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

Quantificando o efeito de algumas variáveis de manejo agrícola na produtividade da cana-de-açúcar em uma usina do Estado de São Paulo

Letícia Gonçalves Gasparotto

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

Piracicaba
2020

Letícia Gonçalves Gasparotto
Engenheira Agrônoma

Quantificando o efeito de algumas variáveis de manejo agrícola na produtividade da cana-de-açúcar em uma usina do Estado de São Paulo

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **FÁBIO RICARDO MARIN**

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

Piracicaba
2020

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

Gasparotto, Letícia Gonçalves

Quantificando o efeito de algumas variáveis de manejo agrícola na produtividade da cana-de-açúcar em uma usina do estado de São Paulo / Letícia Gonçalves Gasparotto. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

65 p.

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

1. *Saccharum spp.* 2. Modelagem de culturas 3. Fatores limitantes 4. Compactação 5. Espaçamento 6. População de plantas 7. Colheita mecanizada I. Título

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha família – aos meus pais Matilde Gasparotto e Maurilio Gasparotto e minha irmã Patrícia Gasparotto – por todo o incentivo na trajetória pessoal e profissional. Sou grata por todo apoio e por sempre me incentivarem a buscar meu sonho.

Ao Guilherme Dorta por toda paciência e apoio.

Ao Prof. Fábio Ricardo Marin pela paciência, ensinamentos, oportunidades e pela confiança depositada.

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo pela oportunidade de realizar o curso de Mestrado no Departamento de Engenharia de Sistemas Agrícolas.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de mestrado e reserva técnica (Processo 2018/ 06396-7).

À Usina parceira, em especial ao funcionário Fábio e Guilherme por toda a disponibilidade e atenção dedicada nesse período.

Aos amigos do grupo GEPEMA-AGRIMET pelo companheirismo durante esse período.

SUMÁRIO

RESUMO 5
ABSTRACT 6
1. INTRODUÇÃO 7
REFERÊNCIAS 10
2. QUANTIFICAÇÃO E DECOMPOSIÇÃO DO DÉFICIT DE PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR BASEADO EM MODELOS DE SIMULAÇÃO E LEVANTAMENTOS DE CAMPO 13
RESUMO 13
ABSTRACT 13
2.1 INTRODUÇÃO 14
2.2 MATERIAL E MÉTODOS 16
2.3. RESULTADOS 22
2.4. DISCUSSÃO 30
2.5 CONCLUSÃO 33
REFERÊNCIAS 33
3. EFEITO DO ESPAÇAMENTO DE CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA PRODUTIVIDADE: UMA REVISÃO EXTENSIVA 39
RESUMO 39
ABSTRACT 39
3.1 INTRODUÇÃO 40
3.2 MATERIAL E MÉTODOS 41
3.2.1 DESCRIÇÃO DA BASE DE DADOS 41
3.3 RESULTADOS 42
3.4 DISCUSSÃO 49
3.5 CONCLUSÃO 50
REFERÊNCIAS 50
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS 55
ANEXO 57

RESUMO

Quantificando o efeito de algumas variáveis de manejo agrícola na produtividade da cana-de-açúcar em uma usina do Estado de São Paulo

Com a introdução no mercado brasileiro de carros *flex-fluel* a demanda por etanol, proveniente da cana-de-açúcar, aumentou consideravelmente. Todavia, essa demanda ainda deverá aumentar com os protocolos internacionais que visam redução de gases do efeito estufa. Contudo, com a demanda de uma agricultura sustentável o aumento da produção da cana-de-açúcar deve vir do aumento da produtividade em áreas já consolidadas. Neste contexto, o presente estudo teve por objetivos: (i) identificar os fatores de manejo responsáveis pela redução da produtividade da cultura em uma área comercial, (ii), a partir de uma revisão de literatura, para gerar equações de perda de rendimento para cada fator e (iii) decompor a perda ocasionada por cada fator e avaliar o quanto os mesmos incrementariam a produtividade da cultura, (iv) analisar a influência do espaçamento na produtividade da cana-de-açúcar, por meio de uma revisão de literatura e (v) identificar o espaçamento de plantio que acarretaria em maiores rendimentos de produtividade. Para tanto o trabalho foi dividido em duas partes. A primeira etapa foi realizada dentro de uma usina para avaliar a influência dos fatores de manejo na produtividade da cultura. Nessa usina, foram identificados e levantados os fatores restritivos e limitantes a produtividade da cultura. Os dados obtidos com o levantamento foram convertidos em perdas, através de equações de perda de produtividade que foram geradas por revisão de literatura para cada fator encontrado. Os resultados mostraram que as equações de perda de produtividade conseguiram estimar de maneira razoável a perda de produtividade nos talhões comerciais ($R^2 = 0.52$). O déficit de produtividade médio foi de 27 Mg ha^{-1}, enquanto o déficit de produtividade estimada pelas equações foi de 35 Mg ha^{-1}. Os principais fatores foram compactação do solo, deficiência nutricional e população de plantas, respectivamente. A segunda parte consistiu na avaliação do espaçamento de plantio na produtividade da cana-de-açúcar. Foram levantados trabalhos que avaliaram a influência dos espaçamentos amplos e reduzidos em relação a produtividade. Os dados foram analisados por ANOVA e para comparação de média foi realizada o teste de Tukey ($p< 0.05$). Os resultados mostraram que a redução dos espaçamentos proporcionaria aumentos significativos na produtividade da cultura ($p<0.01$), principalmente nos espaçamentos de 90 e 100 cm. Contudo, a redução do espaçamento de plantio é limitada pela colheita mecanizada da cultura.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., Modelagem de culturas, Fatores limitantes, Compactação, Espaçamento, População de plantas, Colheita mecanizada

ABSTRACT

Quantifying the effect of some agricultural management variables on sugarcane yield in a mill in the state of São Paulo

