.P.; MERCAU, J.L.; TABOADA, M.; ANDRADE, F.H.; HALL, A.J.; JOBBAGY, E.; CASSMAN, K.J.; GRASSINI, P. Potential for crop production increase in Argentina through closure of existing yield gaps. **Field Crops Research**, Amsterdam, n.184, p. 145-154, 2015.

MONQUERO, P.A.; AMARAL, L.R. do; SILVA, A.C. da; BINHA, D.P.; SILVA, P.V. da. Eficácia de herbicidas em diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar no controle de *Ipomoea grandifolia*. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 2, p. 367-372, 2009.

MONTEIRO, L.A. **Sugarcane yield gap in Brazil**: a crop modelling approach. 2015. 131 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P.C. Potential and actual sugarcane yields in Southern Brazil as a function of climate conditions and crop management. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, p. 264-276, 2014.

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; PALLONE, W.J.; RESENDE, R.S.; PELLEGRINO, G.Q. Parameterization and evaluation of the DSSAT/Canegro model for Brazilian sugarcane varieties. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 311-318, 2012.

OLIVEIRA, E.C.A. de; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, A.C. de; SIMÕES NETO, D.E.; DA ROCHA, A.T.; DE CARVALHO, L.A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 6, p. 617-625, 2011b.

OLIVEIRA, F.M. de; ASPIAZÚ, I.; KONDO, M.K.; BORGES, I.D.; PEGORARO, R.F.; VIANNA, E.J. Crescimento e produção de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e estresse hídrico. **Revista Trópica**, Chapadinha, v. 5, n. 1, p. 56-67, 2011a.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; PENATTI, C.P; PICCOLLO, M.C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 2359-2362, 1999.

OLIVEIRA, R.A.; SANTOS, R.S.; RIBEIRO, A.; ZOLNIER, S.; BARBOSA, M.H.P. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE. R **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 549-557, 2012.

OTTO, R.; SILVA, A.P.; FRANCO, H.C.J.; OLIVEIRA, E.C.A.; TRIVELIN, P.C.O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 117, p. 201-210, 2011.

PAES, L.A.D.; OLIVEIRA, M.A. 2005. Potential trash biomass of the sugar cane plant. p. 19-23. In: HASSUANI, S. J.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I.C. (Ed). **Biomass power generation**: sugar cane bagasse and trash. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira, 2005. p. 19-23.

PALOSUO, T., KERSEBAUMB, K.C., ANGULOC, C., HLAVINKAD, P., MORIONDO, M., OLESEN, J.E., PATIL, R.H., RUGET, F., RUMBAUR, C., TAKÁC, J., TRNKA, M., BINDI, M., ÇALDAG, B., EWERT, F., FERRISE, R., MIRSCHEL, W., SAYLAN, L., SISKA, B., RÖTTER, R. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. **European Journal of Agronomy**, London, v. 35, p. 103-114, 2011.

PEREIRA, A.B.; SENTELHAS, P.C.; VILLA NOVA, N.A. Estimativa do balanço de energia radiante em função de elementos climáticos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, p. 201-206, 1998.

PRADO, H. **Pedologia fácil**: aplicação em solos tropicais. 4. ed. Piracicaba: O Autor, UFV, 2014. 284p.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, New York, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

PROBERT, M.E.; DIMES, J.P.; KEATING, B.A.; DALAL, R.C.; STRONG, W.M. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. **Agricultural Systems**, Essex, v. 56, n. 1, p. 1-28, 1998.

RABBINGE, R. The ecological background of food production. In: CHADWICK, D.J.; MARSH, J. (Ed). **Crop Protection and Sustainable Agriculture**. Chichester, UK: John Wiley, 1993. p. 2-29. (Ciba Foundation Symposium 177)

REYNOLDS, J.F.; ACOCK, B. Predicting the response of plants to increasing carbon-dioxide - a critique of plant-growth models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 29, p. 107-129, 1985.

RITCHIE, J.T. Soil water balance and plant water stress. In: TSUGI, G.Y.; HOOGENBOOM, G. THORNTON P.K. (Ed.). **Understanding Options for Agricultural Production**. Kluwer Academic Publishers, 1998. p. 41-54.

RITCHIE, J.T.; KINIRY, J.R.; JONES, C.A.; DIKE, P.T. Model inputs. chap. 2. In: JONES C.A.; KINIRY J.R. (Ed.). **Ceres-Maize**: a simulation model of maize growth and development College Station. Texas, A & M University, 1986. 194p.

ROBERTSON, M.J.; BONNETT, G.D.; HUGHES, R.M.; MUCHOW, R.C.; CAMPBELL, J.A. Temperature and leaf area expansion of sugarcane: integration of controlled-environment, field and model studies. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 25, n. 7, p. 819-829, 1998.

ROBERTSON, M.J.; INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 64, p. 211-227, 1999.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; UNGARO, M.R.G. Análise de risco climático para a cultura do girassol, em algumas localidades de São Paulo e do Paraná, usando os modelos DSSAT/OILCROP-SUN e FAO. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n.1, p. 91-102, 2001.

ROQUE, A.A. de O.; SOUZA, Z.M.; ARAÚJO, F.S.; SILVA, G.R.V. da. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 9, p. 1536-1542, 2011.

RÖTTER, R.P., PALOSUO, T., KERSEBAUM, K.C., ANGULO, C., BINDI, M., EWERT, F., FERRISE, R., HLAVINKA, P., MORIONDO, M., NENDEL, C. Simulation of spring barley yield indifferent climatic zones of Northern and Central Europe: a comparison of nine crop models. **Field Crops Research**, Amsterdam. v. 133, p. 23-36, 2012.

RUDORFF, B.F.T.; AGUIAR, D.A. de; SILVA, W.F. da; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Study on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using LandSat data. **Remote Sensing**, New York, v. 2, p. 1057-1076, 2010.

SANTOS, A.S.S. Doenças causadas por fungos. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. cap. 19, p. 423-436.

SCARPARE, F.V. **Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST**. 2011. 163p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SENTELHAS, P.C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G.M.S.; FARIAS, J.R.B.; HAMPF, A.C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil: magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 1, p. 1-18, 2015.

SILVA, M. de A. Interação genótipo x ambiente e estabilidade fenotípica de cana-de-açúcar em ciclo de cana-de-ano. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 109-117, 2008.

SILVA, M. de A.; JERONIMO, E.M.; LÚCIO, A.D. Perfilhamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 8, p. 979-986, 2008.

SILVA, M. de A.; SOARES, R.A.B.; LANDELL, M.G.A.; CAMPANA, M.P. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p. 656-661, 2008.

SILVA, M.A.; ARANTES, M.T.; RHEIN, A.F.L.; GAVA, J.C.; KÖLLN, O.T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 241-249, 2014.

SILVA, V. de. P.R. da; SILVA, B.B. da; ALBUQUERQUE, W.G.; BORGERS, C.J.R.; SOUZA, I.F. de; DANTAS NETO, J. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 128, p. 102-109, 2013.

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C.N. A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro sugarcane model. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 78, p. 151-164, 2002.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DEN BERG, M. **DSSAT v4.5 - CANEGRO Sugarcane plant module**: scientific documentation. Mount Edgecombe: South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34p.

SINGELS, A.; JONES, M.R.; PORTER, C.; SMIT, M.A.; KINGSTON G.; MARIN, F.; CHINORUMBA, S.; JINTRAWET, A.; SUGUITANI, C.; VAN DEN BERG, M.; SAVILLE, G. The DSSAT4.5 CANEGRO model: a useful decision support tool for research and management of sugarcane production. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 27., 2010, Vera Cruz. **Proceedings**… Vera Cruz, 2010.

SINGH, K.K; MALL; R.K.; SINGH; R.S; SRIVASTAVA, A.K. Evaluation of CANEGRO Sugarcane Model in East Uttar Pradesh, India. **Journal of Agrometeorology**, Anand, v. 12, n. 2, p.181-186, 2010.

SOUZA, A.E.R. de; OLIVEIRA, F.J. de; ANUNCIAÇÃO FILHO, C.J. de; MELO FILHO, P. de A.; MELO, L.J.O.T. de; TABOSA, J.N. Seleção de famílias RB visando à alta produtividade e precocidade na maturação em cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 788-795, 2011.

SOUZA, G.S. de; SOUZA, Z.M. de; COOPER, M.; TORMENA, C.A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, p. 270-277, 2015.

SOUZA, G.S. de; SOUZA, Z.M. de; SILVA, R.B. da; ARAUJO, F.S.; BARBOSA, R.S. Soil compressibility and root system of sugarcane with and without controlled-traffic farming. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 603-612, 2012.

SOUZA, G.S. de; SOUZA, Z.M. de; SILVA, R.B. da; BARBOSA, R.S.; ARAUJO, F.S. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 135-146, 2014.

SPAROVEK, G.; SCHNUG, E. Soil tillage and precision agriculture: a theoretical case study for soil erosion control in Brazilian sugar cane production. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, p. 47-54, 2001.

TEODORO, I.; DANTAS NETO, J.; hOLANDA, L.A. de; SAMPAIO NETO, G.D.S.; SOUZA, J.L. de; BARBOSA, G.V. de S.; LYRA, G.B. Weather variables, water balance, growth, and agro industrial yield of sugarcane. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 1, p. 76-88, 2015.

THORBURN, P.J.; PROBERT, M.E.; ROBERTSON, F.A. Modelling Decomposition of Sugar Cane Surface Residues with APSIM-Residue. **Field Crops Research**, Amsterdam v.70, n. 3, p. 223-232, 2001.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.

TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M., BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J.C.M.; TIMM, L.C. Variability of soil water content and bulk density in a sugarcane field. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 40, p. 604-614, 2002.

TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; VITTI, A.C.; GAVA, G.J.C.; BENDASSOLLI, J.A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 636-646, 2002.

TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L.; RODRIGUES, J.C.S. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-^{15}N e Uréia-^{15}N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, p. 1375-1385, 1995.

TRIVELIN, P.O.C.; FRANCO, H.J.D.; OTTO, R.; FERREIRA, D.A.; VITTI, A.C.; CORTES, C.; FARONI, C.E.; OLIVEIRA, E.C.A.; CANTARELLA, H. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, p. 345-352, 2013.

TULLBERG, J.N.; YULE, D.F.; MCGARRY, D. Controlled traffic farming - from research to adoption in Australia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, p. 272-281, 2007.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR. **Estimativa da safra 2015/2016**. Disponível em: <http://unica.com.br/documentos/apresentacoes/pag=1/>. Acesso em: 19 Fev. 2016.

VAN BUSSEL, G.J.; GRASSINI, P.; VAN WART, J.; WOLF, J.; CLAESSENS, L.; YANG, H.; BOOGAARD, H.; DE GROOT, H.; SAITO, K.; CASSMAN, K.G.; VAN ITTERSUM, M.K. From field to atlas: upscaling of location-specific yield gap estimates. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 177, p. 98–108, 2015.

VAN DEN BERG, M.; SINGELS, A. Modelling and monitoring for strategic yield gap diagnosis in the South African sugar belt. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 143, p. 143-150, 2013.

VAN ITTERSUM, M. K.; CASSMAN, K. G.; GRASSINI, P.; WOLF, J.; TITTONELL, P.; HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance: a review. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 143, p. 4-17, 2013.

VAN ITTERSUM, M. K.; RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 52, p. 197-208, 1997.

VIANNA, M. dos S.; SENTELHAS, P.C. Performance of DSSAT CSM-CANEGRO under operational conditions and its use in determining the 'saving irrigation' impact on sugarcane crop. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 17, p. 1-12, 2015.

VIANNA, M. dos S.; SENTELHAS, P.C. Simulation of the water deficit risk in sugarcane-crop expansion regions in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 4, p. 237-246, 2014.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J. de C.; FRANCO, H.C.J.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 491-498, 2007.

WALLACH, D.; GENARD, M. Effect of uncertainty in input and parameter values on model prediction error. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 105, p. 337-345, 1998.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

WILSON, R.G.; ROUSE, W.R. Moisture and temperature limits of the equilibrium evapotranspiration model. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 11, p. 436-443, 1972.

WIT, C.T. Photosynthesis of leaf canopies. **Agricultural Research Report**, Wageningen, v. 663, p. 1-56, 1965.

ZAMBROSI, F.C.B. Adubação com fósforo em cana-soca e sua interação com magnésio. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 3, p. 400-405, 2011.

4 POTENCIAL DO USO DA IRRIGAÇÃO NA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

Resumo

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas agrícolas do Brasil. Em muitas regiões a deficiência hídrica, proporcionada pela falta ou má distribuição das chuvas ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, é a principal limitação para a obtenção de altas produtividades. A expansão da atividade canavieira tem ocorrido, principalmente, em áreas marginais por deficiência hídrica, onde a irrigação é uma das práticas que podem incrementar a produtividade da referida cultura. Uma das maneiras de avaliar o impacto da irrigação é por meio de modelos de simulação de culturas. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial do uso da irrigação em diferentes locais do Brasil por meio da estimação das produtividades da cana-de-açúcar sob condições de sequeiro e de irrigação, considerando-se diferentes níveis de cobertura da deficiência hídrica da cultura. Para tanto, empregou-se o modelo da Zona Agroecológica da FAO (MZA-FAO) para estimar as produtividades para canas de 12 meses em 12 datas de plantio, sendo uma por mês, para três níveis de capacidade de água disponível (CAD baixa, CAD média e CAD alta) em 29 localidades do Brasil, considerando-se 30 anos de estudo. As lâminas de irrigação simuladas consideraram a cobertura ao longo do ciclo da cultura de 20, 40, 60, 80 e 100% da deficiência hídrica, sendo que este último nível corresponde à produtividade potencial. O incremento de produtividade devido à irrigação foi determinado pela diferença entre a produtividade da cana irrigada e a da cana de sequeiro. O modelo utilizado foi previamente calibrado, apresentando boa precisão (R^2 = 0,78) e acurácia (d = 0,93) para estimar a produtividade da cana planta de 12 meses tanto em condições de sequeiro quanto de irrigação, com erro absoluto médio (EAM) inferior a 20 t ha^{-1}. Os resultados mostraram que o incremento na produtividade decorrente do uso da irrigação mostrou depender da interação entre as condições meteorológicas, do solo, da época de plantio e do nível de cobertura da deficiência hídrica. No solo com menor disponibilidade hídrica, a resposta à irrigação foi maior. Dentre os locais estudados, Petrolina, PE, foi o de maior resposta à irrigação. No litoral da região nordeste, plantios realizados entre março e maio são os mais responsivos à irrigação. Por outro lado, os plantios realizados em outubro e janeiro são mais responsivos nas demais regiões de estudo. O emprego do modelo de simulação MZA-FAO, apesar de sua simplicidade, permitiu quantificar o incremento de produtividade com o uso de diferentes lâminas de irrigação, demonstrando que esta é uma prática com grande potencial para melhorar os níveis de produtividade da cana-de-açúcar nas diversas regiões produtoras do Brasil.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Modelos de simulação de culturas; Modelo da Zona Agroecológica da FAO; Deficiência hídrica; Irrigação com déficit; Irrigação plena

Abstract

Sugarcane is one of the most important crops in Brazil. In several regions, the water deficit caused by lack or irregular distribution of rain is the major limiting factor for sugarcane production. Moreover, sugarcane has also expanded into marginal areas where irrigation is required. In these areas, irrigation can be applied to mitigate the effects of water stress and crop simulation models can be used to evaluate the impact of irrigation on

sugarcane yield. Therefore, the aim of this study was to evaluate the potential of irrigation use in different areas in Brazil through the sugarcane yield estimation under rainfed and irrigated conditions, considering different levels of crop water deficit coverage. The FAO-Agroecological Zone model (MZA-FAO) was used to simulate 12-month plant cane yield planted every month of the year. Three different soil types with low, medium and high soil water holding capacity were considered for 29 locations in Brazil, considering a 30-year weather data series. Irrigation was applied to cover 20, 40, 60, 80, and 100% of the crop water deficit, with the former level corresponding to potential yield. Sugarcane yield increase due to irrigation was determined by the difference between yields under irrigated and rainfed conditions. The model was previously calibrated, presenting satisfactory performance, with good precision (R^2 = 0.78) and accuracy (d = 0.93) to estimate the 12-month plant cane yield in different conditions (rainfed and irrigated), with mean absolute error (MAE) lower than 20 t ha^{-1}. The results showed that yield increases depend on the interaction between weather conditions, soil, planting date and level of irrigation. The soil with low water availability had the largest response to irrigation. Among the studied sites, Petrolina in Pernambuco State, had the largest response to irrigation. On the coast of northeastern Brazil, plantings between March and May were more responsive to irrigation. On the other hand, plantings between October and January were more responsive to irrigation in areas located at the interior of the country. Despite its simplicity, the MZA-FAO crop simulation model allowed to show that irrigation is a practice with great potential to increase the sugarcane yield in several locations in Brazil.

Keywords: *Saccharum* spp.; Crop simulation models; FAO-Agroecological Zona Model; Water deficit; Deficit irrigation; Full irrigation

4.1 Introdução

A deficiência hídrica, proporcionada pela falta ou má distribuição das chuvas ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, é uma das principais causas das quebras de produtividade da referida cultura no mundo (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; BASNAYAKE et al., 2012). Na Austrália e na África do sul, cerca de 60% e 40% das áreas de cana-de-açúcar dependem de algum tipo de irrigação, enquanto que em alguns países, como a Suazilândia, a cultura somente pode ser cultivada com irrigação (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; CARR; KNOX, 2011). Segundo Laclau e Laclau (2009), aproximadamente 1% da área de produção da cana-de-açúcar é irrigada no Brasil.

O cultivo da cana-de-açúcar tem ocorrido, principalmente, em áreas ocupadas anteriormente por pastagens degradadas (RUDORFF et al., 2010; ADAMI et al., 2012) e em locais com considerável deficiência hídrica, como na região centro-oeste, no estado do Tocantins e no sudoeste da Bahia. Nesses ambientes de produção, considerados marginais por deficiência hídrica, a irrigação tem potencial para incrementar a produtividade de colmos e de sacarose.

Existem basicamente três os tipos de irrigação que podem ser empregados na cultura da cana-de-açúcar (DONZELLI; COSTA, 2010): i) Salvamento: visa suprir as necessidades hídricas da planta no período mais crítico após o plantio ou brotação da soqueira. Consiste na aplicação de uma lâmina de irrigação, variando de 30 a 80 mm, usualmente composta de águas residuárias ou água mais vinhaça. É muito difundida em áreas que necessitam de irrigação; ii) Com déficit: preconiza suprir parcialmente as deficiências hídricas em períodos críticos, como as fases de estabelecimento e de perfilhamento. Consiste na aplicação de quatro a seis lâminas de 40 a 60 mm, usualmente aplicada com águas residuárias, água mais vinhaça ou apenas água; iii) Plena: tem por intuito suprir todas as necessidades hídricas da planta ao longo de seu ciclo, com exceção da fase de maturação, sendo muito pouco usada nas condições brasileiras.

O impacto da irrigação na produtividade da cana-de-açúcar pode ser avaliado por meio de experimentação de campo ou por modelos de simulação de culturas. Os modelos de simulação têm por vantagens integrarem os efeitos de solo e clima em estudos envolvendo longas séries de dados meteorológicos (BOOTE et al., 1996), permitindo se ter uma melhor ideia da variabilidade interanual dos impactos da irrigação na produtividade. Monteiro e Sentelhas (2014) avaliaram o potencial do uso da irrigação no estado de São Paulo por meio do modelo da Zona Agroecológica da FAO e verificaram que as regiões norte e oeste do referido estado apresentam potencial de incremento na produtividade de colmos da ordem de 70 a 130 t ha^{-1}. Em estudo avaliando a irrigação de “salvamento” para diversas regiões do Brasil com o modelo DSSAT/CANEGRO, Vianna e Sentelhas (2015) concluíram que lâminas menores que 60 mm não incrementam significativamente a produtividade de colmos.

Dado a expansão da cultura da cana-de-açúcar para áreas com expressiva deficiência hídrica anual e a possibilidade de incrementos nos níveis de produtividade a suplementação hídrica, o presente estudo teve por objetivo avaliar o potencial do uso da irrigação, com diferentes níveis de cobertura da deficiência hídrica, em diversas localidades brasileiras por meio de um modelo de simulação de cultura.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Descrição e avaliação do modelo da Zona Agroecológica da FAO (MZA-FAO)

A avaliação do modelo MZA-FAO foi feita para produtividades de colmos em massa fresca. Os dados de produtividade de colmos de cana planta com ciclo entre 11 e 13 meses foram obtidos de 15 usinas/produtores no Brasil. Da região sudeste, foram utilizados 10 dados

de produtividade no total, sendo oito provenientes de condições sob irrigação e dois de sequeiro. Da região nordeste, oito dados foram provenientes de locais irrigados e quatro de locais sem irrigação, totalizando 12 dados no total. Na região centro-oeste não se dispunha de dados irrigados, apenas para a condição de sequeiro, sendo 19 dados utilizados na avaliação dos modelos. Ao todo, 41 dados de produtividade foram utilizados, sendo 60% em condições de sequeiro e os 40% para condições irrigadas. A profundidade de plantio foi 15 cm. A quantidade de gemas utilizadas no plantio variou de 12 a 15 por metro, enquanto que o espaçamento variou de 140 a 150 cm para as condições de sequeiro. Para as condições irrigadas, a quantidade de gemas utilizadas no plantio também variou entre 12 a 15 por metro, enquanto que o espaçamento variou entre 140 x 40 cm, 140 x 60 cm e 150 x 40 cm em função da disposição dos tubos gotejadores. Os canaviais foram conduzidos com elevado padrão de manejo. O método de irrigação empregado nos ensaios foi o gotejo subsuperficial, com a aplicação de lâminas de água variando de 500 a 750 mm nas épocas mais críticas, sendo que houve ensaios em que irrigação foi plena, com lâminas de 2000 mm. As cultivares não foram informadas na maioria dos casos, portanto, a avaliação dos modelos de simulação foi realizada para diversas cultivares de modo conjunto.

Os dados meteorológicos (temperaturas máxima e mínima do ar, precipitação e radiação solar global e insolação) foram obtidos da estação meteorológica mais próxima junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO), Agência Nacional de Águas (ANA), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP) e de estações próprias das empresas parceiras. Quando da ausência de dados de radiação solar global, esta variável foi estimada a partir dos métodos de Angström-Prescott, quando os dados de insolação estavam disponíveis, e de Hargreaves, quando apenas dados de temperatura estavam disponíveis, conforme recomendações de Allen et al. (1998). O saldo de radiação (Rn), necessário para o cálculo da ETo foi estimado como sendo 57,3% da Qg (PEREIRA et al., 1998; FERREIRA-JUNIOR et al., 2014). A identificação dos solos foi reportada pelas empresas parceiras. Os valores de capacidade de água disponível dos solos (CAD) foram baseados em Driessen e Konijn (1992) e Prado (2014) e variaram entre 27 e 130 mm.

O modelo MZA-FAO foi adaptado da proposta original de Doorenbos e Kassam (1979) para a escala diária de cálculo. O modelo é basicamente dividido em duas partes. A primeira parte calcula a produtividade potencial (PP), baseado na abordagem de de Wit

(1965), a qual é função dos fatores determinantes (como radiação solar, temperatura do ar e fotoperíodo) para calcular a fotossíntese bruta em termos de massa seca, com correções para o tipo de cultura, como metabolismo de fixação carbono, respiração de manutenção, índice de área foliar, coeficiente de colheita e umidade do produto colhido. As equações de correção podem ser encontradas nos trabalhos de Doorenbos e Kassam (1979) e Monteiro e Sentelhas (2014). Os índices de área foliar (IAF) empregados ao longo do ciclo da cultura são apresentados na Tabela 4.1. O coeficiente de colheita utilizado foi 0,77 e a umidade do colmo igual a 80% (DOORENBOS; KASSAM, 1979; MONTEIRO, 2015). Uma vez calculada a PP para o ciclo da cultura, essa foi penalizada em função da deficiência hídrica relativa, obtendo-se a produtividade atingível. A penalização foi calculada utilizando-se a deficiência hídrica relativa (1 - ETr/ETc), sendo ETr a evapotranspiração real e ETc a evapotranspiração máxima da cultura, e o coeficiente de sensibilidade à deficiência hídrica (ky) para cada fase de desenvolvimento da cultura A ETc foi calculada mediante o produto entre a evapotranspiração de referência (ETo) e o coeficiente de cultivo (kc). A ETo foi calculada pelo método de Priestley e Taylor (1972) e os valores de kc utilizados para as diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 4.1. A ETr foi calculada por meio do balanço hídrico de Thorntwhaite e Mather (1955), considerando-se a respectiva CAD de cada localidade. Os valores de ky diferem dos utilizados por Doorenbos e Kassam (1979), Monteiro e Sentelhas (2014) e Monteiro (2016), pois o modelo foi adaptado para cálculos na escala diária, na qual o déficit hídrico é maior, e pelo fato da fase de grande crescimento (elongação do colmo) ser mais sensível ao déficit hídrico (ROBERTSON et al., 1999; INMAN-BAMBER e SMITH, 2005). Os valores de ky são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar e respectivos valores de índice de área foliar (IAF), coeficiente de cultura (kc) e coeficiente de sensibilidade à deficiência hídrica (ky)

Fase de desenvolvimento	Duração da fase (dias)[1]	kc[1]	IAF[1]	ky[2]
1 - Do plantio até 25% de cobertura	30	0,55	2,0	0,10
2 - De 25-50% de cobertura	30	0,80	2,5	0,10
3 - De 50-75% de cobertura	15	0,90	3,0	0,15
4 - De 75% à cobertura plena	50	1,00	3,5	0,30
5 - Máximo crescimento	180	1,05	4,5	0,77
6 - Senescência	30	0,80	4,0	0,40
7 – Maturação	30	0,60	3,5	0,05
Total de dias do ciclo	365			

[1]Doorenbos e Kassam (1979) e Monteiro e Sentelhas (2014); [2] Calibrado no Capítulo 2. Para maiores detalhes ver itens 2.1.2.1 e 2.3.2.1

Antes de seu emprego na avaliação do impacto de diferentes níveis de irrigação na produtividade, o modelo MZA-FAO foi testado com dados independentes, por meio dos seguintes indicadores estatísticos: raiz quadrada do erro médio (RQEM), erro absoluto médio (EAM) e seu percentual (EAMP), coeficiente de determinação (R^2) e índice de acurácia (d) (WILLMOTT, 1985).

4.2.2 Impacto da irrigação na produtividade de colmos

No estudo, foram utilizadas 29 localidades, distribuídas em regiões tradicionais e de expansão da cana-de-açúcar no Brasil. Os dados meteorológicos foram obtidos junto ao INMET e estação da ESALQ/USP. A distribuição geográfica dos locais é apresentada na Figura 4.1. Foram organizados dados diários de temperaturas máxima e mínima, precipitação e insolação de 1978 a 2010. Quando da ausência de dados de radiação solar global, esta variável foi estimada a partir dos métodos de Angström-Prescott ou de Hargreaves, como apresentado anteriormente. As falhas de temperatura foram corrigidas da seguinte forma: i) falhas menores ou iguais a três dias, foi feita uma interpolação linear entre os dados dos dias anterior e posterior ao período faltante; ii) falhas maiores do que três dias foram preenchidas por meio do acesso aos bancos de dados gerados pelo AgMERRA (http://data.giss.nasa.gov/impacts/agmipcf/agmerra/) para o período de 1980 a 1983 e pelo NASA/POWER (http://power.larc.nasa.gov) para o período de 1984 a 2010. As poucas falhas nos dados de chuva foram preenchidas com dados ANA, adotando-se o critério da estação mais próxima, num raio máximo de 20 km.

Para avaliar a resposta da cana-de-açúcar aos diferentes níveis de cobertura da deficiência hídrica da cultura, foram realizadas simulações para as canas-planta de 12 meses, plantadas mensalmente ao longo da série de dados. As simulações foram iniciadas no primeiro dia de cada mês. O período de estudo compreendeu uma série de 30 anos. Foram utilizados três valores de CAD, que visam representar os principais tipos de solo que predominam nas regiões consideradas. Para representar um solo com baixa disponibilidade hídrica, foi utilizada uma CAD de 56 mm m^{-1}. Enquanto que para representar um solo com média disponibilidade hídrica, foi utilizada uma CAD de 88 mm m^{-1}. Por fim, para representar um solo com alta disponibilidade hídrica, foi utilizada uma CAD de 151 mm m^{-1}.

Para cada localidade, CAD e época de plantio, foram simuladas diferentes estratégias de irrigação. Ao todo, cinco níveis de cobertura da deficiência hídrica da cultura foram simulados: 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, obtendo-se as lâminas requeridas para cada

condição e o incremento de produtividade. O nível de cobertura 100% é a PP e os demais são as produtividades obtidas em condições de irrigação com déficit.

Nº	Local
1	Maringá, PR
2	Ivinhema, MS
3	Piracicaba, SP
4	Presidente Prudente, SP
5	Catanduva, SP
6	Votuporanga, SP
7	Uberaba, MG
8	Pompéu, MG
9	Capinópolis, MG
10	João Pinheiro, MG
11	Mocambinho, MG
12	Jataí, GO
13	Pirenópolis, GO
14	Formosa, GO
15	Diamantino, MT
16	Barreiras, BA
17	Aracaju, SE
18	Maceió, AL
19	Petrolina, PE
20	Recife, PE
21	João Pessoa, PB
22	Bom Jesus, PI
23	Floriano, PI
24	Natal, RN
25	Peixe, TO
26	Palmas, TO
27	Araguaína, TO
28	Balsas, MA
29	Marabá, PA

Figura 4.1 – Localidades brasileiras consideradas na avaliação do impacto da irrigação na produtividade de colmos da cultura da cana-de-açúcar

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Desempenho do modelo de simulação MZA-FAO

O desempenho do modelo MZA-FAO para estimar a produtividade de cana-de-açúcar foi satisfatório, apresentando boa precisão (R^2 = 0,78) e alta acurácia (d = 0,93). A Figura 4.2 apresenta a relação entre as produtividades de colmos estimadas pelo modelo MZA-FAO e as observadas para cana planta de 12 meses em diferentes localidades brasileiras, épocas de plantio e condições de cultivo (sequeiro e irrigado). Os resultados indicam que o modelo pode ser utilizado para estudos da variabilidade da produtividade da cana-de-açúcar em função de diferentes níveis de deficiência hídrica para as condições brasileiras, já que o modelo apresentou bom desempenho tanto para simular a cultura de sequeiro como irrigada. O EAM do modelo MZA para a estimação da produtividade foi inferior a 20 t ha^{-1} (EAMP ≈ 21%),

resultado numa produtividade simulada média de 118 t ha^{-1}, enquanto que a produtividade observada média foi de 114 t ha^{-1}.

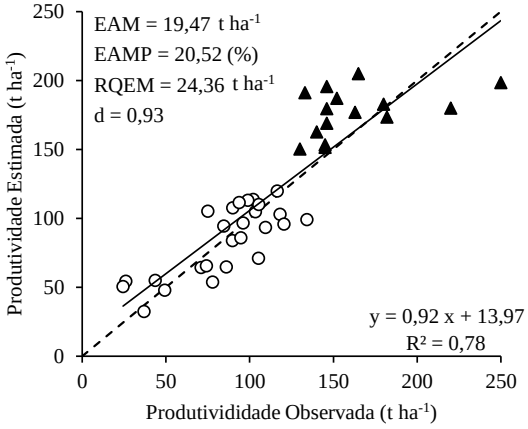


Figura 4.2 – Relação entre a produtividade de colmos observada e estimada pelo modelo MZA-FAO para cana planta de 12 meses em diversas localidades brasileiras. Dados provenientes da cultura em condições de sequeiro (○) e irrigada (▲)

4.3.2 Impacto da irrigação na produtividade de colmos em diferentes regiões brasileiras

A produtividade nas condições de sequeiro, bem como as lâminas e respectivas produtividades alcançadas nos níveis de cobertura da deficiência hídrica da cultura para as 29 localidades de estudo são apresentadas na Tabela 4.2, que indica os valores médios para os três níveis de CAD e para 12 datas de plantio. A produtividade nas condições de sequeiro variou entre 37 e 132 t ha^{-1}, enquanto que a produtividade sem restrição hídrica, ou seja, a produtividade potencial, variou de 171 a 231 t ha^{-1} para uma lâmina média aplicada no ciclo entre 315 e 1600 mm.

Diversos estudos com a cultura da cana-de-açúcar irrigada, apresentados abaixo, reforçam o bom desempenho obtido com o modelo MZA-FAO. Em estudo realizado por Guazzeli e Paes (1997), produtividades entre 166 e 174 t ha^{-1} para cultivar NA56-79 foram obtidas com irrigação plena nas condições de Pradópolis, SP, em um Latossolo muito argiloso (~ 95 km de Catanduva, SP). Em outro estudo conduzido em Botucatu, SP (~ 80 km de Piracicaba, SP), em um Nitossolo, Dalri e Cruz (2008) obtiveram entre 132 e 190 t ha^{-1} para o segundo corte da cultivar RB72-454 com lâmina irrigada de 540 mm. Todavia, experimentos realizados em Jaú, SP (~ 100 km de Piracicaba, SP) em solos com textura média para diversas cultivares relatam produtividades entre 100 e 141 t ha^{-1} para primeiro e segundo cortes, com lâminas entre 320 e 400 mm (GAVA et al., 2011; SILVA et al., 2014), os quais são ligeiramente inferiores aos obtidos pelo modelo MZA-FAO para essa região. Produtividades

de colmos para o segundo corte das cultivares RB85-5453 e SP80-1816 variando de 145 a 193 t ha^{-1} para lâminas entre 918 e 1539 mm foram obtidas em experimento com irrigação plena em Janaúba, MG (próximo à Mocambinho, MG), para um solo com média disponibilidade hídrica (Latossolo Vermelho de textura média) (OLIVEIRA et al., 2011a). Em experimento realizado no litoral de PE, Oliveira et al. (2011b) encontraram produtividades de diversas cultivares de cana planta de 17 meses entre de 155 a 255,6 t ha^{-1} para uma lâmina de 470 mm, valores proporcionais aos resultados obtidos neste estudo para o litoral nordestino. Andrade Junior et al. (2012) obtiveram produtividade de 207 t ha^{-1} sob irrigação plena em União, PI (~ 240 km de Floriano, PI) em um Plintossolo de textura média a argilosa para a cultivar RB86-7515. Em estudo conduzido com cana-de-açúcar irrigada com lâmina plena em Santo Antônio de Goiás, GO (~ 128 km de Pirenópolis, GO), Araújo et al. (2016) observaram produtividade de colmos para cultivar CTC4 da ordem de 172 t ha^{-1}, quando cultivada em solo de média disponibilidade hídrica (Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média).

A produtividade aumentou praticamente de modo linear com o aumento da lâmina de irrigação proporcional à cobertura da deficiência hídrica (Tabela 4.2). Resultados obtidos em cana-de-açúcar irrigada com lâmina correspondente a 50% da evapotranspiração da cultura em um Latossolo de textura média nas condições de Goianésia, GO (próximo a Pirenópolis, GO) por Campos et al. (2014) são similares aos encontrados neste estudo. Os autores obtiveram produtividades de colmos para diversas cultivares variando entre 108 e 170 t ha^{-1}, com média de 147,5 t ha^{-1}, para uma lâmina de aproximadamente 370 mm. No presente estudo, produtividades médias de 138 e 159 t ha^{-1} foram obtidas, respectivamente, para as condições de irrigação com 40% do déficit hídrico (197 mm) e de 60% (295 mm).