With the introduction of flex-fuel cars in the Brazilian market, the demand for ethanol from sugarcane has increased considerably. However, this demand is still expected to increase with international protocols aimed at reducing greenhouse gases. However, with the demand for sustainable agriculture, the increase in sugar cane production must come from the increase in yield in already consolidated areas. In this context, the present study aimed to: (i) identify the management factors responsible for reducing crop yield in a commercial area, (ii), from a literature review, to generate income loss equations for each factor and (iii) decompose the loss caused by each factor and assess how much they would increase crop yield, (iv) analyze the influence of row spacing on sugarcane productivity, through a literature review and (v) identify the planting spacing that would result in higher yields. For this purpose, the work was divided into two parts. The first stage was carried out inside a plant to assess the influence of management factors on crop yield. In this plant, the restrictive and limiting factors for crop yield were identified and surveyed. The data obtained with the survey were converted into losses, through yield loss equations that were generated by literature review for each factor found. The results showed that the yield loss equations were able to reasonably estimate the yield loss in the commercial plots ($R^2 = 0.52$). The average yield gap was 27 Mg ha^{-1}, while the yield gap estimated by the equations was 35 Mg ha^{-1}. The main factors were soil compaction, nutritional deficiency and plant population, respectively. The second part consisted of the evaluation of planting spacing in the yield of sugarcane. Studies were carried out to assess the influence of wide and reduced spacing in relation to yield. The data were analyzed by ANOVA and Tukey's test was used to compare the mean ($p < 0.05$). The results of the second part of the work showed that the reduction of the spacing would provide significant increases in the productivity of the culture ($p < 0.01$), mainly in the spacing of 90 and 100 cm. However, the reduction in planting spacing is limited by mechanized crop harvesting.

Keywords: *Saccharum* spp., Crop modeling, Limiting factors, Compaction, Spacing, Plant population, Mechanized harvest

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é umas das culturas mais importantes para a agricultura brasileira. Além de sua importância econômica, ela é fonte de energia renovável, representando aproximadamente 17,4% da produção de energia na matriz energética brasileira (NEB, 2019). Dentre as fontes de energia renováveis, a cultura responde por 50% da produção total (NEB, 2019).

Com a introdução de carros *flex-fluel* no mercado Brasileiro em 2003, a demanda por etanol aumentou significativamente e, para atender tal demanda as áreas de produção de cana-de-açúcar expandiram-se muito rapidamente, principalmente na região Centro-sul do Brasil (MARTINES-FILHO *et al*., 2006; SAMANEZ *et al*., 2007). Estima-se que a demanda por combustíveis renováveis, como o etanol da cana-de-açúcar, ainda deverá aumentar, em função dos protocolos internacionais que visam à redução da emissão de gases do efeito estufa (LEAL *et al*., 2013; GOLDEMBERG *et al*., 2014).

Neste contexto, haverá uma crescente demanda por produtos provenientes da cultura da cana-de-açúcar, o que implica em um desafio para o Brasil, uma vez que o aumento de produção não poderá estar diretamente relacionado ao aumento de áreas cultiváveis, pela necessidade de cultivos sustentáveis. Com isso, é esperado que a maior parte da produção agrícola deverá vir de aumento da produtividade em áreas consolidadas (VAN REES *et al*., 2014).

Diante do exposto, o cenário exige o uso de métodos adequados para identificar as áreas com potencial de incremento (MONTEIRO, 2015). A identificação das regiões com potencial de incremento na produtividade agrícola pode ser feita com base da eficiência produtiva, dada pela razão entre a produtividade real (Yr) e a produtividade potencial (Yp) ou a produtividade limitada por água (Yw) de uma região. Essa análise também pode ser feita pelo déficit de produtividade (Yg) (do inglês, *yield gap*), dado pela diferença entre Yp ou Yw e Yr. (LOBEL *et al.*, 2009)

A sigla Yp refere-se à produtividade de uma variedade que não apresenta o crescimento e desenvolvimento afetados por desordens hídricas, nutricionais e fatores bióticos. Neste caso, o seu crescimento e desenvolvimento são definidos por fatores meteorológicos (radiação solar, fotoperíodo, temperatura do ar, pela concentração de CO_2) e genótipo. A Yw é similar a Yp. No entanto, além de condições climáticas, a Yw é limitada pela disponibilidade de nutrientes e água. Portanto, a produtividade real é àquela obtida pelos produtores em campo, onde além da influência dos fatores definidores e limitantes, há interferência de fatores restritivos,

ocasionados pela presença de pragas, doenças e plantas invasoras (VAN ITTERSUN *et al*, 2013).

Os modelos de crescimento de culturas baseados em processos são importantes ferramentas que auxiliam esse tipo de análise. Além do mais, podem contribuir no monitoramento e na previsão do rendimento de culturas, assim como auxiliar na compreensão dos mecanismos envolvidos nas respostas da cultura ao ambiente (MARIN *et al*., 2011). Existem diversos modelos de simulação de crescimento da cana-de-açúcar em uso atualmente, como: Auscane (JONES *et al*., 1988), QCane (LIU & KINGSTON, 1995), APSIM (KEATING *et al*., 1999), Mosicas (MARTINÉ, 2003), Casupro (VILLEGAS *et al.*, 2005) e SAMUCA (VIANNA, M. S.; 2018). Entre esses modelos, o Canegro (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS *et al*., 2008), disponível na plataforme DSSAT é um dos principais.

No Brasil, o modelo Canegro foi utilizado na calibração dos parâmetros de variedades (MARIN *et al.*, 2011; NASSIF *et al.*, 2012), na estimativa do impacto da mudança climática no rendimento da cana-de-açúcar (MARIN *et al.*, 2013), para questões associadas mudanças climáticas e déficit hídrico da cultura (VIANA & SENTELHAS, 2014) e para quantificar o déficit de produtividade da cana-de-açúcar (MARIN *et al.*, 2008). O modelo permitiu apontar que o déficit de produtividade explorável da cana-de-açúcar brasileira estava entre 30 e 40 Mg ha^{-1} (MARIN *et al*., 2008; MARIN, 2014; MARIN *et al*., 2016).

Contudo, poucos estudos foram desenvolvidos no Brasil e no mundo para auxiliar os produtores em tomadas de decisões, a fim de reduzir o déficit de produtividade da cultura. No Brasil, Monteiro e Sentelhas (2014) identificaram regiões com potencial de incremento de produtividade sob aplicação de lâminas de irrigação. Marin e Carvalho (2012) avaliaram a eficiência produtividade da cultura no estado de São Paulo e constataram que o aumento da eficiência nos últimos anos está relacionado à melhoria das técnicas de manejo nas áreas de produção. Ainda no Brasil, um estudo realizado com apoio de modelos de simulação apontou um potencial de incremento de aproximadamente, 41 Mg ha^{-1} (MARIN, 2014). Um estudo de avaliação de cenários futuros do uso da terra e demanda de etanol e açúcar apontou que se os rendimentos forem constante ao longo dos anos será necessário uma expansão de terra em torno de 5 a 45% para satisfazer as necessidades futuras (MARIN *et al*., 2016). Além do mais, um estudo mais recente apontou que o decaimento de produtividade das soqueiras de cana-de-açúcar está relacionado com um manejo sub-ótimo dos talhões comerciais de cana-de-açúcar (MARIN *et al*., 2019). Já no mundo, um estudo realizado na África do Sul mostrou a necessidade de investigar os fatores não climáticos, como pragas, doenças e manejo agronômico

sub-ótimo, visto que os fatores apontados como prováveis causas de redução foram pragas, nutrição inadequada e replantio inadequado (VAN DEN BERG & SINGELS, 2013).

Todavia, esses estudos foram realizados para grandes escalas espaciais. Há, assim, uma oportunidade por pesquisas aplicadas que subsidiem o planejamento de médio e longo prazo por parte das unidades produtivas. A análise da eficiência produtiva pode auxiliar a identificar oportunidades para incrementar a produtividade da cultura (VAN ITTERSUM *et al*., 2013, 2016; FISCHER, 2015; TIMSINA *et al*., 2016). Entretanto, as decisões para minimizar os déficits de produtividade estão diretamente ligada ao produtor e, muitas vezes são opostas aos objetivos principais (alto lucro, manejo eficiente, baixo risco, mínimo impacto ambiental), dentro dos limites sociais, políticos, econômicos e ambientais que suas operações enfrentam (SIMON, 1955; DE WIT, 1992; SADRAS & DENISON, 2016).

Outro fator de grande importância para a cultura e que pode resultar em incrementos na produtividade é o espaçamento de plantio. Nos últimos anos, com a intensificação da colheita mecanizada, o espaçamento de plantio sofreu alterações, aumentando de 90 para 150 cm. Muitos trabalhos foram realizados com o propósito de esclarecer quais espaçamentos resultavam em maiores produtividades (BANERJEE *et al*., 2012) em função dos níveis de irrigação (KUNZ *et al*., 2007) e dos ambientes de produção. Grande parte dos trabalhos realizados mostrou que os espaçamentos reduzidos apresentaram melhores produtividades, mas não houve consenso sobre qual espaçamento seria o ideal para o plantio da cultura. Todavia, a redução no espaçamento de plantio esbarra em muitos problemas no sistema de colheita, que necessita de maiores espaçamentos para ajustar a distância entre os rodados das colhedoras para evitar o pisoteio das soqueiras.

Nesse sentido, neste trabalho pretendeu-se identificar os fatores limitantes e restritivos à produtividade da cultura da cana-de-açúcar, bem como decompor a perda ocasionada pelos mesmos, a fim de auxiliar os produtores em sua tomada de decisão para o incremento na produção em função dos fatores de manejo. Além disso, dada a importância do espaçamento de cultivo da cana-de-açúcar na formação da produção, fez-se um estudo detalhado sobre este tema com base em revisão de literatura, com vistas a embasar o setor sobre as melhores opções de espaçamento. Desse modo, esse trabalho teve os seguintes objetivos específicos:

1. Identificação dos fatores de manejo responsáveis pela redução da produtividade da cultura em uma área comercial;
2. A partir de uma revisão de literatura, geração equações de perda de rendimento para cada fator;

3. Decompor a perda ocasionada por cada fator e avaliar o quanto os mesmos incrementariam a produtividade da cultura;
4. Analisar a influência do espaçamento na produtividade da cana-de-açúcar com base em revisão de literatura;
5. Identificar o espaçamento de plantio que acarretaria em maiores rendimentos de produtividade.

REFERÊNCIAS

BANERJEE, K.; PRAMANIK, B. R.; PUSTE, A. M.. Effect of different row spacing on ratoonability of high sugar genotypes of sugarcane hybrids. **Journal of Crop and Weed**, v. 8, n. 2, p. 77-79, 2012.

DE WIT, C. T. Resource use efficiency in agriculture. **Agricultural Systems**, v. 40, n. 1, p. 125–151, 1992.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **NEB – Balanço Energético Nacional**: ano base: 2018. Rio de Janeiro, 2019.

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

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.

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 Soil**, v.8, p.93-99, 1991

JONES, C.A.; WEGENER, M.K.; RUSSEL, J.S.; MCLEOD, I.M.; WILLIAMS, J.R. **AUSCANE – simulation of Australian sugarcane with EPIC**. Brisbane: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1988. 194p.

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

KUNZ, J.H.; BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; HECKLER, B.M.M.; COMIRAN, F. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica**. Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.1511-1520, 2007.

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.

LIU, D.L.; KINGSTON, G. QCANE: a simulation model of sugarcane growth and sugar accumulation. In: ROBERTSON, M.J. (Ed.). **Research and modelling approaches to assess sugarcane production opportunities and constrains**. St. Lucia: University of Queensland, 1995. p.25-29

LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, p. 179-204, 2009. DOI: 10.1146/annurev.environ.041008.093740.

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.; EDREIRA, J. I. N.; ANDRADE, J.; GRASSINI, P. On-farm sugarcane yield and yield components as influenced by number of harvests. **Field crops research**, v. 240, p. 134-142, 2019

MARIN, F.R.; JONES, J.W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J.L.; PALLONE FILHO, W.J.; NASSIF, D.S.P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/ CANEGRO for sugarcane Brazilian production systems. **Agronomy Journal**, v.103, p.100-110, 2011.

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; SINGELS, A.; ROYCE, F.; ASSAD, E. D.; PELLEGRINO, G. Q.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in Southern Brazil. **Climatic Change**, v. 117, n. 1, p. 227-239, 2013. DOI: 10.1007/s10584-012-0561-y.

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, 2016.

MARTINÉ, J.F. **Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hidriques contrastées. Applications du modéle**. Thése (Docteur) – Institut National Agronomique Paris-Gragnon, Paris, 130p. 2013

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.; 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, Leonardo Amaral. Sugarcane yield gap in Brazil: a crop modelling approach. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. doi:10.11606/T.11.2016.tde-08032016-142721. Acesso em: 23-10-2019.