Os locais de menor resposta da cana-de-açúcar à irrigação foram Maringá, PR, Piracicaba, SP, Ivinhema, MS, e Jataí, GO (Tabela 4.3), enquanto que as maiores ocorreram em Petrolina, PE, onde o incremento relativo médio em condições de irrigação plena foi da ordem de 530%, o que corresponde a 195 t ha^{-1}. Entretanto, bons incrementos também foram obtidos em Mocambinho, MG, Barreiras, BA, Bom Jesus e Floriano, PI (Tabela 4.3), locais onde a deficiência hídrica anual é bastante elevada, exigindo lâminas pesadas de irrigação na condição plena.

O incremento potencial na produtividade de colmos mediante irrigação plena foi estimado por Monteiro e Sentelhas (2014) para o estado de São Paulo por meio do modelo MZA-FAO e encontraram valores entre 70 e 130 t ha^{-1} para as principais regiões produtoras. Para os locais de estudo no estado de São Paulo (Piracicaba, Catanduva, Presidente Prudente e

Votuporanga), os incrementos obtidos no presente estudo foram cerca de 20 a 30 t ha^{-1} menores em relação aos encontrados por Monteiro e Sentelhas (2014). A diferença nos níveis de incremento de produtividade sob irrigação plena pode ser explicada pelo fato da calibração do modelo feita por Monteiro e Sentelhas (2014) ter sido realizada com dados de produtividades reais do IBGE (manejo médio), diferentemente dos usados no presente estudo, os quais foram oriundos de condições de manejo ótimo, embora a nível operacional.

Tabela 4.2 – Lâminas médias (mm) e respectivas produtividades médias de colmos para diferentes localidades brasileiras em função dos níveis de cobertura (atendimento) da deficiência hídrica diária (%) ao longo do ciclo da cana planta de 12 meses. Valores médios para os três tipos de capacidade de água disponível (56, 88 e 151 mm) e 12 datas mensais de plantio

Local	Lâmina média (mm)					Produt. Sequeiro ($t\ ha^{-1}$)	Produtividade média ($t\ ha^{-1}$)				
	Nível de cobertura (%)						Nível de cobertura (%)				
	20	40	60	80	100		20	40	60	80	100
Maringá, PR	81	161	242	322	403	132	140	149	158	166	174
Ivinhema, MS	106	212	318	424	531	116	129	143	156	170	182
Piracicaba, SP	63	126	189	252	315	122	132	142	152	162	171
Presidente Prudente, SP	103	206	309	412	515	113	127	141	155	169	182
Catanduva, SP	144	288	433	577	721	92	109	127	148	168	187
Votuporanga, SP	134	267	401	535	668	94	112	131	152	173	192
Uberaba, MG	96	193	289	386	482	109	123	139	155	170	185
Pompéu, MG	152	303	455	606	758	73	93	115	139	166	191
Capinópolis, MG	132	264	396	528	660	88	108	130	153	177	199
João Pinheiro, MG	162	324	486	649	811	76	97	120	145	172	198
Mocambinho, MG	231	463	694	925	1157	50	73	101	135	174	214
Jataí, GO	74	148	223	297	371	120	133	147	161	175	187
Pirenópolis, GO	98	197	295	393	491	100	119	138	159	179	198
Formosa, GO	129	257	386	514	643	82	101	122	145	169	192
Diamantino, MT	150	300	449	599	749	101	120	141	163	186	207
Barreiras, BA	221	442	663	884	1105	61	85	112	144	180	215
Aracaju, SE	207	413	620	826	1033	90	113	138	165	195	223
Maceió, AL	171	342	512	683	854	107	127	149	172	197	221
Petrolina, PE	320	640	960	1280	1600	37	60	91	131	179	231
Recife, PE	115	231	346	461	577	129	147	165	184	203	220
João Pessoa, PB	149	298	447	596	745	110	131	154	178	203	226
Bom Jesus, PI	214	428	642	857	1071	65	88	116	148	184	219
Floriano, PI	218	436	654	872	1090	69	93	121	153	188	223
Natal, RN	214	428	642	856	1070	89	112	138	167	198	228
Peixe, TO	159	319	478	638	797	83	106	131	160	190	219
Palmas, TO	169	339	508	677	846	89	111	136	163	192	219
Araguaína, TO	120	240	359	479	599	111	130	151	172	194	214
Balsas, MA	189	379	568	758	947	77	100	127	156	188	219
Marabá, PA	158	316	474	632	790	102	123	147	172	198	222
Média Geral	154	309	463	618	772	93	112	133	157	181	205

A Figura 4.3 apresenta um resumo do incremento absoluto na produtividade de colmos da cana-de-açúcar para diferentes combinações de CAD e níveis de cobertura da deficiência hídrica, contemplando as 12 datas de plantio e as 29 localidades avaliadas, separadas entre litoral da região nordeste (Figura 4.3a) e demais regiões (Figura 4.3b). Observa-se que os maiores incrementos são para os solos com baixa disponibilidade hídrica e que à medida que se aumenta a cobertura do DEF (maiores lâminas de irrigação), se aumenta a magnitude do incremento nas diferentes CADs, para ambas as regiões consideradas. Na média de todos os locais, datas de plantio e CADs, a irrigação foi capaz de incrementar a produtividade de colmos em 19, 41, 64, 89 e 113 t ha^{-1}, para os níveis de cobertura da deficiência hídrica da cultura de 20, 40, 60, 80 e 100%, respectivamente.

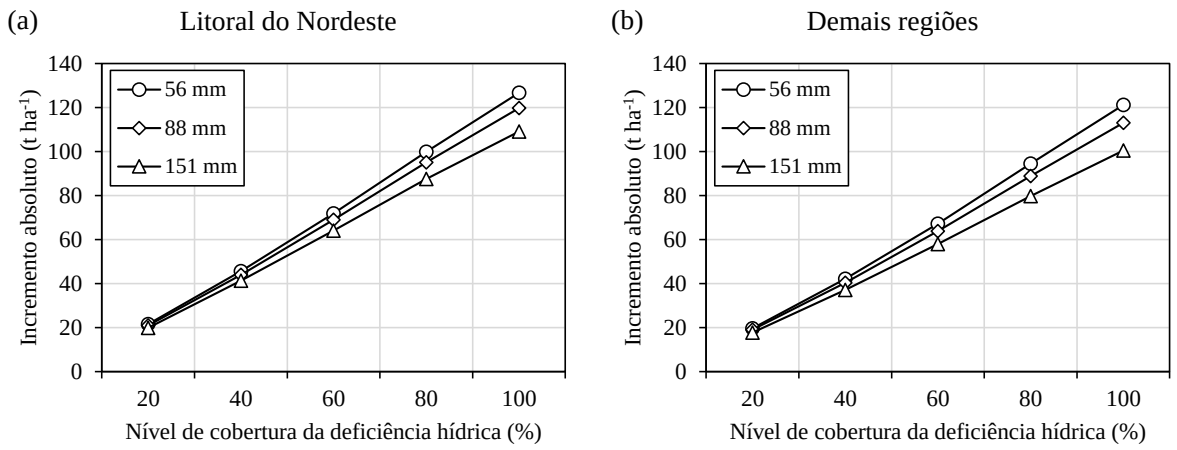


Figura 4.3 – Incrementos médios de produtividade de colmos da cana-de-açúcar (t ha^{-1}) com 12 meses e em diferentes níveis de cobertura da deficiência hídrica ao longo do ciclo (%), em solos com baixa (56 mm), média (88 mm) e alta (151 mm) disponibilidade hídrica para o litoral da região do nordeste (a) e para as demais regiões (b). Valores médios considerando as 12 datas de plantio

Os incrementos relativos em função da região, data de plantio e CAD são apresentados na Figura 4.4. O incremento é diferente em função das datas de plantio, os quais se devem, principalmente, pela interação entre época de ocorrência da deficiência hídrica e fase fenológica da cultura. No litoral da região nordeste (Figura 4.4a, Figura 4.4b e Figura 4.4c), plantios realizados entre março e maio são os mais responsivos à irrigação. Por outro lado, os plantios realizados entre outubro e janeiro são mais responsivos nas demais regiões avaliadas (Figura 4.4d, Figura 4.4e e Figura 4.4f). Respostas semelhantes em termos de época de plantio foram encontradas por Vianna e Sentelhas (2015), em estudo de irrigação de “salvamento” com o modelo DSSAT/CANEGRO para as mesmas regiões.

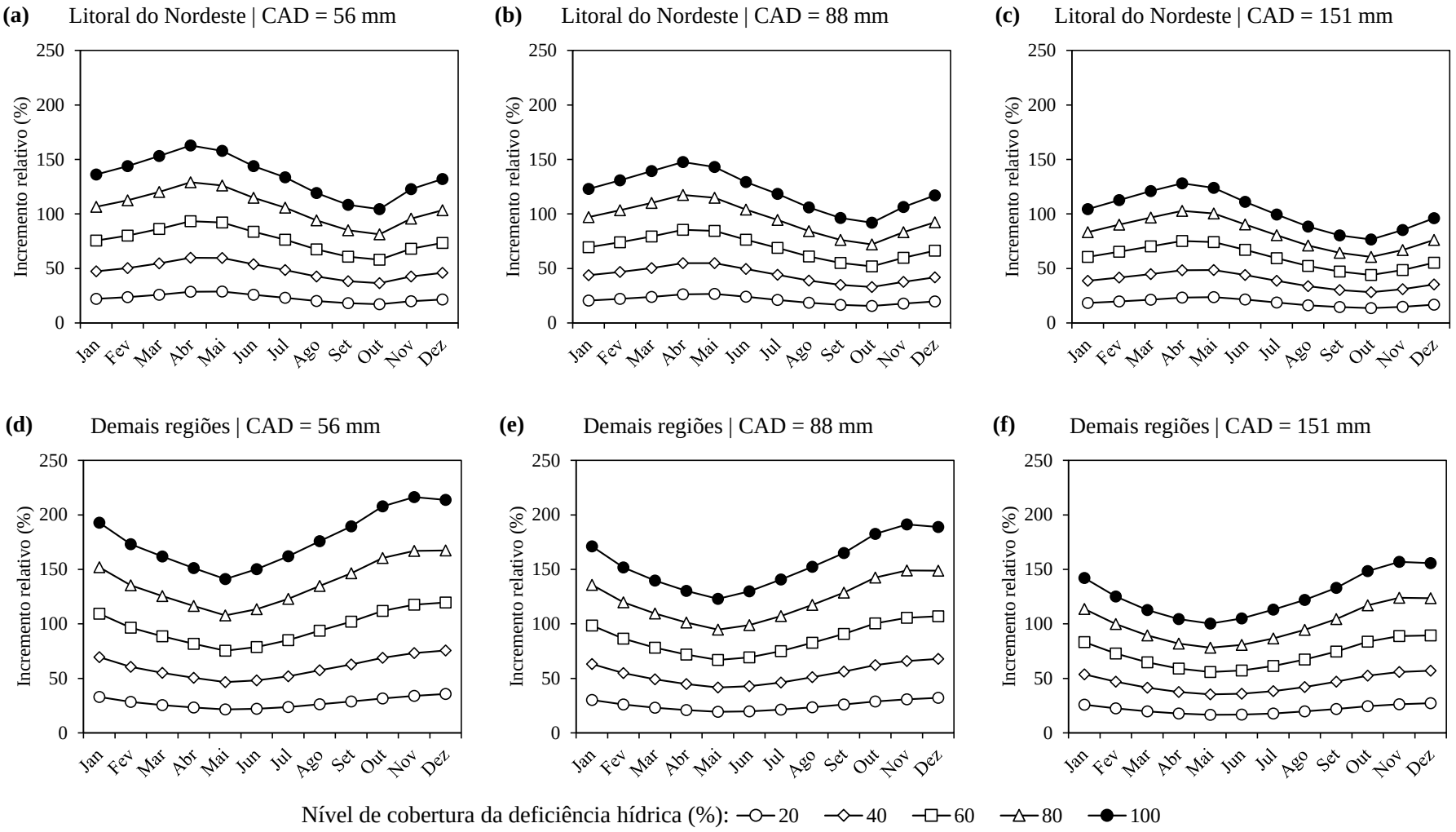


Figura 4.4 – Incrementos relativos médios (%) da produtividade de colmos da cana-de-açúcar de 12 meses em diferentes datas de plantio em função do nível de cobertura da deficiência hídrica ao longo do ciclo para o litoral da região nordeste em solos com baixa (a), média (b) e alta (c) disponibilidade hídrica, e para as demais regiões avaliadas, para os solos com baixa (d), média (e) e alta (f) disponibilidade hídrica

4.4 Conclusões

Apesar do presente estudo não ter considerado aspectos econômicos, operacionais, sociais e ambientais da irrigação, os resultados obtidos indicaram o incremento da produtividade de colmos da cana-de-açúcar com o uso da irrigação, tanto para os locais tradicionais de cultivo como nas áreas de expansão da atividade canavieira, revelando que a prática da irrigação tem um grande potencial, mesmo em áreas consideradas como aptas sem irrigação, fornecendo valiosas informações para o planejamento da agricultura irrigada.

De modo geral, o incremento da produtividade da cana-de-açúcar devido à irrigação, simulada pelo modelo MZA-FAO, é dependente da interação entre a cobertura do déficit hídrico (lâmina de irrigação), solo, clima e época de plantio. Em solos de menor disponibilidade hídrica o incremento na produtividade é maior. Para o litoral nordestino, os plantios de março a maio são os mais responsivos à irrigação, ao passo que nos plantios realizados entre outubro e janeiro, nas demais regiões avaliadas, o incremento na produtividade devido à irrigação é maior.

Referências

ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T.; FREITAS, R.M.F.; AGUIAR, D.A.; SUGAWARA, L.M. MELLO, M.P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, Basel, v. 4, p. 574-585, 2012.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 291p. (FAO. Irrigation Drainage and Paper, 56).

ANDRADE JUNIOR, A.S. de; BASTOS, E.A.; RIBEIRO, V.Q.; DUARTE, J.A.L.; BRAGA, D.L.; NOLETO, D.H. Irrigation, nitrogen and potassium levels under subsurface drip on sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 76-84, 2012.

ARAÚJO, R.; ALVES JUNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A.W.P. Variation in the sugar yield in response to drying-off of sugarcane before harvest and the occurrence of low air temperatures. **Bragantia**, Campinas, v. 75, n. 1, p. 118-127, 2016.

BASNAYAKE, J.; JACKSON, P.A.; INMAN-BAMBER, N.G.; LAKSHMANAN, P. Sugarcane for water-limited environments. Genetic variation in cane yield and sugar content in response to water stress. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 63, n. 16, p. 6023-6033, 2012.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential Uses and Limitations of Crop Models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 5, p. 704-716, 1996.

CAMPOS, P.F.; ALVES, J.; CASAROLI, D.; FONTOURA, P.R.; EVANGELISTA, A.W.P. Response of sugarcane varieties to supplemental irrigation in Brazilian Savanna. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, p. 1139-1149, 2014.

CARR, M.K.; KNOX, J.W. The water relations and irrigation requirements of sugar cane (*Saccharum officinarum*): A review. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 47, n. 1, p. 1-25, 2011.

DALRI, A.B.; CRUZ, R.L. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 28, n. 3, p. 516-524, 2008.

DONZELI, J.L.; COSTA, V.M. Impacto da produção de etanol no balanço hídrico nas regiões de expansão. In: **Workshop sobre o Impacto da produção de etanol nos recursos hídricos nas regiões de expansão**. CTBE, Campinas, 2010. Disponível em: <http://ctbe.cnpem.br/workshop-impacto-producao-etanol-recursos-hidricos-regioes-expansao/>. Acesso em: 3 Fev. 2016.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 139p. (Irrigation and Drainage paper, 33).

DRIESSEN, P.M.; KONIJN, N.T. **Land-use system analysis**. Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1992. 230p.

FERREIRA JUNIOR, R.A.; SOUZA; J.L. de; ESCOBEDO, J.F.; TEORODO, I.; LYRA, G.B.; NETO, R.A. de A. Cana-de-açúcar com irrigação por gotejamento em dois espaçamentos entrelinhas de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 8, p. 798-804, 2014.

GAVA, G.J. de C.; SILVA, M.A.; Da SILVA, R.C.; JERONIMO, E.M.; CRUZ, J.C.S.; KÖLLN, O.T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 250-255, 2011.

GUAZZELLI, M.A.N.; PAES, L.A.D. Irrigação de cana-de-açúcar comercial. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1997. 11p.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 185-202, 2005.

LACLAU, P.B.; LACLAU, J.P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 114, p. 351-360, 2009.

MONTEIRO, L.A. **Sugarcane yield gap in Brazil**: a crop modelling approach. 2015. 131p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

MONTEIRO, L.A.; SENTELHAS, P.C. Potential and actual sugarcane yields in Southern Brazil as a function of climate conditions and crop management. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, p. 264-276, 2014.

OLIVEIRA, E.C.A. de; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, A.C. de; SIMÕES NETO, D.E.; DA ROCHA, A.T.; DE CARVALHO, L.A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade

tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 6, p. 617-625, 2011b.

OLIVEIRA, F.M. de; ASPIAZÚ, I.; KONDO, M.K.; BORGES, I.D.; PEGORARO, R.F.; VIANNA, E.J. Crescimento e produção de variedades de cana-de-açúcar influenciadas por diferentes adubações e estresse hídrico. **Revista Trópica**, Chapadinha, v. 5, n. 1, p. 56-67, 2011a.

PEREIRA, A.B.; SENTELHAS, P.C.; VILLA NOVA, N.A. Estimativa do balanço de energia radiante em função de elementos climáticos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, p. 201-206, 1998.

PRADO, H. **Pedologia fácil**: aplicação em solos tropicais. 4. ed. Piracicaba: O Autor, UFV, 2014. 284p.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, New York, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

ROBERTSON, M.J.; INMAN-BAMBER, N.G.; MUCHOW, R.C.; WOOD, A.W. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 64, p. 211-227, 1999.

RUDORFF, B.F.T.; AGUIAR, D.A. de; SILVA, W.F. da; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Study on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using LandSat data. **Remote Sensing**, New York, v. 2, p. 1057-1076, 2010.

SILVA, M.A.; ARANTES, M.T.; RHEIN, A.F.L.; GAVA, J.C.; KÖLLN, O.T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 241-249, 2014.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DEN BERG, M. **DSSAT v4.5 - CANEGRO Sugarcane plant module**: scientific documentation. Mount Edgecombe: South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34p.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.

VIANNA, M. dos S.; SENTELHAS, P.C. Performance of DSSAT CSM-CANEGRO under operational conditions and its use in determining the ‘saving irrigation’ impact on sugarcane crop. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 17, p. 1-12, 2015.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O’DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

WIT, C.T. Photosynthesis of leaf canopies. **Agricultural Research Report**, Wageningen, v. 663, p. 1-56, 1965.

5 ESTIMAÇÃO DO NÚMERO DE DIAS DE SUSPENSÃO DA IRRIGAÇÃO ANTES DA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES REGIÕES BRASILEIRAS

Resumo

A maturação natural da cana-de-açúcar é condicionada por diversos fatores, dentre eles o estresse hídrico. Em sistemas de produção irrigados, a suspensão da aplicação de água por certo período de tempo antes da colheita, visa incrementar o teor e a produtividade de sacarose, além de propiciar condições adequadas de umidade do solo para as operações de colheita. A prática da irrigação no Brasil é ainda pouco utilizada e difundida na cultura da cana, no entanto, onde tal prática é usada ou esteja em expansão, ainda não há recomendações bem definidas sobre com quanto tempo antes da colheita deve-se suspender o fornecimento de água por irrigação. O presente estudo objetivou avaliar o número de dias de suspensão da irrigação antes da colheita para diferentes localidades no Brasil. O estudo foi conduzido com o uso do modelo APSIM-Sugarcane, previamente ajustado para as condições brasileiras. As simulações foram realizadas para cana planta de 12 meses em 12 localidades brasileiras, por um período de 30 anos, com o primeiro plantio ocorrendo em 1979 e o último em 2009. As colheitas foram simuladas de maio a novembro, período normalmente empregado pelas usinas das regiões avaliadas. Três tipos de solos com diferentes níveis de capacidade de água disponível (baixa, média e alta) foram utilizados nas simulações. O número de dias de suspensão da irrigação antes da colheita foi determinado bom base na recomendação de Robertson et al. (1999), a qual considera que a suspensão da aplicação de água deva reduzir a massa seca de colmos em no máximo 4% daquela obtida com a cultura irrigada até a colheita. Para cada data de plantio, a irrigação foi suspendida por 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 120 e 150 dias antes da colheita. A redução da produtividade de massa seca foi correlacionada com a estratégia de suspensão da irrigação de modo a determinar o número de dias de suspensão da irrigação que atendesse a recomendação acima. Como esperado, o número de dias de suspensão da irrigação variou com o local, o tipo de solo e a época da colheita, com a mediana oscilando entre 15 e 115 dias. O solo de maior disponibilidade hídrica requer maior número de dias de suspensão da irrigação, embora em locais, anos ou épocas de colheita muito secas a diferença do número de dias foi pequena entre os três solos simulados. A irrigação pode ser suspensa por no mínimo 30/35 dias em Votuporanga, SP, e Uberaba, MG, sobretudo em solos com maior disponibilidade hídrica. Petrolina, PE, Bom Jesus, PI, Barreiras, BA e Mocambinho, MG, geralmente apresentam menor número de dias de suspensão da irrigação requeridos antes da colheita da cana-de-açúcar e, portanto, menor risco de se aplicar a suspensão incorreta. Em geral, o início e o fim do período de colheita são aqueles onde há maior variabilidade e necessidade de dias suspensão da irrigação antes da colheita e, portanto, o uso de maturadores pode auxiliar no incremento da produtividade de sacarose. Os resultados apresentados são úteis no planejamento e nas tomadas de decisão em sistemas irrigados de produção de cana-de-açúcar, pois permite avaliar a melhor estratégia para maximizar a produtividade de sacarose.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Produtividade; Sacarose; Modelos de simulação de culturas; APSIM-Sugarcane

Abstract

The natural ripening process in sugarcane plants is influenced by several factors, including water stress. In irrigated production systems, the water is often withheld prior to harvest, a process called drying-off, which is done to increase the sucrose content and sucrose yield, and also to provide suitable conditions of soil moisture for harvesting operations. The practice of irrigation in Brazil is still underused and poorly established in the sugarcane production system, nevertheless, in the areas where this practice is already adopted or is expanding to, there is no well-defined recommendation about the optimum length of the drying-off period. Based on that, this study aimed to evaluate drying-off periods before harvest required by different locations in Brazil. APSIM-Sugarcane model, adjusted for Brazilian conditions of this study, was used to simulated sugarcane crop. Simulations were conducted for 12-month plant cane in 12 Brazilian locations for a 30-year long-term period. The harvest dates were simulated from May to November, which is the common harvesting season in sugarcane mills in the evaluated regions. Three types of soils with different soil water holding capacities (low, medium and high) were employed. The drying-off days were estimated based on the target determined by Robertson et al. (1999), who found that the optimum time is attained when sugarcane yield (in dry mass basis) is reduced up to 4% in relation to the well-watered condition. For each harvest date, irrigation was withheld for 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 120 and 150 days before harvest. The reduction in sugarcane yield was correlated with the drying-off strategy to determine the number of days of withholding water that meets the above recommendation. As expected, the number of drying-off days varies according to location, soil type and harvest date, with the median ranging from 15 to 115 days. Soil with high water holding capacity required more drying-off days, although in very dry areas, years or harvest data the differences of drying-off days was little among the three soil types considered. In Votuporanga, SP, and Uberaba, MG, mainly for the soil with high water holding capacity, the irrigation can be suspended at least 30/35 days before harvest. Petrolina, PE, Bom Jesus, PI, Barreiras, BA and Mocambinho, MG, usually required less drying-off days, consequently, these areas have lower risk of applying a wrong drying-off period. In general, the beginning and end of the harvesting season required more drying-off days and had the highest variability. Therefore, the use of chemical ripeners can be used to increase sucrose yield in these conditions, mainly in the beginning of the harvesting season. The results are useful for planning and decision-making processes in irrigated sugarcane production systems, since it allows to evaluate the best strategy to maximize sucrose yield.

Keywords: *Saccharum* spp.; Yield; Sucrose; Crop simulation models; APSIM-Sugarcane

5.1 Introdução

Os principais fatores que afetam a maturação natural da cana-de-açúcar são o estresse hídrico, temperatura, radiação solar, fotoperíodo, idade e nutrição da cultura, especialmente o nitrogênio (ALEXANDER, 1973; SCARPARE; BEUCLAIR, 2004; CARDOZO; SENTELHAS, 2013; VAN HEERDEN et al., 2014). Em regiões tropicais, onde a temperatura não é um fator limitante ao crescimento da cana-de-açúcar, a indução natural da maturação é causada, sobretudo, pelo estresse hídrico (ALEXANDER, 1973).

Em sistemas de produção de cana-de-açúcar irrigados o fornecimento de água é suspenso por certo período de tempo antes da colheita, prática conhecida como *drying-off*, visando propiciar condições adequadas para a colheita, reduzir gastos com água e custos da irrigação e condicionar aumento do teor de sacarose nos colmos e elevando produtividade de sacarose por hectare (ROBERTSON e DONALDSON, 1998; ROBERTSON et al., 1999; INMAN-BAMBER, 2004). A prevenção ao tombamento das plantas e à compactação do solo podem ser outros benefícios da suspensão da irrigação antes da colheita (ROBERTSON et al., 1999).

Entretanto, é difícil definir qual o período em que se deve suspender a irrigação para obter alta produtividade de sacarose, pois tal período é influenciado por mudanças na relação entre produtividade de colmos e teor de sacarose nos colmos (ROBERTSON et al., 1999). Estes por sua vez são influenciados pelo genótipo, tipo de solo, condições agroclimáticas e época de colheita (ROBERTSON e DONALDSON, 1998; ROBERTSON et al., 1999; INMAN-BAMBER, 2004; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; BASNAYAKE et al., 2012).

Embora a suspensão da irrigação possa condicionar aumento no teor de sacarose, é de extrema importância se minimizar as perdas de biomassa, de modo que se atinja a maior produtividade de sacarose por hectare. Robertson e Donaldson (1998) analisaram 37 experimentos com suspensão de irrigação antes da colheita da cana-de-açúcar conduzidos na África do Sul e verificaram que em 19 dos 83 tratamentos (23%) a produtividade de sacarose aumentou. O máximo incremento obtido foi 2,5 t ha^{-1} e nos 19 tratamentos onde houve algum incremento, a perda de massa seca de colmos foi menor do que 10%. Incremento de 3,6 t ha^{-1} foi obtido por Inmam-Bamber (2004) nas condições agroclimáticas da Austrália, utilizando o número de folhas verdes por colmos como indicador de quando suspender a irrigação.

De acordo com Robertson et al. (1999), baseados nos dados experimentais utilizados por Robertson e Donaldson (1998) em conjunto com outros experimentos conduzidos na Austrália, o máximo benefício econômico da suspensão da irrigação ocorreu quando a massa seca de colmos foi reduzida entre 4 e 8%, dependendo do modo de pagamento da cana-de-açúcar. Os custos de colheita e transporte foram levados em consideração, no entanto, os gastos com irrigação não. Robertson et al. (1999) desenvolveram metodologia para avaliar o risco da suspensão da irrigação antes da colheita da cana-de-açúcar para três locais (dois na Austrália e um na África do Sul) e três solos distintos, utilizando o modelo APSIM-Sugarcane e os limiares de perda de massa seca de colmos de 4 e 8%. Os autores verificaram que número de dias de suspensão da irrigação foi altamente variável, mostrando que recomendações fixas

ignoram os riscos associados a essa prática, o que pode levar a prejuízos aos produtores. A metodologia de análise de risco da suspensão da irrigação desenvolvida por Robertson et al. (1999), embora menos útil para produtores experientes em uso da irrigação, pode ser útil para áreas sem recomendação, áreas para onde a cultura está se expandindo, bem como áreas onde a prática de irrigação está crescendo e onde pretende se ter colheitas fora de épocas comuns. Tais situações são encontradas no setor sucroenergético brasileiro. A metodologia desenvolvida por Robertson et al. (1999) foi aplicada por Donaldson e Bezuidenhout (2000) para seis locais e quatros solos distintos na África do Sul, por meio do modelo DSSAT/CANEGRO (SINGELS et al., 2008), e tais autores também observaram grande variabilidade do número de dias de suspensão da irrigação entre solos, locais e épocas de colheita.

Apesar da irrigação da cultura da cana-de-açúcar no Brasil ainda ser pouco utilizada, com os sistemas de produção se restringindo ao uso da irrigação de salvamento, com lâminas aplicadas após plantio ou rebrota de soqueiras em épocas secas, geralmente acompanhada vinhaça (fertirrigação), há uma ampla perspectiva do uso da irrigação suplementar ou plena nessa cultura, a exemplo do que já vem ocorrendo nas áreas de produção em Jaíba, MG, Goianésia, GO, Petrolina, PE, e Juazeiro, BA.

Experimentos ou recomendações envolvendo suspensão da irrigação antes da colheita da cana-de-açúcar são raros no Brasil. Teixeira (2009) avaliaram a suspensão da irrigação para a primeira soca da cultivar SP81-3250, cultivada sob Neossolo Quartazrênico e colhida com 12 meses em dezembro de 2007 em Jaíba, MG. A irrigação foi suspensa em 10, 15, 20, 30 e 40 dias antes da colheita. A produtividade de colmos (massa fresca) e o teor de açúcares totais recuperáveis não diferiram entre os tratamentos e o autor concluiu que a irrigação pode ser suspensa 40 dias antes na região norte de Minas Gerais. Em outro estudo realizado em uma área com um Neossolo Quartzarênico, também nas condições de Jaíba, MG, com a segunda soca da cultivar RB86-7515 colhida com 13 meses no início de outubro de 2010, Vieira et al. (2013) não recomendam suspensão da irrigação além de 7 dias para as condições do estudo (a irrigação foi suspensa até 50 dias antes da colheita), pois a suspensão promoveu queda na produtividade de sacarose. Araújo et al. (2016) conduziram experimento com suspensão da irrigação antes da colheita para cana planta de 15 meses em Santo Antônio de Goiás, GO, em um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média. A cultivar utilizada foi a CTC4 e a irrigação foi suspensa 0, 15, 30, 60 e 90 dias antes da colheita, a qual foi realizada em setembro. A produtividade de colmos (massa fresca) foi similar entre os tratamentos,

contudo, os melhores resultados de qualidade da matéria-prima da cana-de-açúcar ocorreram com 30 dias antes da colheita, período em que a irrigação da cultura pode ser interrompida, segundo os autores. Barbosa (2015) em experimento conduzido em casa de vegetação nas condições de Piracicaba, SP, com diversas cultivares recomenda a irrigação plena até o fim do ciclo, visando maior produtividade de sacarose. No entanto, esse autor não levou em consideração aspectos operacionais e econômicos.

Como ainda há controvérsias a respeito da suspensão da irrigação antes da colheita e da produtividade de sacarose em canaviais irrigados, já que a maioria dos experimentos nessa linha se restringem a locais e anos específicos, o presente estudo teve por objetivo estimar o número de dias de suspensão da irrigação da cana-de-açúcar antes da colheita da cana-de-açúcar, considerando-se a metodologia proposta por Robertson et al. (1999), empregando-se o modelo de simulação APSIM-Sugarcane para 12 regiões brasileiras, em 30 anos de dados meteorológicos, para três tipos de solos e em sete épocas de colheita.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Modelo APSIM-Sugarcane

O modelo utilizado neste estudo foi o APSIM-Sugarcane, o qual é descrito por Keating et al. (1999). Antes do uso do modelo, o mesmo foi avaliado para a estimativa da produtividade de colmos em massa fresca. Os dados de produtividade de colmos de cana planta com ciclo entre 11 e 13 meses foram obtidos de 15 usinas/produtores no Brasil. Da região sudeste, foram utilizados 10 dados de produtividade no total, sendo 8 provenientes de condições sob irrigação e dois de sequeiro. Da região nordeste, oito dados foram provenientes de locais irrigados e quatro de locais sem irrigação, totalizando 12 dados no total. Na região Centro-Oeste não se dispunham de dados de áreas irrigadas, apenas de condições de sequeiro, onde 19 dados foram utilizados na avaliação dos modelos. Ao todo, 41 dados de produtividade foram utilizados, sendo 60% em condições de sequeiro e os 40% de áreas irrigadas. A profundidade de plantio foi 15 cm. A quantidade de gemas utilizadas no plantio variou de 12 a 15 por metro, enquanto que o espaçamento variou de 140 a 150 cm para as condições de sequeiro. Para as condições irrigadas, a quantidade de gemas utilizadas no plantio também variou entre 12 a 15 por metro, enquanto que o espaçamento variou entre 140 x 40 cm, 140 x 60 cm e 150 x 40 cm em função da disposição dos tubos gotejadores. Os canaviais foram conduzidos com elevado padrão de manejo. O método de irrigação empregado nos ensaios foi o gotejo subsuperficial, com a aplicação de lâminas de água

variando de 500 a 750 mm nas épocas mais críticas, sendo que houve ensaios em que irrigação foi plena, com lâminas de 2000 mm. As cultivares não foram informadas na maioria dos casos, portanto, a avaliação dos modelos de simulação foi realizada para diversas cultivares de modo conjunto. Não se dispunham de dados da quantidade de nitrogênio aplicado, nas simulações para avaliação do modelo considerou-se que foi aplicado de 100 kg N ha^{-1} para as áreas de sequeiro e 150 kg N ha^{-1} para as áreas irrigadas. No caso das condições em sequeiro, a aplicação foi realizada 30 dias após o plantio. Já para as condições irrigadas, a dose foi parcelada em 75 kg aplicados 30 e 60 dias após plantio. A profundidade de aplicação foi 7,5 cm.

Os dados meteorológicos (temperaturas máxima e mínima do ar, precipitação e radiação solar global ou insolação) empregados como dados de entrada do modelo APSIM-Sugarcane foram obtidos da estação meteorológica mais próxima junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO), Agência Nacional de Águas (ANA), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP) e de estações próprias das empresas parceiras. Quando da ausência de dados de radiação solar global, esta variável foi estimada a partir dos métodos de Angström-Prescott, quando havia dados de insolação disponíveis, ou de Hargreaves, quando havia apenas dados de temperatura do ar, conforme recomendações de Allen et al. (1998). A evapotranspiração foi calculada pelo método de Priestley e Taylor (1972).

A identificação dos solos foi reportada pelas empresas parceiras, todavia não se dispunham de dados físico-hídricos e químicos detalhados dos perfis. Como alternativa, os dados de solo foram obtidos junto ao banco de dados RadamBrasil (BRASIL, 1981) e WISE (*World Inventory of Soil Emission Potentials*) (BATJES et al., 1995; GIJSMAN et al., 2007), nos quais se buscou características similares ao tipo de solo informado. A fração da água disponível que pode ser extraída por dia foi definida como sendo de 0,1, 0,08, 0,06, 0,04, 0,02 e 0,01 mm dia^{-1} para as camadas 0-30, 30-60, 60-90, 90-120, 120-150 m ou mais de profundidade, respectivamente (INMAN-BAMBER et al., 2000; APSIM, 2014).