NASSIF, D. S. P.; MARIN, F. R.; PALLONE FILHO, W. J.; RESENDE, R. S.; PELLEGRINO, G. Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p.311-318, 2012.

SADRAS, V. O.; DENISON, R. F. Neither crop genetics nor crop management can be optimised. **Field Crops Research**, v. 189, p. 75–83, 2016.

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.

SIMON, H. A. A Behavioral Model of Rational Choice. **The Quarterly Journal of Economics**, v. 69, n. 1, p. 99, 1955

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DER BERG, M. **DSSAT v.4.5 DSSAT/CANEGRO**: sugarcane plant module: scientific documentation. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modeling: South African Sugarcane Research Institute, 2008. 34p

TIMSINA, J. et al. Can Bangladesh produce enough cereals to meet future demand? **Agricultural Systems**, v. 163, p. 36–44, 2016.

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**, v. 143, p. 4-17, Mar. 2013. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.09.009

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 REES, H.; MCCLELLAND, T.; HOCHMAN, Z.; CARBERRY, P.; HUNT, J.; HUTH, N.; HOLZWORTH, D. Leading farmers in South East Australia have closed the exploitable wheat yield gap: prospects for further improvement. **Field Crops Research**, Australia. v. 164, p. 1-11, 2014

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

VILLEGAS, F.D.; DAZA, O.H.; JONES, J.W.; ROYCE, F.S. **CASUPRO**: an industry-driven sugarcane model. Tampa: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 22p, 2005.

2. QUANTIFICAÇÃO E DECOMPOSIÇÃO DO DÉFICIT DE PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR BASEADO EM MODELOS DE SIMULAÇÃO E LEVANTAMENTOS DE CAMPO

RESUMO

A produtividade das culturas agrícola é influenciada por fatores bióticos e abióticos. Esses fatores limitam a produtividade final, sendo responsável por grandes déficits de produtividade. Desse modo, torna-se importante entender quais são os fatores responsáveis pelas perdas de produtividade e o quanto eles impactam a produtividade final. Com isso, o estudo teve como objetivo: (i) determinar a produtividade atingível (Yw), eficiência agrícola e quantificar o déficit produtivo (Yg) para cana-de-açúcar em talhões específicos de usina sucroenergética; (ii) identificar as causas explanatórias do Yg para a cultura da cana-de-açúcar nos talhões avaliados; (iii) gerar equações de perdas de produtividade para cada causa e decompor a perda de produtividade para cada causa avaliada. Para tanto, foram selecionados nove talhões de uma usina parceira para a identificação dos fatores redutores de produtividade e posterior decomposição do das causas do déficit de produtividade. Com apoio do modelo de simulação foi quantificada a Yw para cada talhão. Os dados de produtividade real (Yr) foram enviados pela usina parceira, a qual foi utilizado para o cálculo do Yg e eficiência agrícola. A partir de uma revisão de literatura foi gerada uma equação de perda de produtividade para cada fator encontrado. Os fatores identificados foram: pragas, doenças, deficiência nutricional, população de plantas, plantas daninhas e sistema radicular. Com a perda de produtividade estimada para cada fator, estabeleceu-se a produtividade real estimada em função dos fatores depletores de produtividade (Yrest,n). O resultado mostrou que as equações de perda de produtividade conseguiram estimar de maneira razoável o quanto cada fator influência na produtividade final da cultura (R^2 = 0.52; RMSE = 41 Mg ha^{-1}). Corrigindo-se os fatores de manejo que acarretaram em maiores perdas de produtividade (falhas, deficiência nutricional e sistema radicular) o incremento médio de produtividade seria de aproximadamente 27 Mg ha^{-1}.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Déficit de produtividade; Manejo agrícola; Fatores limitantes

ABSTRACT

The yield of agricultural crops is influenced by biotic and abiotic factors. These factors limit the final yield, being responsible for great productivity deficits. Thus, it is important to understand what are the factors responsible for productivity losses and how much they impact the final yield. With this, the study had as objective: (i) to determine the attainable productivity (Yw), agricultural efficiency and to quantify the yield gap (Yg) for sugar cane in specific plots of the mill; (ii) to identify the explanatory causes of Yg for the cultivation of sugarcane in the evaluated plots; (iii) generate equations of yield losses for each cause and decompose the yield loss for each evaluated cause. For this purpose, nine plots from a partner mill were selected to identify the factors that reduce yield and further decompose the causes of the Yg. With the support of the simulation model, Yw was quantified for each field. The actual productivity data (Yr) was sent by the partner plant, which was used to calculate Yg and agricultural efficiency. From a literature review, a yield loss equation was generated for each factor found. The identified factors were: pests, diseases, nutritional deficiency, plant population, weeds and root system. With the estimated yield loss for each factor, the actual estimated productivity was

established as a function of the productivity depleting factors (Yrest, n). The result showed that the yield loss equations managed to reasonably estimate how much each factor influences the final yield of the crop (R^2 = 0.52; RMSE = 41 Mg ha^{-1}). Correcting the management factors that led to greater yield losses (failures, nutritional deficiency and root system), the average yield increase would be approximately 27 Mg ha^{-1}.

Keywords: *Saccharum* spp., Yield gap; Agricultural management; Limiting factors

2.1 Introdução

Desde 1975, quando teve início o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), a produtividade da cultura da cana-de-açúcar subiu de 45 Mg ha^{-1} para mais de 75 Mg ha^{-1} (CONAB, 2019) representando um acréscimo de quase 160% (Figura 1). Notadamente, essa evolução na produtividade brasileira se deu, em boa parte, pelo desenvolvimento de tecnologias agrícolas de produção e pela introdução de novas variedades de cana-de-açúcar. Desse modo, até o fim da década passada, a produção brasileira de cana-de-açúcar era celebrada como paradigma mundial de eficiência agrícola (NYCO *et al*., 2008).

Nos últimos anos, contudo, o ritmo de incremento da produtividade média do País foi expressivamente reduzido, com tendência de estabilização ou mesmo de queda nos anos mais recentes (NYCO *et al.*, 2008) (Figura 1). Diversos fatores conjunturais podem explicar essa tendência, como baixa renovação de canaviais e adversidades climáticas verificadas nos últimos anos. No entanto, na análise da curva de produtividade de longo prazo, pode-se notar que a redução nos níveis de produtividade ao longo dos anos sofre também a influência de fatores de caráter estrutural (NYCO *et al*., 2008).