Os parâmetros de fenologia e da partição de biomassa do modelo APSIM-Sugarcane foram ajustados a partir das calibrações de Marin et al. (2013) e Costa et al. (2014) para as cultivares RB86-7515 e SP80-1842, respectivamente. Na Tabela 5.1 são apresentados os valores dos parâmetros de cultivar utilizada no projeto.

Tabela 5.1 – Parâmetros para a cultivar padrão do modelo APSIM-Sugarcane (Q117) e ajustados para os dados do presente estudo, considerando-se diversas cultivares

Parâmetro[1]	Q117					Diversas cultivares				
leaf_size	1500	55000	55000			1500	55000	50000		
leaf_size_no	1	14	20			1	14	20		
cane_fraction	0,7					0,72				
sucrose_fraction_stalk	1	0,55				1	0,55			
stress_factor_stalk	0,2	1				0,2	1			
tt_emerg_to_begcane	1900					1025				
tt_begcane_to_flowering	6000					6000				
tt_flowering_to_crop_end	2000					2000				
green_leaf_no	13					12				
tillerf_leaf_size	1,5	3	2,5	1	1	1,5	3	2,5	1,5	1
tillerf_leaf_size_no	1	4	10	12	26	1	4	10	12	26

[1] A descrição desses parâmetros encontra-se na Tabela 2.8 do Capítulo 2

Para avaliar o desempenho do modelo APSIM-Sugarcane quando comparados os dados de produtividade de colmos da cana-de-açúcar simulados e observados, foram utilizados os seguintes indicadores estatísticos: Raiz quadrada do erro médio (RQEM), erro absoluto médio (EAM) e seu percentual (EAMP), coeficiente de determinação (R^2) e índice de acurácia (d) (WILLMOTT, 1985).

5.2.2 Simulações para estimação do número de dias de suspensão da irrigação antes da colheita

As simulações no modelo APSIM-Sugarcane foram realizadas para se estimar a produtividade de massa seca de colmos da cana-de-açúcar, considerando-se diferentes períodos de suspensão da irrigação antes da colheita.

Para tanto, foram utilizadas 12 localidades, distribuídas em locais tradicionais e de expansão do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil, onde a prática da irrigação é utilizada ou tem potencial para tanto. A distribuição geográfica dos locais é apresentada na Figura 5.1. Os dados meteorológicos diários (temperaturas máxima e mínima, precipitação e radiação solar), exigidos como dados de entrada no modelo APSIM-Sugarcane, foram obtidos junto ao INMET, para o período de 1978 a 2010. Quando da ausência de dados de radiação solar global, foram adotadas as mesmas técnicas de preenchimento mencionadas anteriormente. As falhas de temperatura foram corrigidas da seguinte forma: i) falhas menores ou iguais a três dias - foi feita uma interpolação linear entre os dados dos dias anterior e posterior ao período faltante e; ii) falhas maiores do que três dias foram preenchidas por meio do acesso aos

bancos de dados do AgMERRA (http://data.giss.nasa.gov/impacts/agmipcf/agmerra/), para o período de 1978 a 1983 e do NASA/POWER (http://power.larc.nasa.gov), para o período de 1984 a 2010. As poucas falhas nos dados de chuva foram preenchidas com dados das estações pluviométricas da ANA, adotando-se o critério da estação mais próxima, num raio máximo de 20 km.

Foram definidos três tipos de solos genéricos que visam representar diferentes condições de capacidade de água disponível (CAD), os quais foram obtidos junto à base WISE (BATJES et al., 1995; GIJSMAN et al., 2007). Para representar um solo com baixa disponibilidade hídrica, foi utilizado o perfil de um Neossolo Quartzarênico, com CAD de 0,56 mm água cm^{-1} de solo. Já para um solo com média disponibilidade hídrica, foi utilizado um perfil de um Latossolo de textura média, com CAD de 0,88 mm cm^{-1}. Por fim, um perfil de Latossolo de textura muito argilosa, com CAD de 1,51 mm cm^{-1}, foi utilizado para representar um solo de alta disponibilidade hídrica. A Tabela 5.2 apresenta as características físico-hídricas dos três tipos de solos utilizados no presente estudo. Os valores do número da curva (do inglês, *Curve Number*) desses solos foram: 61 para o Neossolo Quartzarênico; e 76 para os dois Latossolos. Os valores de albedo do solo foram de 0,14 para o Neossolo Quartzarênico e de 0,13 para os Latossolos. Os valores adotados da taxa de drenagem do solo foram 0,4 para o Neossolo Quartzarênico e o Latossolo de textura muito argilosa, enquanto que para o Latossolo de textura média o valor utilizado foi 0,6. A fração da água disponível que pode ser extraída por dia foi definida como sendo 0,1, 0,08, 0,06, 0,04, 0,02 e 0,01 mm dia^{-1} respectivamente para as camadas de 0-30, 30-60, 60-90, 90-120, 120-150 cm ou mais de profundidade, respectivamente (INMAN-BAMBER et al., 2000; APSIM, 2014).

Figura 5.1 – Localidades brasileiras onde foram determinados os números de dias de suspensão da irrigação antes da colheita

Foram simuladas canas-planta de 12 meses, com plantios mensais de maio a novembro, época comum da safra da cana-de-açúcar nas regiões avaliadas. O plantio foi realizado no primeiro dia dos meses mencionados, para uma série de 30 anos, em que o primeiro ano de plantio foi em 1979 e o último em 2009. A irrigação foi aplicada ao longo do ciclo para não ocorrer estresse hídrico na planta. Antes da colheita, a irrigação foi suspendida por 15, 30, 45, 60, 75, 90, 120 e 150 dias. Em todos os casos a eficiência da irrigação foi considerada como 100%. No modelo, o nitrogênio foi aplicado para não limitar a produtividade. Para cada ano, época de plantio e tipo de solo, a massa seca de colmos foi expressa como fração da cana-de-açúcar irrigada de modo pleno (sem suspensão da irrigação). Foram obtidas equações de regressão linear entre a massa seca relativa de cana-de-açúcar e o número de dias de suspensão da irrigação. De posse dessas equações, o número de dias de suspensão da colheita foi obtido utilizando-se como referência a relação de 0,96 entre a cana com suspensão da irrigação e aquela irrigada até o fim do ciclo, ou seja, até 4% de redução de

massa seca, conforme sugerido por Robertson et al. (1999). Não foram realizadas extrapolações além dos 150 dias, portanto, nos casos em que o valor obtido pela equação de regressão ultrapassou esse limite, o número de dias de suspensão da irrigação foi considerado como 150 dias.

Tabela 5.2 – Características físico-hídricas de um solo de baixa (Neossolo Quartzarênico), média (Latossolo de textura média) e alta (Latossolo de textura muito argilosa) capacidade de água disponível, empregados no presente estudo

Prof.	Horiz.	Areia	Silte	Argila	Ds[(1)]	PMP[(2)]	CC[(3)]	θs[(4)]	Ksat[(5)]	CAD[(6)]
(cm)	-	-------- (%) ---------			(g cm^{-3})	------ (cm^3 cm^{-3}) ------			(cm h^{-1})	(mm)
				Neossolo Quatzarênico						
0-6	Ah_1	93	4	3	1,40	0,028	0,111	0,430	31,38	5,0
0-19	Ah_2	95	3	2	1,48	0,025	0,093	0,408	43,05	8,8
19-50	Ah_3	96	2	2	1,46	0,020	0,070	0,410	40,45	15,5
50-75	AC	96	2	2	1,53	0,021	0,090	0,394	43,40	17,3
75-150	C	94	3	3	1,57	0,030	0,080	0,360	51,92	37,5
				Latossolo de textura média						
0-28	Ah	82	3	15	1,55	0,040	0,171	0,378	5,95	36,7
28-56	BA_1	76	4	20	1,38	0,100	0,180	0,420	8,41	22,4
56-85	BA_2	75	5	20	1,32	0,100	0,180	0,420	9,85	23,2
85-165	Bw	72	5	23	1,36	0,110	0,190	0,420	7,54	64,0
				Latossolo de textura muito argilosa						
0-30	A	16	8	76	1,14	0,256	0,405	0,541	0,45	44,7
30-60	BA	12	11	77	1,21	0,236	0,388	0,519	0,45	45,6
60-150	Bw	13	10	77	1,26	0,236	0,388	0,507	0,38	136,8

[(1)] Densidade do solo; [(2)] Ponto de murcha permanente (-1500 kPa); [(3)] Capacidade de campo (-10 kPa); [(4)] Ponto de saturação medido; [(5)] Condutividade hidráulica saturada; [(6)] Capacidade de água disponível

5.3 Resultados e discussão

5.3.1 Desempenho do modelo

O desempenho do modelo APSIM-Sugarcane para estimar a produtividade de cana-de-açúcar foi satisfatório, apresentando boa precisão (R^2 = 0,78) e acurácia (d = 0,92), com EAM inferior a 18 t ha^{-1} (EAMP ≈ 15%), sendo a produtividade simulada média pelo modelo de 104 t ha^{-1}, enquanto que a produtividade observada média foi de 114 t ha^{-1}.

A Figura 5.2 apresenta a relação entre a produtividade de colmos estimada pelo modelo APSIM-Sugarcane e observada para canas planta de 12 meses em diferentes localidades brasileiras, épocas de plantio e condições de cultivo (sequeiro e irrigado). Os

resultados indicam que o modelo pode ser utilizado para estudos de variabilidade da produtividade da cana-de-açúcar e de diferentes níveis de irrigação para as condições brasileiras, já que consegue representar a variabilidade observada em condições operacionais em condições ótimas de manejo agrícola. A produtividade simulada média pelo modelo foi 104 t ha^{-1}, enquanto que a produtividade observada média foi 114 t ha^{-1}.

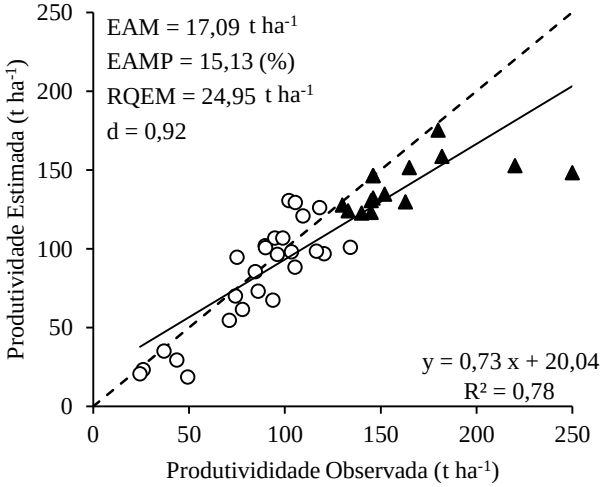


Figura 5.2 – Relação entre a produtividade de colmos de cana planta de 12 meses observada e estimada pelo modelo APSIM-Sugarcane para diversas localidades brasileiras. Dados provenientes da cultura em condições de sequeiro (○) e de irrigação (▲)

5.3.2 Número de dias de suspensão da irrigação antes da colheita

A Figura 5.3 apresenta a variabilidade da precipitação pluvial mensal para os locais de estudo, bem como a temperatura média mensal do ar. Dentre os locais de estudo, Votuporanga, SP, Uberaba, MG, e Jataí, GO, são os mais úmidos e apresentam as menores temperaturas do ar no inverno (Figuras 5.3a, 5.3b e 5.3e). O local mais seco é Petrolina, PE, (Figura 5.3l), onde a precipitação anual média é da ordem de 600 mm. João Pinheiro, MG (Figur 5.3c), e Pirenópolis, GO (Figura 3.5f), apresentam regimes hídricos e térmicos similares. As demais localidades apresentam regimes hídricos semelhantes, com inverno bem seco. No geral, a precipitação na primavera e verão (fim de setembro a fim de março) apresenta alta variabilidade, especialmente durante os meses de janeiro e fevereiro.

As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam o número de dias de suspensão da irrigação para que a massa seca de colmos seja 96% daquela de uma cultura plenamente irrigada para os 12 locais de estudo, três tipos de solos e sete épocas de colheita. Os limites superior e inferior das barras em cinza indicam os quartis 75% e 25% em uma distribuição de probabilidade, respectivamente, onde a linha horizontal central corresponde à mediana (50%) e os extremos,

representados pelas linhas verticais mais as barras, são os valores máximos e mínimos da distribuição (sem *outliers*). Quanto mais longa a barra cinza, maior a variabilidade observada no número de dias requeridos para que se atinja o limiar desejado com a suspensão da irrigação antes da colheita da cana-de-açúcar, visando o incremento na produtividade de sacarose. Sendo assim, pode-se admitir que quanto maior a variabilidade desse período, maior o risco de que a mediana não represente o valor correto. Desse modo, a diferença entre a mediana e o limite inferior da barra indica o risco da suspensão da irrigação ser excessiva, em anos relativamente mais secos, ao passo que a diferença entre a mediana e o limite superior da barra indica o risco da suspensão da irrigação ser insuficiente, em anos relativamente mais úmidos.

O número de dias de suspensão da irrigação foi variável em função do local, tipo de solo e época de colheita. No geral, os meses de julho a setembro necessitam de menos dias de suspensão da irrigação, como se pode observar nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6. Como esperado, o solo com maior disponibilidade hídrica requer mais dias de suspensão da irrigação antes da colheita e o risco em adotar essa prática é maior. Como há maior fornecimento de água ao longo do ciclo da cultura em solos desse tipo, o efeito da deficiência hídrica na cultura é minimizado, fazendo com que a planta priorize o crescimento vegetativo em detrimento do acúmulo de sacarose. A irrigação pode ser suspensa por no mínimo 30/35 dias em Votuporanga, SP, e Uberaba, MG, principalmente em solos com CAD média a alta (Figura 5.4). Petrolina, PE, Bom Jesus, PI, Barreiras, BA (Figura 5.6) e Mocambinho, MG (Figura 5.4), geralmente apresentam menor número de dias de suspensão da irrigação requeridos antes da colheita da cana-de-açúcar e, portanto, menor risco de se aplicar a suspensão incorreta.

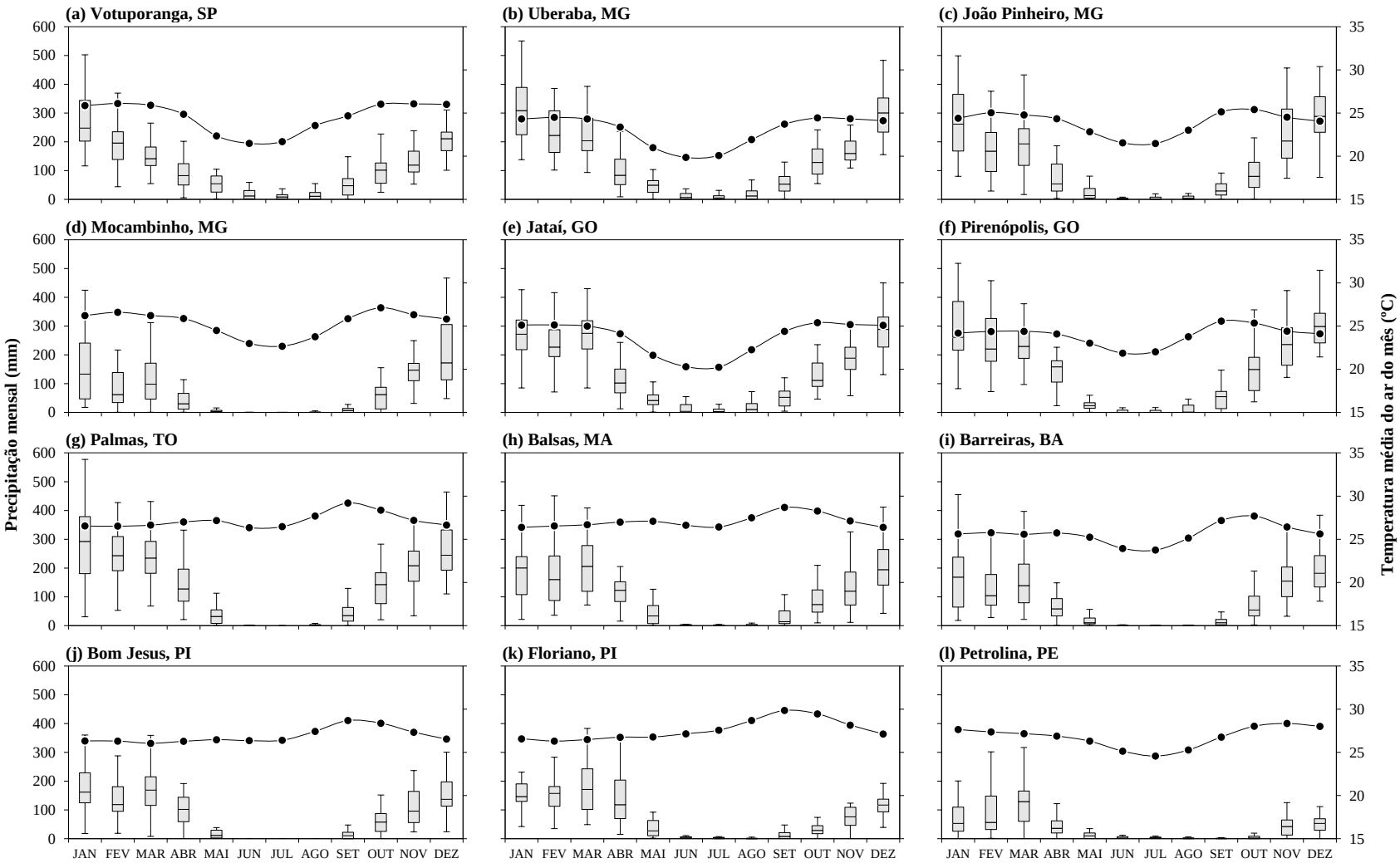


Figura 5.3 – Variabilidade da precipitação mensal (*box plot*, em mm) e temperatura média mensal do ar (linhas sólidas com círculos, em ºC) para as localidades de Votuporanga, SP (a), Uberaba (b), João Pinheiro, MG (c), Mocambinho, MG (d), Jataí, GO (e), Pirenópolis, GO (f), Palmas, TO (g), Balsas, MA (h), Barreiras, BA (i), Bom Jesus, PI (j), Floriano, PI (k) e Petrolina, PE (l)

Considerando-se os três tipos de solos e épocas de colheita, no caso de Petrolina, PE, a diferença dos valores mínimo e máximo das medianas é de 24 dias, com mínimo requerido de 18 dias para os meses de junho a agosto com solo de baixa disponibilidade hídrica. Utilizando o modelo APSIM-Sugarcane, Robertson et al. (1999) encontraram mediana dos valores de suspensão da irrigação próximos a 20 dias para os meses de junho, agosto e novembro em solo com baixa a média disponibilidade hídrica (CAD média de 0,76 mm cm^{-1}) para Kununurra na Austrália (região semi-árida), similar aos valores obtidos para Petrolina, PE, para o solo de baixa disponibilidade hídrica (18 a 23 dias), onde o clima também é semi-árido (Figura 5.6).