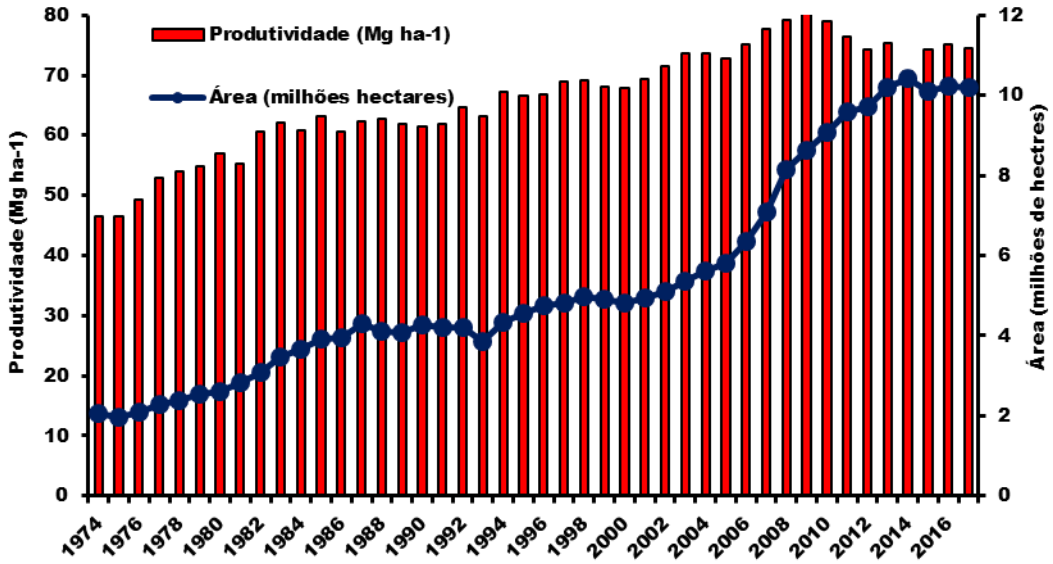

Figura 1. Produtividade a (Mg ha^{-1}) e área de produção brasileira (milhões de hectares) da cultura da cana-de-açúcar entre 1974 e 2017. (Fonte: IBGE)

As produtividades reais de culturas são o resultado de uma série de combinações relacionadas aos fatores definidores, limitantes e redutores de produtividade (DE WIT, 1992). Os fatores que definem o crescimento da cultura compreendem o fator ambiental (clima + solo) e as características genéticas da cultura, enquanto os fatores que limitam o crescimento da cultura incluem água e nutrientes. Os fatores redutores de crescimento compreendem pragas, doenças e plantas daninhas (VAN ITTERSUM *et al*., 2003). Logo, para se alcançar altos níveis de rendimento das culturas é necessário entender os resultados das interações entre os fatores agronômicos e ambientais. A compreensão do déficit de rendimento e suas causas é fundamental para sistemas de cultivo eficientes e produtivos (FERRARO *et al.*, 2009).

O chamado conceito de produtividade explorável ou déficit de produtividade quantifica a diferença entre o rendimento que os agricultores alcançam e os níveis de produtividade atualmente alcançáveis com as tecnologias e práticas de gerenciamento em diferentes ambientes de produção (DEVKOTA *et al.*, 2015*).* No entanto, por mais desafiadoras e importantes que sejam as estimativas do déficit produtivo das culturas, elas são de uso limitado, pois não há um entendimento de como esses intervalos irão variar. Uma análise mais específica só é possível se as causas subjacentes de diminuição de rendimento forem identificadas. Os fatores são vários e incluem estresses da natureza biótica e abiótica, fatores de fácil e difícil monitoramento, fatores que relacionam o manejo e propriedades do solo, bem como a interação entre todos os fatores (LOBEL *et al*., 2009). Contudo, o grande desafio para entender o nível de rendimento da cultura é identificar, dentre as possíveis causas de rendimento, as causas com maior influência e, se possível, estimar as perdas que elas acarretariam para as culturas (LOBEL *et al*., 2009).

Para a cana-de-açúcar, não há trabalhos disponíveis na literatura quantificando como os fatores bióticos e abióticos afetam o rendimento final da cultura. Para outras culturas, como a do milho, esse tipo de análise já foi realizada. O estudo verificou que o uso de fertilizantes (de modo a não ser um limitante para a cultura), o uso de híbrido, o aumento da população de plantas e manejo de plantas daninhas poderiam incrementar o rendimento final da cultura, em aproximadamente 5 Mg ha^{-1} (DEVKOTA *et al*., 2015)

Neste contexto, decompor o déficit de produtividade em suas causas é importante por duas razões. 1) porque produtores raramente adotam pacotes completos de tecnologia (LEATHERS & SMALE, 1991); 2) a intensificação sustentável das áreas de produção tem diferentes custos de investimentos, benefícios esperados, níveis de risco, bem como condições que facilitam a adoção de pacotes tecnológicos, como o nível de integração do mercado (SHIFERAW *et al*., 2009). Esses fatores são influenciados pela heterogeneidade biofísica e

socioeconômica associada a diferentes tipos de produção (TITTONELL & GILLER, 2013). Ao adotar uma abordagem direcionada para combinar pacotes tecnológicos com as circunstâncias de diferentes agricultores, a teoria e a experiência sugerem que os processos de adoção de tecnologia possam ser acelerados (CONROY & SUTHERLAND, 2004)

Desse modo, o entendimento dos fatores redutores de rendimento da cana-de-açúcar pode levar a um projeto mais eficiente do sistema de cultivo. Além disso, essas informações direcionam a projetos de experimentos específicos ou estratégias de melhoramento (VAN ITTERSUM *et al*., 2003). Além do mais, fechar o déficit produtivo por meio de um ajuste fino das práticas atuais de gerenciamento oferece uma oportunidade para aumentar a produção agrícola nas terras cultiváveis existentes (CASSMAN *et al*., 2003, VAN ITTERSUM *et al*., 2013).

Portanto, este trabalho buscou atender a uma demanda por conhecimento em escalas espaciais mais detalhadas, analisando a realidade de uma unidade sucroenergética operando em escala comercial. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Determinar a produtividade atingível, eficiência agrícola e quantificar o Yg para cana-de-açúcar em talhões específicos de usina sucroenergética;
- Identificar as causas explanatórias do Yg para a cultura da cana-de-açúcar nos talhões avaliados;
- Gerar equações de perdas de produtividade para cada causa e decompor a perda de produtividade para cada causa avaliada;

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Local de estudo

O estudo foi desenvolvido em uma área comercial de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, no qual foi selecionado um talhão durante a safra 2017/2018 e oito talhões durante a safra 2018/2019. Foi realizada a coleta de amostras deformadas no talhão, de 0-20 cm, onde foram determinadas as características químicas do solo (pH, bases trocáveis, alumínio e hidrogênio extraíveis, fósforo assimilável, carbono orgânico, CTC, soma de bases, saturação por bases e por alumínio, além dos teores de potássio, cálcio, magnésio e micronutrientes) (Tabela 1). O clima local, segundo Köppen-Geiger é Cwa (KOTTEK *et al.*, 2006) com precipitação anual de 1340 mm e temperatura média de 19,8 ºC.

Tabela 1. Caracterização química dos talhões avaliados para 0- 20 cm do solo.

Talhão	pH $CaCl_2$	MO g/dm^3	P_{resina} mg/dm^3	Al^{3+} $mmol_c/dm^3$	H+Al $mmol_c/dm^3$	K $mmol_c/dm^3$	Ca $mmol_c/dm^3$	Mg $mmol_c/dm^3$	SB $mmol_c/dm^3$	CTC $mmol_c/dm^3$	V% $mmol_c/dm^3$	S mg/dm^3
1	6.0	9	17	0	13	2.6	20	9	32	45	71	9
2	5.9	12	4	0	11	3.0	10	5	18	30	62	10
3	5.6	43	32	0	40	6	79	29	14	154	74	18
4	5.0	12	3	0	30	12.9	18	7	28	58	48	26
5	5.2	04	06	3	18	0.6	16	8	25	43	57	7
6	5.9	14	7.1	3	37	2.2	24	9	36	72	49	81
7	5.9	10	24	0	12	1.4	23	8	33	45	73	5
8	5.8	14	11	0	14	1.8	13	7	22	36	61	3
9	5.8	8	19	0	14	0.2	10	3	14	28	49	17

2.2.2 Produtividade atingível, déficit de produtividade e eficiência agrícola

A Yw da cultura na área comercial da usina foi quantificada com o modelo de simulação CANEGRO, disponível na plataforma DSSAT, que vem sendo aplicado em todo mundo para análise e avanço no conhecimento de sistemas de produção de cana-de-açúcar (OLEARY, 2000; INMAN-BAMBER *et al*., 2002; MARIN *et al*., 2005).

Para a simulação foi utilizada uma calibração disponível referente à variedade RB86-7515, obtida a partir de um conjunto de dados observados em diferentes áreas experimentais e climas para cana planta e soca (MARIN, 2014; NASSIF *et al*., 2012), que é amplamente cultivada no Brasil (MARIN *et al*., 2016).

Foram inseridos no modelo os seguintes dados de entrada: parâmetros de solo (capacidade de campo, ponto de murcha, condutividade hidráulica e profundidade do solo), variáveis meteorológicas (radiação solar, temperatura do ar máxima e mínima e precipitação), parâmetros genéticos da espécie/variedade e informações sobre o manejo a ser simulado (data de plantio e colheita). Os dados meteorológicos utilizados para a simulação foram enviados pela usina parceira, advindo da estação meteorológica instalada na área de produção da cultura (Figura 1).

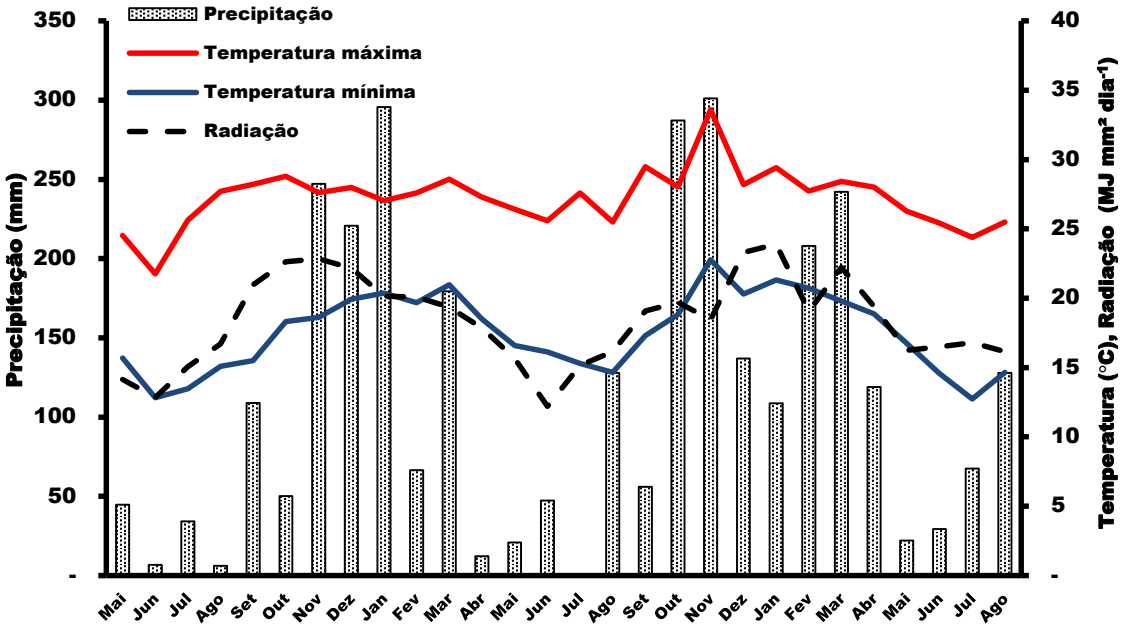

Figura 2. Média mensal da temperatura máxima e mínima (ºC), radiação solar e precipitação acumulada mensalmente entre maio de 2017 e agosto de 2019.

Tabela 2. Dados de manejo (data de plantio, data de colheita, tipo de solo, estágio de corte, variedade e área) utilizado para a simulação dos talhões específicos da área comercial.