Em Pongola, na África do Sul, região com precipitação anual média em torno de 683 mm e onde a cana-de-açúcar é irrigada (INMAN-BAMBER, 1995), Donaldson e Bezuidenhout (2000), por meio do modelo DSSAT/CANEGRO, obtiveram mediana dos valores de suspensão da irrigação variando entre 35 e 60 dias para um solo com baixa disponibilidade hídrica (CAD média de 0,53 mm cm^{-1}) em colheitas simuladas entre abril e novembro. Para um solo com alta disponibilidade hídrica (CAD média de 1,4 mm cm^{-1}), os autores obtiveram valores entre 68 e 107 para os referidos meses. Para Petrolina, PE, local com regime hídrico similar, as medianas dos valores de suspensão da irrigação foram relativamente menores, variaram entre 18 e 23 dias para o solo com menor CAD e entre 23 e 42 para o solo com maior CAD. A diferença entre os valores obtidos neste estudo e os reportados para condições similares por Donaldson e Bezuidenhout (2000) pode estar associada às diferenças estruturais entre os modelos (DSSAT/CANEGRO x APSIM-Sugarcane), as cultivares utilizadas e o regime térmico dessas regiões. Em relação às condições térmicas, em Petrolina as temperaturas máxima e mínima anual média do ar são 31,7 e 21,9 ºC, respectivamente, enquanto em Pongola são 27,4 e 15,5 ºC, respectivamente (JONES et al., 2015). Isso em parte explica as diferenças observadas, já que em menores temperaturas há uma menor demanda hídrica o que leva um maior tempo de suspensão da irrigação antes da colheita da cana-de-açúcar.

Em experimentos pontuais conduzidos com cana soca em Neossolo Quartzarênico, Teixeira (2009) e Vieira et al. (2013) recomendaram respectivamente 40 e 7 dias de suspensão da irrigação antes da colheita nos meses de outubro e dezembro para as condições de Jaíba, MG. Para o solo com baixa disponibilidade hídrica com colheita nos meses de outubro e novembro em Mocambinho (Figura 5.4), local próximo a Jaíba, o número de dias de suspensão da irrigação variou entre 22 e 33 nos quartis 25% e 75%. Em experimento

realizado com cana planta de 15 meses colhida em meados de setembro em um Latossolo de textura média em local próximo a Pirenópolis, GO, Araújo et al. (2016) recomendaram a suspensão da irrigação 30 dias antes da colheita. Para o solo com média disponibilidade hídrica com colheita nos meses de setembro e outubro em Pirenópolis (Figura 5.5), o número de dias de suspensão da irrigação variou entre 21 e 31 nos quartis 25% e 75% no presente estudo. Embora os experimentos sejam de grande valia, estes contemplam poucas safras, épocas de colheita e condições agroambientais.

Os meses que coincidem com o início e fim da safra em boa parte das regiões estudadas geralmente requerem maior número de dias de suspensão da irrigação e apresentam maior risco de adoção dessa prática, até mesmo em solos com baixa disponibilidade hídrica. Considerando todos os locais, o número de dias de suspensão da irrigação do mês de maio, por exemplo, varia, em média, de 19 a 31 dias a mais do que nos meses de julho e agosto, respectivamente. Os solos de maior disponibilidade hídrica requerem maior número de dias de suspensão da irrigação, embora em locais, anos ou épocas de colheita muito secas a diferença do número de dias seja menor, como é o caso de Mocambinho, MG e Petrolina, PE. Considerando-se todos os locais estudados, o solo de maior disponibilidade hídrica necessita, em média, de 10 e 20 dias a mais em relação aos solos de média e baixa disponibilidade hídrica, respectivamente. Os meses de outubro e novembro, que coincidem com o início da época chuvosa no centro-sul do país e com o final da safra da cana-de-açúcar, também apresentam risco da prática da suspensão da irrigação relativamente maior, embora menor que no início da safra. Essas condições ocorrem principalmente em Votuporanga, SP, Uberaba, MG, João Pinheiro, MG (Figura 5.4), Jataí, GO, Pirenópolis, GO, Palmas, TO, Balsas, MA (Figura 5.5) e Floriano, PI (Figura 5.6).

Nos primeiros meses de colheita ou em anos relativamente mais chuvosos, a prática da suspensão da irrigação antes da colheita pode não resultar na maturação natural desejada, principalmente em solos com elevada disponibilidade hídrica e condições onde não há indução térmica e restrição nutricional (VAN HEERDEN et al., 2014). Em condições ambientais favoráveis ao crescimento da cana-de-açúcar, a indução artificial da maturação por meio do uso de maturadores químicos pode ser uma prática vantajosa (CARDOSO; SENTELHAS, 2013; VAN HEERDEN et al., 2014). Porém, o uso de maturadores não é recomendado quando o estresse hídrico, seja ele moderado ou mais intenso, já favorece a maturação natural da cana-de-açúcar, podendo levar a perda de produtividade de sacarose (VAN HEERDEN et al., 2014). Inman-Bamber (2004) e van Heerden et al. (2014) sugerem

que o número de folhas verdes e comprimento do entrenó podem ser utilizados como indicadores no manejo da suspensão da irrigação antes da colheita e uso de maturadores, já que esses indicadores expressam a resposta da planta aos estresses ambientais.

O presente estudo fornece uma primeira aproximação do risco associado a prática da suspensão da irrigação antes da colheita da cana-de-açúcar, visando incremento na produtividade de sacarose, para diferentes regiões no Brasil onde a irrigação é usada ou apresenta potencial para crescer. Os resultados apresentados podem ser úteis no planejamento e nas tomadas de decisão em sistemas de produção de cana-de-açúcar irrigada. A opção ou não da suspensão da irrigação antes da colheita ou do uso de maturadores pode ser baseada no presente estudo. Experimentos com a suspensão da irrigação em diversas condições agroclimáticas e tipos de solo para cultivares brasileiras podem ser úteis para confirmar e refinar o limiar de 4% de máxima perda de massa seca de colmos total (ROBERTSON et al., 1999) utilizado neste estudo.

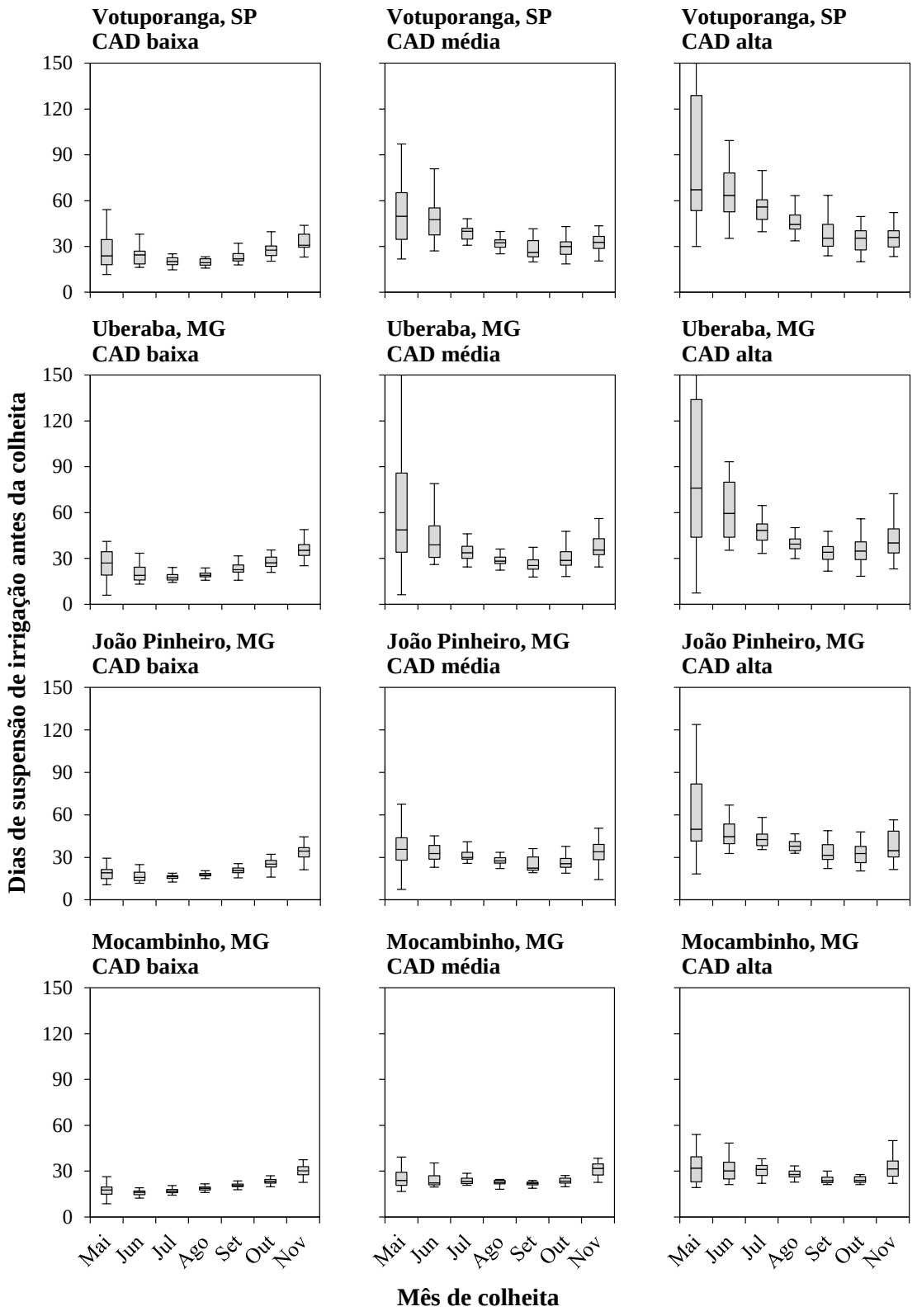


Figura 5.4 – Variabilidade do número de dias de suspensão da irrigação antes da colheita para que a massa seca de colmos da cana-de-açúcar seja reduzida em 4% para as localidades de Votuporanga, SP e Uberaba, MG, João Pinheiro, MG e Mocambinho, MG, para os meses de maio a novembro em três solos com diferentes níveis de capacidade de água disponível (CAD)

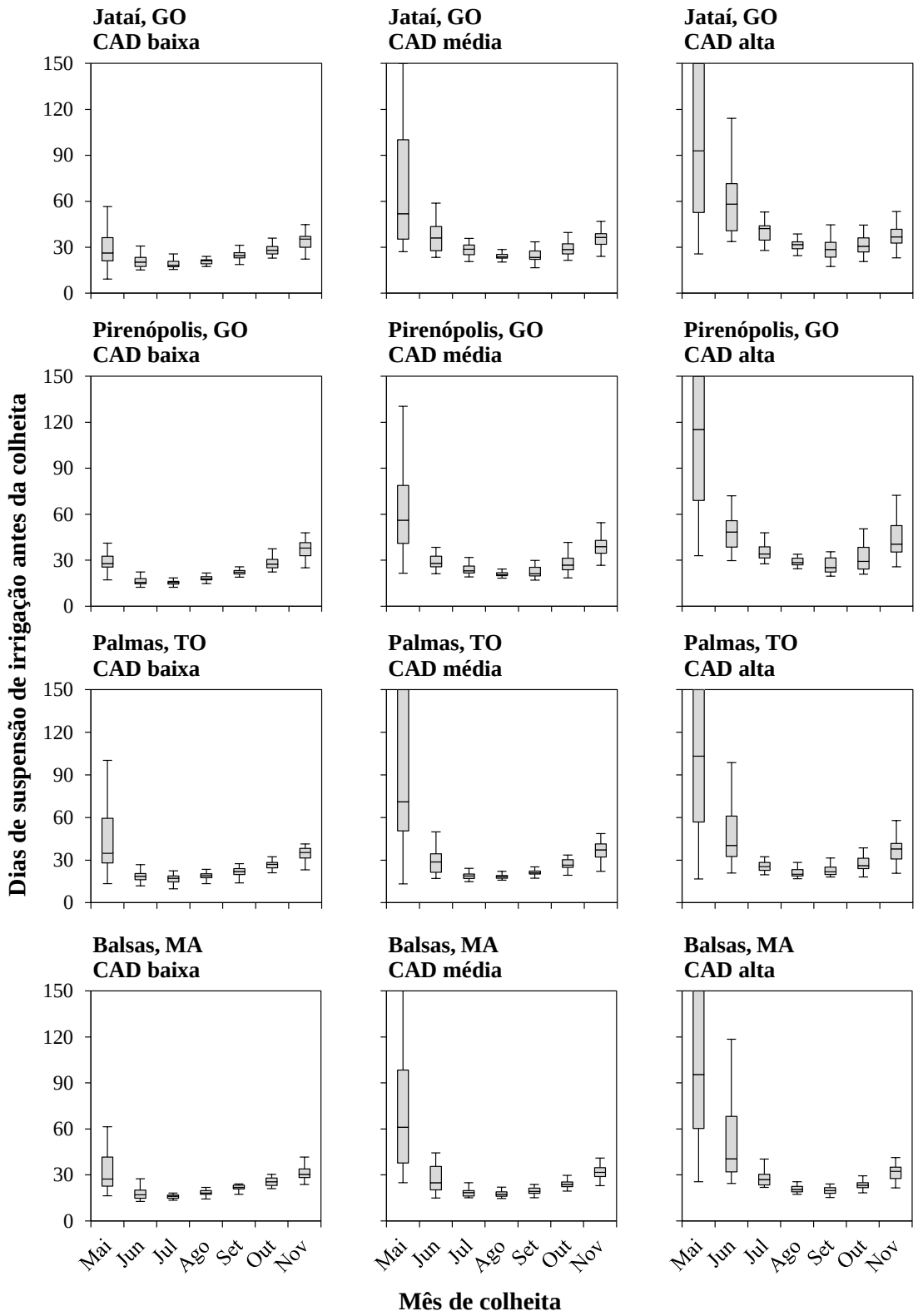


Figura 5.5 – Variabilidade do número de dias de suspensão da irrigação antes da colheita para que a massa seca de colmos da cana-de-açúcar seja reduzida em 4% para as localidades de Jataí, GO, Pirenópolis, GO, Palmas, TO e Balsas, MA para os meses de maio a novembro em três solos com diferentes níveis de capacidade de água disponível (CAD)

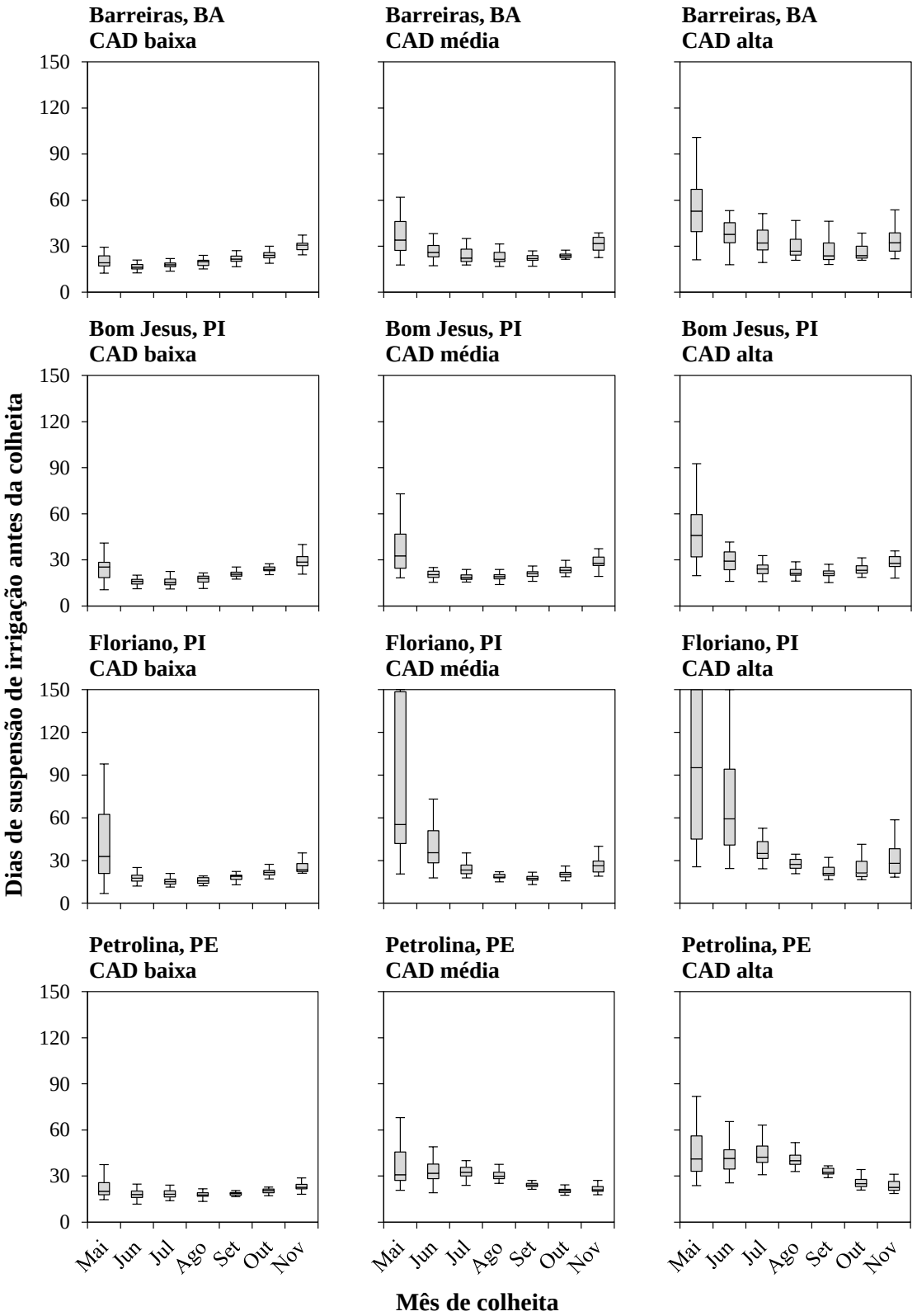


Figura 5.6 – Variabilidade do número de dias de suspensão da irrigação antes da colheita para que a massa seca de colmos da cana-de-açúcar seja reduzida em 4% para as localidades de Barreiras, BA, Bom Jesus, PI, Floriano, PI e Petrolina, PE, para os meses de maio a novembro em três solos com diferentes níveis de capacidade de água disponível (CAD)

5.4 Conclusões

O número de dias de suspensão da irrigação varia com o local, época de colheita e tipo de solo. De modo geral, o início da safra é o período que apresenta a maior variabilidade do número de dias recomendados para suspender a irrigação. Geralmente, os solos com maior disponibilidade hídrica apresentam maior variabilidade e requerem maior número de dias de suspensão da irrigação. O número médio de dias de suspensão da irrigação variou de 17 a 31, de 23 a 58 e de 28 a 72 dias ao longo das sete épocas de colheita consideradas para os solos com baixa, média e alta disponibilidade hídrica, respectivamente.

Os resultados apresentados é uma alternativa a experimentos e recomendações empíricas, pois permite avaliar a variabilidade do número de dias de suspensão da irrigação antes da irrigação em diferentes épocas de colheitas, solos e condições agroclimáticas.

Referências

ALEXANDER, A.G. **Sugarcane physiology**. Amsterdam: Elsevier, 1973. 752p.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 291p. (FAO. Irrigation Drainage and Paper, 56).

APSIM. **The Agricultural Production Systems Simulator (APSIM)**. Disponível em: <https://www.apsim.info/Documentation/Model,CropandSoil/CropModuleDocumentation/Plant.aspx>. Acesso em: 9 Jun. 2014.

ARAÚJO, R.; ALVES JUNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A.W.P. Variation in the sugar yield in response to drying-off of sugarcane before harvest and the occurrence of low air temperatures. **Bragantia**, Campinas v. 75, n. 1, p. 118-127, 2016.

BARBOSA, F. da S. **Produtividade de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento: interações entre variedades, lâminas e intensidade do déficit hídrico na fase de maturação**. 2015. 178p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

BASNAYAKE, J.; JACKSON, P.A.; INMAN-BAMBER, N.G.; LAKSHMANAN, P. Sugarcane for water-limited environments. Genetic variation in cane yield and sugar content in response to water stress. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 63, n. 16, p. 6023-6033, 2012.

BATJES, N.H. **A homogenized soil data file for global environmental research: a subset of FAO, ISRIC and NRCS profiles (Version 1.0)**. Working Paper and reprint 95/10b. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen, The Netherlands, 1995.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SD.22 - Goiás, SD.23 - Brasília, SE.22 - Goiânia. (Levantamento de Recursos Naturais, 25, 29, 31). Rio de Janeiro. 1981.

CARDOZO, N.P.; SENTELHAS, P.C. Climate effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 6, p. 449-456, 2013.

COSTA, L.G.; MARIN, F.R.; NASSIF, D.S.P.; PINTO, H.M.S.; LOPES-ASSAD, M.L.R.C. Simulação do efeito do manejo da palha e do nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 5, p. 469-474, 2014.

DONALDSON, R.A.; BEZUIDENHOUT, C.N. Determining the maximum drying off periods for sugarcane grown in different regions of the South African industry. **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**, Mount Edgecombe, v. 74, p. 162-166, 2000.

GIJSMAN, A.J.; THORNTON, P.K.; HOOGENBOOM, G. Using the WISE database to parameterize soil inputs for crop simulation models. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 56, p. 85-100, 2007.

INMAN-BAMBER, N.G. Climate and water as constraints to production in the South African sugar industry. **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**, Mount Edgecombe, v. 69, p. 55-59, 1995.

_____. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 89, p. 107-122, 2004.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 185-202, 2005.

INMAN-BAMBER, N.G.; ZUND, P.R.; MUCHOW, R.C. Water use efficiency and soil water availability for sugarcane. **Proceedings of the South African Sugar Technologists Association**, Mount Edgecombe, v. 22, p. 264-269, 2000.

JONES, M.; SINGELS, A.; RUANE, A.C. Simulated impacts of climate change on water use and yield of irrigated sugarcane in South Africa. **Agricultural Systems**, Essex, v. 139, p. 260-270, 2015.

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

MARIN, F.R.; THORBURN, P.J.; NASSIF, D.S.P.; COSTA, L.G.; REZENDE, A.S.; ANDRADE JUNIOR, A.S. Evaluation of APSIM-SUGAR and DSSAT-CANEGRO for widely grown brazilian sugarcane cultivar. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 28., 2013. São Paulo. **Proceedings**… São Paulo, 2013.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, New York, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

ROBERTSON, M.J.; DONALDSON, R.A. Changes in the components of cane and sucrose yield in response to drying-off of sugarcane before harvest. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 55, p. 201-208, 1998.

ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; DONALDSON, R.A.; INMAN-BAMBER, N.G.; WOOD, A.W. Estimating the risk associated with drying-off strategies for irrigated sugarcane before harvest. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 50, p. 65-77, 1999.

SCARPARI, M.S.; BEAUCLAIR, E.G.F. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, p. 486-491, 2004.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DEN BERG, M. **DSSAT v4.5 - CANEGRO Sugarcane plant module**: scientific documentation. Mount Edgecombe: South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34p.

TEIXEIRA, E.N. **Interceptação de água pelo dossel e influência da época da irrigação na qualidade da cana de açúcar**. 2009. 59p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

VAN HEERDEN, P.D.R; EGGLESTON, G.; DONALDSON, R.A. Ripening and postharvest deterioration. In: MOORE, P.H.; BOTHA, F.C. (Ed.). **Sugarcane**: physiology, biochemistry and functional biology. Ames: Wiley-Blackwell, 2014. cap. 4, p. 55-84.

VIEIRA, G.H.S.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.; DELAZARI, F.T. Época de interrupção da irrigação na cultura da cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 3, p. 426-441, 2013.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

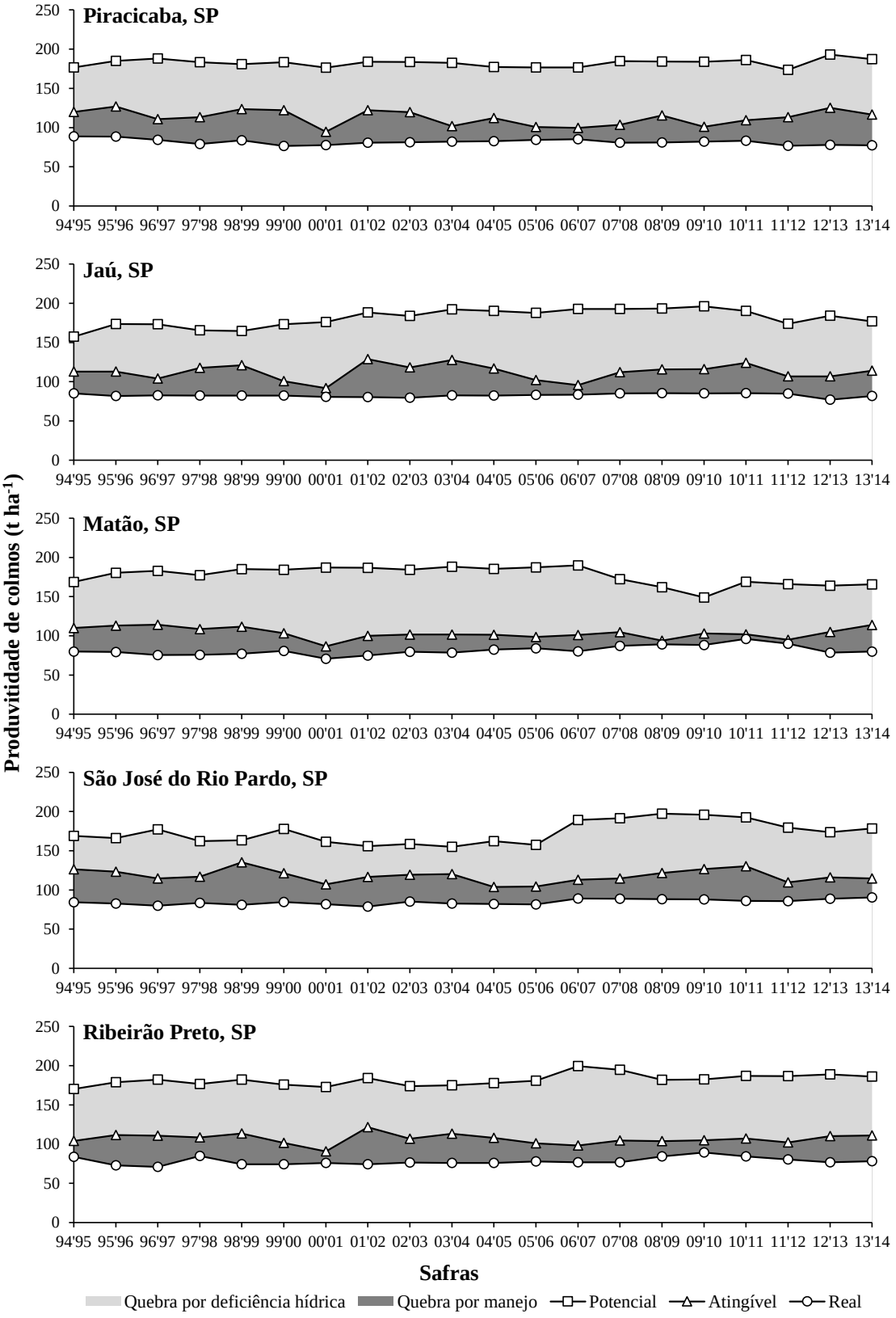
ANEXOS

ANEXO A – Relação dos municípios utilizados para compor a produtividade real de colmos no estudo da quebra de produtividade

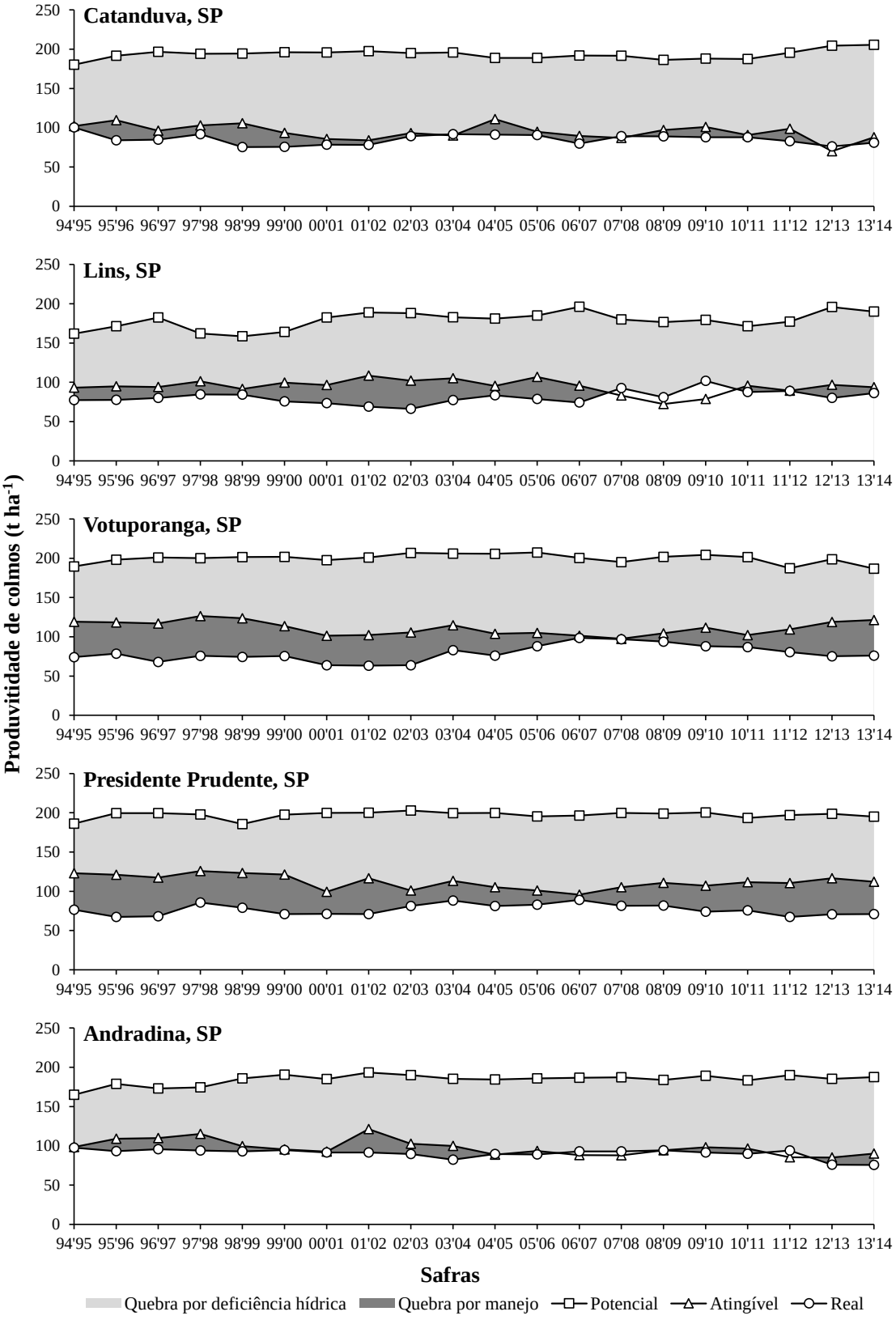
Local	Municípios utilizados
Andradina, SP	Andradina, Castilho, Guaraçaí, Itapura, Mirandópolis, Nova Independência, Pereira Barreto
Aracaju, SE	São Cristóvão
Areia, PB	Alagoa Grande, Alagoa Nova, Areia, Bananeiras, Capim, Mamanguape, Pilões, Serraria
Assis, SP	Assis, Cândido Mota, Echaporã, Lutécia, Maracaí, Paraguaçu Paulista, Platina, Tarumã
Barreiras, BA	Baianópolis, Barreiras, Catolândia, Formosa do Rio Preto, Riachão das Neves, São Desidério
Capinópolis, MG	Cachoeira Dourada, Canápolis, Capinópolis, Inaciolândia, Ituiutaba, Itumbiara
Catanduva, SP	Catanduva, Catiguá, Elisiário, Embaúba, Novais, Palmares Paulista, Paraíso, Pindorama, Severínia, Tabapuã
Diamantino, MT	Barra do Bugres, Campo Novo do Parecis, Denise, Diamantino, Nova Olímpia, São José do Rio Claro, Tangará da Serra
Formosa, GO	Brasília, Formosa, Vila Boa
Itapetininga, SP	Guareí, Itapetininga, Quadra, Tatuí
Ivinhema, MS	Angélica, Itaquiraí, Ivinhema, Naviraí, Nova Alvorada do Sul, Nova Andradina, Novo Horizonte do Sul, Rio Brilhante
Jataí, GO	Jataí, Montividiu, Rio Verde
Jaú, SP	Bariri, Barra Bonita, Dois Córregos, Igaraçu do Tietê, Itapuí, Jaú, Macatuba, Mineiros do Tietê, Pederneiras
João Pinheiro, MG	Brasilândia de Minas, João Pinheiro, Paracatu, Unaí
Lins, SP	Cafelândia, Getulina, Guaiçara, Guaimbê, Lins, Promissão, Sabino
Maceió, AL	Barra de Santo Antônio, Barra de São Miguel, Coqueiro Seco, Maceió, Marechal Deodoro, Paripueira, Pilar, Santa Luzia do Norte, Satuba
Manduri, SP	Bernardino de Campos, Cerqueira César, Chavantes, Ipaussu, Manduri, Óleo, Piraju