Talhão	Data de Plantio	Último Corte	Corte	Variedade	Tipo de solo	Área (ha)
1	06/2017	06/2019	2°	SP83-2847	Neossolo Quartzarênico Distrófico	12.47
2	10/2016	06/2019	3º	RB975201	Latossolo Vermelho Eutrófico Argissólico textura média/média-argilosa	6.33
3	01/2016	07/2019	3º	RB975375	Nitossolo Vermelho Eutrófico Latossólico textura argilosa/muito argilosa	4,25
4	02/2011	06/2019	7°	RB966928	Nitossolo Vermelho Distrófico textura muito argilosa	6.03
5	04/2017	06/2019	2°	SP-832847	Neossolo Quartzarênico Distrófico	13.80
6	12/2011	07//2019	7º	CTC 17	Latossolo Vermelho Distrófico textura muito argilosa	8.44
7	04/2017	06/2019	2°	SP-832847	Latossolo Vermelho Argissóilico Eutrófico textura arenosa/média-arenosa	8.07
8	04/2015	05/2018	3°	CTC 25	Neossolo Quartzarênico Distrófico	6.45
9	06/2017	06/2019	2°	SP83-2847	Argissolo Vermelho Eutrófico textura arenosa/média	2.89

Os dados referentes à produtividade real foram obtidos juntamente ao banco de dados da usina parceira, a qual foi utilizada para cálculo da eficiência do talhão e déficit de produtividade do talhão. O déficit de produtividade total (Yg_t) foi determinado como sendo a diferença entre Yp e Yr. Desse modo, a perda ocasionada devido à deficiência hídrica (Yg_h) foi determinada pela diferença entre a Yp e a Yw. O déficit de produtividade ocasionado devido a manejo agrícola (Yg_m) foi determinado pela diferença entre Yw e Yr. A eficiência agrícola dos talhões foi determinada pela razão da Yr e Yw.

2.2.3. Seleção dos talhões e identificação dos fatores restritivos à produtividade

Para a quantificação e decomposição foram selecionados nove talhões. Nestes talhões foram identificados os fatores restritivos e limitantes a produtividade e com uma metodologia pré-estabelecida, a partir trabalhos de literatura, foi realizado o levantamento dos fatores observados em campo. Os fatores que foram avaliados, bem como a metodologia utilizada para o levantamentos foram: fator nutricional (Tabela 3), plantas invasoras (Tabela 4), falhas (Tabela 5) e doenças (Tabela 6). Também foi avaliada a infestação de pragas (Tabela 7). No entanto, como a Usina realiza essa avaliação na área, os valores foram obtidos do banco de dados da usina parceira.

Tabela 3. Metodologia de levantamento do fator nutricional e os teores adequados dos nutrientes disponíveis a cultura da cana-de-açúcar, segundo referências disponíveis na literatura.

FATOR LIMITANTE	SUB FATORES		TEOR FOLIAR	MÉTODO	REFERÊNCIA
TEOR FOLIAR DE NUTRIENTE	Nitrogênio	g kg^{-1}	18-25	Coletar a folha +3, cerca de 30 plantas por área a ser avaliada. Utilizar a parte mediana da folha. A época de amostragem para coletar a folha cana-soca aproximadamente 150 dias após a adubação para canas cortadas de abril a julho, e aproximadamente 120 dias após a adubação para canas cortadas de agosto a novembro.	(RAIJ *et al*., 1996)
	Fósforo		1,5-3,0		
	Potássio		10-16		
	Cálcio		2,0-8,0		
	Magnésio		1,0-3,0		
	Enxofre		1,5-3,0		
	Boro	Mg kg^{-1}	10,0-30,0		
	Cobre		6,0-15,0		
	Manganês		25-250		
	Zinco		10-50		
	Ferro		40-250		
	Molibdênio		0,05-0,2		

Tabela 4. Metodologia de levantamento das plantas daninhas encontradas em campo, segundo referências disponíveis na literatura**.**

FATOR LIMITANTE	SUB FATORES	MÉTODO	REFERÊNCIA
PLANTAS INVASORAS	Buva (*Conyza spp.)*	O método deve ser realizado aos 90 dias após a emergência da cultura (DAE). Para a determinação da densidade, será lançado, por dez vezes, um quadro metálico, nas dimensões de 0,5m x 0,5m, totalizando 0,25m² da área amostrada.	(DURIGAN *et al.*, 2005)
	Tiririca (*Cyperus rotundus*)		
	Corda de Viola (*Ipomoeae spp.*)		

Tabela 5. Metodologia de levantamento de população de plantas (falhas) encontradas em campo, segundo referências disponíveis na literatura.

FATOR LIMITANTE	SUB FATOR	METODOLOGIA	REFERÊNCIA
FALHAS	% de falhas de cana-de-açúcar	Para aplicar no campo demarca-se um trecho de linha de cana e estira-se a trena em cada falha de forma que os valores vão sendo acumulados na trena. O valor final da trena é a medida acumulada das falhas. Recomenda-se medir um total mínimo de cerca de 200 m de linha por talhão (10 ha) dividido em quatro amostras de 50 m. Assim, deve-se somar o comprimento total de falhas maiores que 0,5 m em um trecho de linha de cana e dividir pelo comprimento do trecho considerado x 100.	(STOLF, 1986)

Tabela 6. Metodologia de levantamento de pragas e doenças encontradas em campo, segundo referências disponíveis na literatura.

FATORES LIMITANTES	SUB FATORES	MÉTODO DE COLETA	REFERÊNCIAS
	Ferrugem (*Puccina ssp.*)	A avaliação da severidade da ferrugem marrom deve ser realizada na folha +3, em cinco colmos dispostos na parte mediana da parcela. Para a determinação da severidade da ferrugem marrom será utilizada a escala de notas.	(DILLEWIJN, 1952; AMORIM *et al*., 1987)
PRAGAS	Cigarrinha (*Mahanarva fimbriolata*)	Levantamentos para estimar a infestação de cigarrinhas devem ser iniciados após as primeiras chuvas de setembro. Para tanto, em um espaço de 2 m de sulco, em uma das linhas centrais de cada talhão devem ser contados os adultos nas folhas e cartuchos das plantas, bem como ninfas e adultos nas raízes. Para a contagem, as ninfas e adultos retira-se os mesmos da região radicular, na subsuperfície do solo, com auxílio de um palito de madeira, com cerca de 20 cm de comprimento e 0,5 cm de diâmetro.	(DINARDO-MIRANDA *et al*., 2004)
	Pragas de solo	Abrir trincheiras de 50 cm de largura por 50 cm de comprimento e 30 cm de profundidade avaliando dois pontos por hectare.	(ARRIGONI., 1988)
	Bicudo da cana-de-açúcar (*Sphenophorus levis*)	Deve ser realizado por meio de armadilhas formadas com iscas atrativas confeccionadas com toletes de cana de 1 metro cortados ao meio e imersos em inseticida químico por 24 horas. Após este período, os toletes devem ser colocados nas bases das touceiras e revestidos com palha da cana na razão de 100 toletes para cada hectare. Passados 20 dias, a avaliação da incidência de adulto é feita com base na quantidade de insetos.	(ALMEIDA, 2005)