Maringá, PR	Iguaraçu, Mandaguaçu, Marialva, Maringá, Paiçandu, Presidente Castelo Branco
Matão, SP	Araraquara, Dobrada, Guariba, Matão, Motuca, Rincão, Santa Ernestina, Taquaritinga
Paranaíba, MS	Aparecida do Taboado, Carneirinho, Limeira do Oeste, Paranaíba, Selvíria
Peixe, TO	Brejinho de Nazaré, Palmeirópolis, Peixe, Santa Rita do Tocantins, São Salvador do Tocantins
Petrolina, PE	Afrânio, Dormentes, Petrolina, Santa Maria da Boa Vista
Piracicaba, SP	Charqueada, Ipeúna, Iracemápolis, Piracicaba, Rio Claro, Rio das Pedras, Santa Gertrudes
Pirenópolis, GO	Goianésia, Vila Propício
Pompéu, MG	Pompéu
Presidente Prudente, SP	Caiabu, Emilianópolis, Flora Rica, Flórida Paulista, Flórida Paulista, Presidente Prudente, Santo Expedito
Ribeirão Preto, SP	Cravinhos, Guatapará, Jardinópolis, Pradópolis, Ribeirão Preto, Serrana, Sertãozinho
São José do Rio Pardo, SP	Casa Branca, Itobi, Mococa, São José do Rio Pardo, Tambaú, Tapiratiba
Uberaba, MG	Água Comprida, Aramina, Conceição das Alagoas, Conquista, Delta, Igarapava, Miguelópolis, Uberaba, Veríssimo
Votuporanga, SP	Álvares Florence, Cosmorama, Floreal, Magda, Nhandeara, Parisi, Sebastianópolis do Sul, Valentim Gentil, Votuporanga

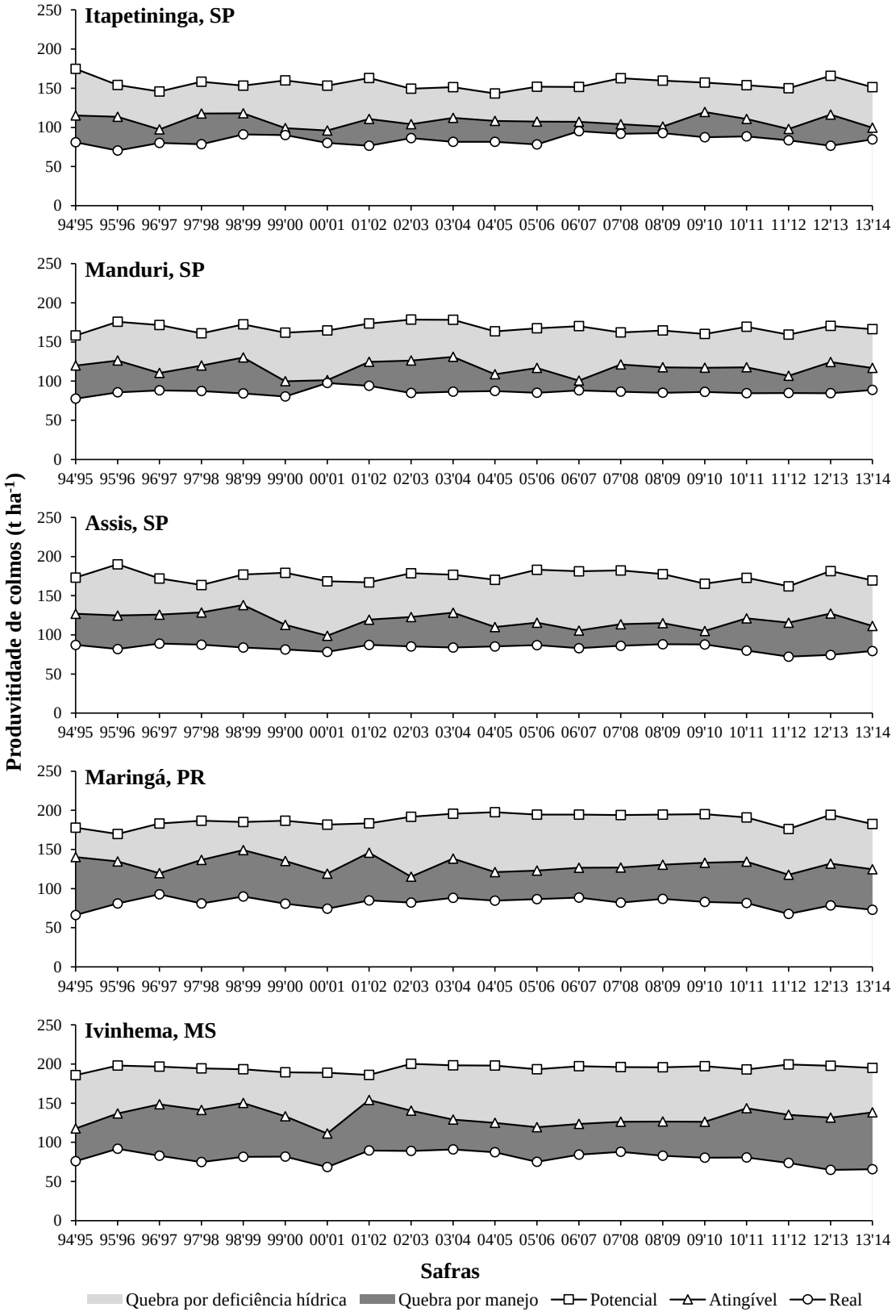
ANEXO B – Produtividade potencial, atingível, real e quebra de produtividade da cana-de-açúcar (t ha^{-1}) para Piracicaba, Jaú, Matão, São José do Rio Pardo e Ribeirão Preto em SP ao longo das safras 1994/95 a 2013/14



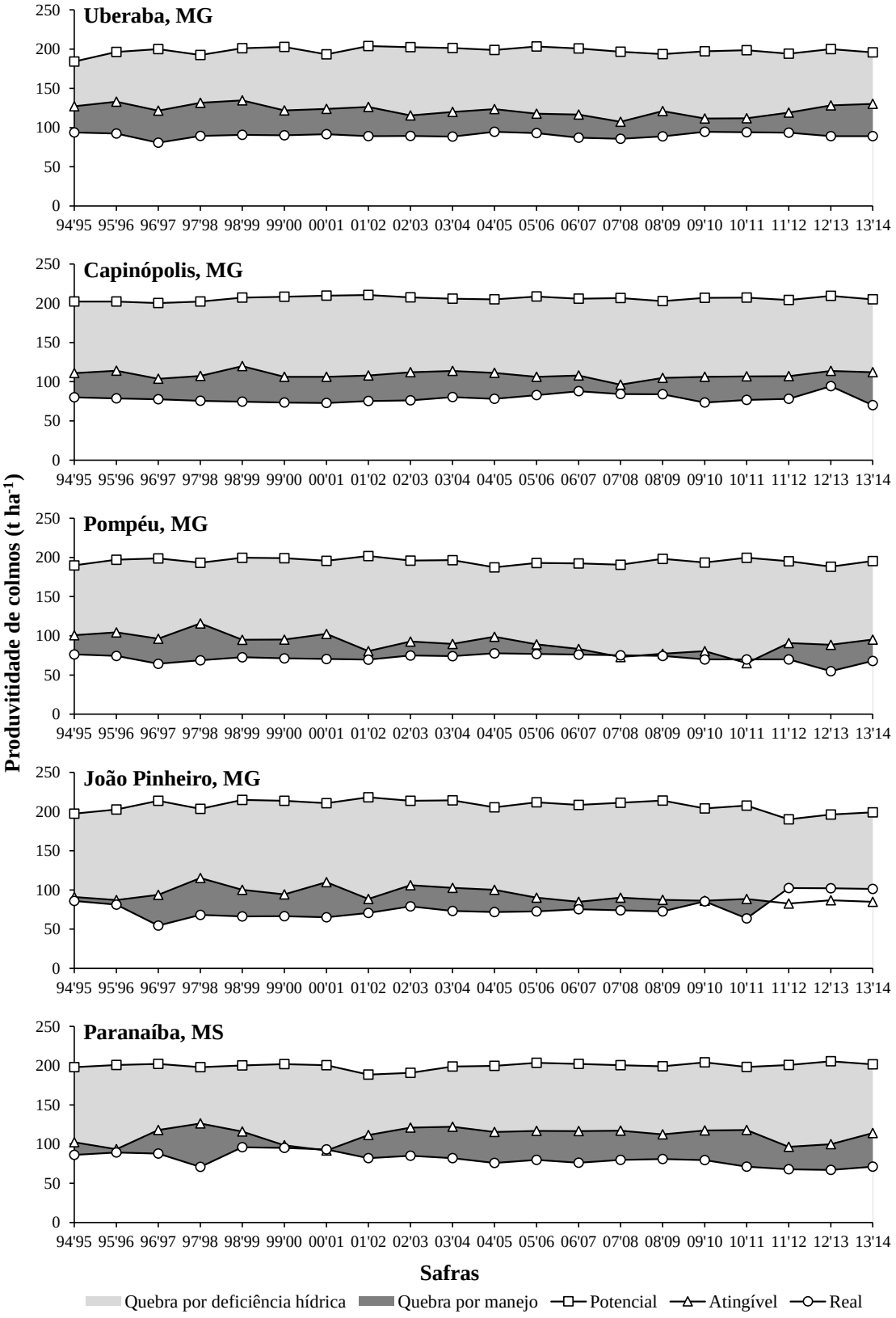
ANEXO C – Produtividade potencial, atingível, real e quebra de produtividade da cana-de-açúcar (t ha^{-1}) para Catanduva, Lins, Votuporanga, Presidente Prudente e Andradina em SP, ao longo das safras 1994/95 a 2013/14



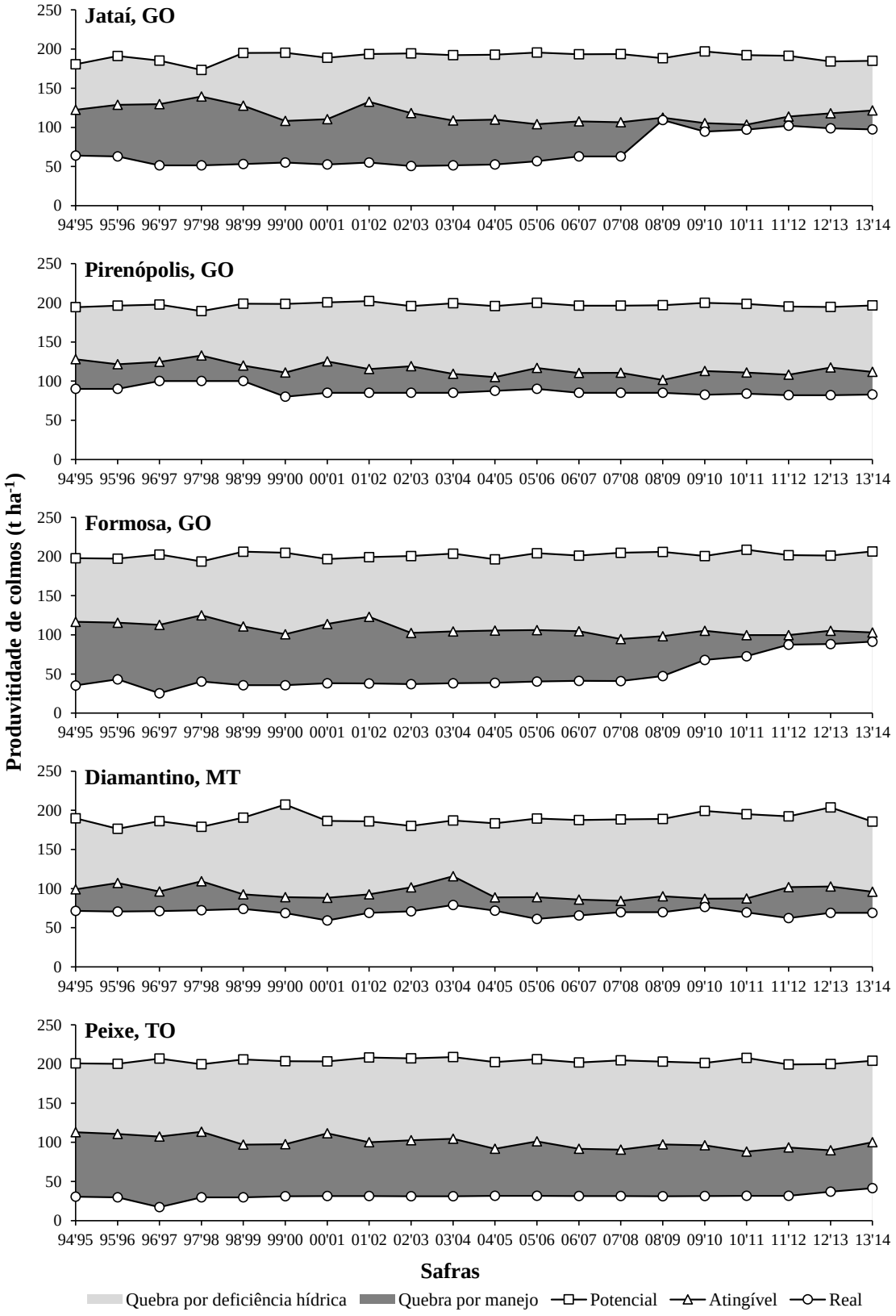
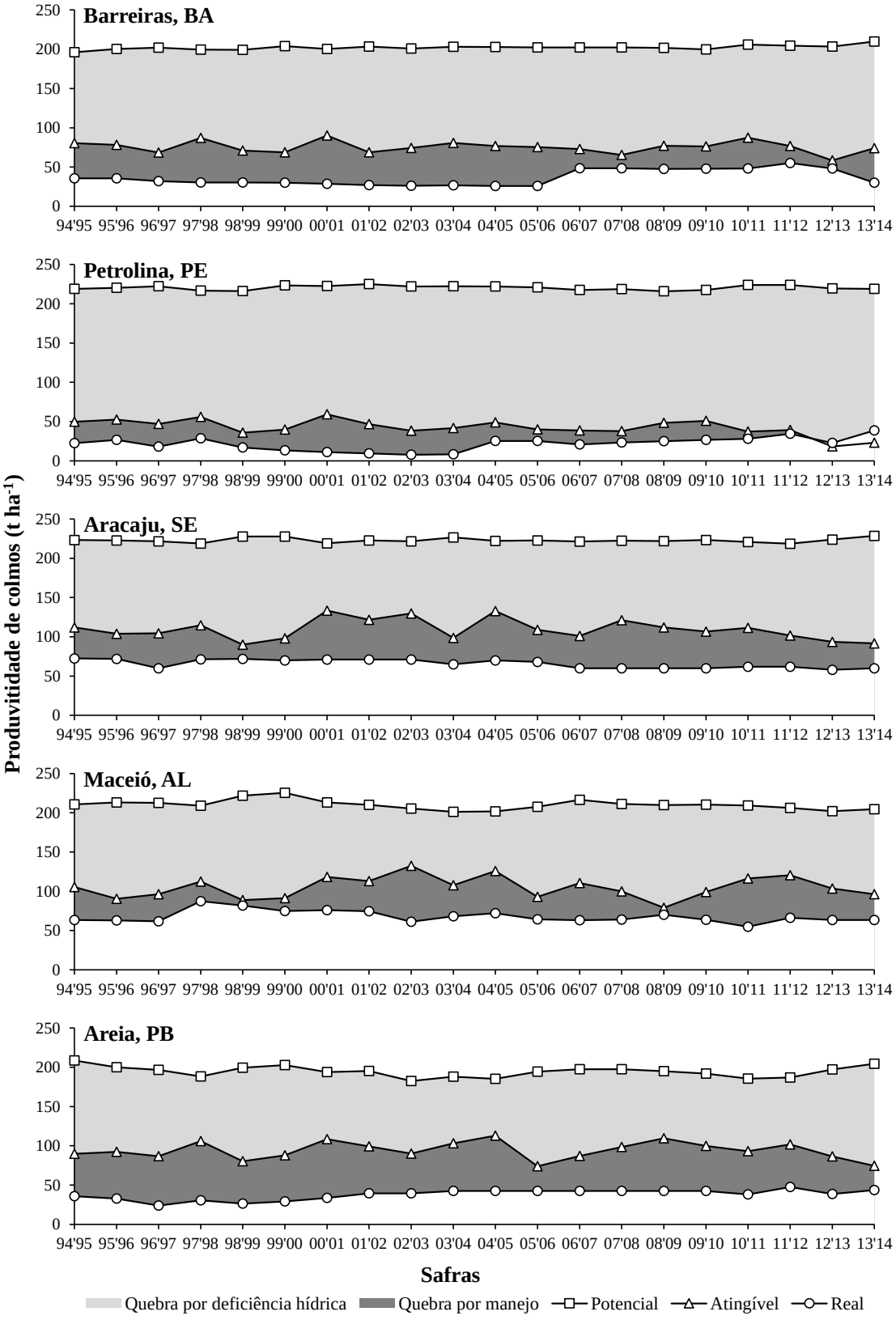
ANEXO D – Produtividade potencial, atingível, real e quebra de produtividade da cana-de-açúcar (t ha^{-1}) para Itapetininga, Manduri e Assis em SP, Maringá, PR e Ivinhema, MS, ao longo das safras 1994/95 a 2013/14



ANEXO E – Produtividade potencial, atingível, real e quebra de produtividade da cana-de-açúcar (t ha^{-1}) para Uberaba, Capinópolis, Pompéu e João Pinheiro em MG e Paranaíba, MS, ao longo das safras 1994/95 a 2013/14



ANEXO F – Produtividade potencial, atingível, real e quebra de produtividade da cana-de-açúcar (t ha^{-1}) para Jataí, Pirenópolis e Formosa em SP, Diamantino, PR e Peixe, TO, ao longo das safras 1994/95 a 2013/14



ANEXO G – Produtividade potencial, atingível, real e quebra de produtividade da cana-de-açúcar (t ha^{-1}) para Barreiras, BA, Petrolina, PE Aracaju, SE, Maceió, AL e Areia, PB, ao longo das safras 1994/95 a 2013/14