2.2.4 Equações de perda de produtividade

Foram geradas equações de perda de produtividade para cada fator limitante e restritivo ao desenvolvimento da cultura. Para as causas de redução de produtividade (pragas, doenças, plantas daninhas, profundidade do sistema radicular e fator nutricional) foram geradas equações a partir de uma revisão de literatura, com trabalho específico para cada fator. Como um exemplo, a figura 3 mostra a equação de perda de produtividade da cana-de-açúcar em função da infestação de broca (*Diatrea saccharalis*). No eixo y se encontra a porcentagem de perda, enquanto no eixo x a infestação de broca na cultura.

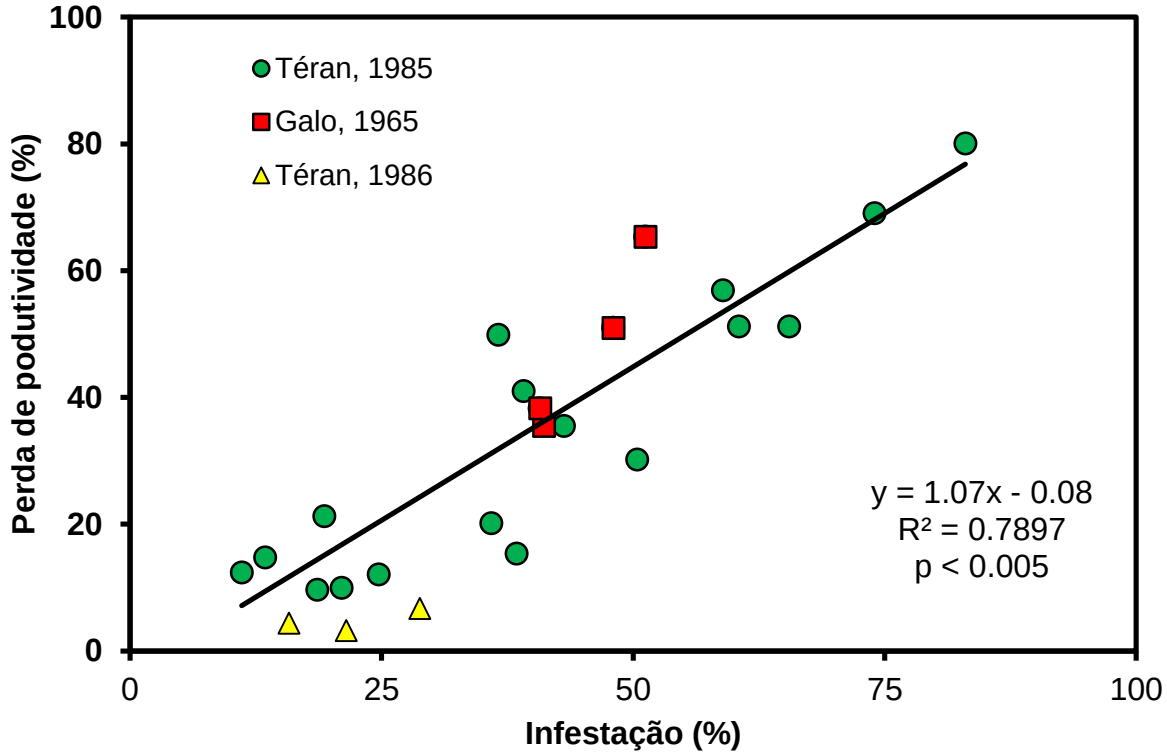

Figura 3. Equação de perda de rendimento gerada a partir de revisão de literatura para Diatraea saccharalis. Cada cor representa um trabalho consultado para obter a equação.

De outro modo, para estimar a perda de produtividade causada pela população de plantas, à equação de perda de produtividade da cultura foi gerada a partir de informações obtidas banco de dados da Usina parceira, sendo analisada separadamente a população de plantas para cada estágio de corte da cultura (cana planta, primeira soca, segunda soca etc). Desse modo, o decaimento observado em canas soca foi determinado em função do manejo adotado pela Usina parceira, aumentando gradativamente a cada corte em função de fatores relacionados a maquinários agrícolas, pisoteio de soqueiras.

2.2.5 Produtividade real estimada em função dos fatores depletores de produtividade

A partir das equações de perda de produtividade, foi decomposta a perda de rendimento para cada fator e estimada a produtividade real em função dos fatores de depleção de produtividade para cada talhão (Equação 3).

$$Yr_{est,n} = Yw * P_n \qquad (3)$$

em que $Yr_{est,n}$ é a produtividade real estimada em função de *n* fatores de depleção de produtividade (Mg ha^{-1}); Yw é a produtividade atingível limitada pela água; P_n é o coeficiente de perda agregada dos *n* fatores de depleção de produtividade consideradas na análise.

2.2.5 Análises estatísticas

A fim de avaliar o desempenho da abordagem proposta, comparou-se os valores de $Yr_{est,n}$ e os dados Yr observados na usina. Para tal, aplicou-se os testes estatísticos de coeficiente de determinação (Equação 4), erro médio quadrático (Equação 5) e o índice de concordância D (WILLMOTT *et al*., 2012) (Equação 6)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Ei-\bar{o})}{\sum_{i=1}^{n}(Ei-\bar{o})^2+\sum_{i=1}^{n}(Ei-oi)^2} \qquad (4)$$

em que R^2 é o coeficiente de determinação, Oi o valor observado, Ei o valor simulado e $\bar{O}$ a média dos valores observados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Ei-Oi)^2} \quad (5)$$

em que RMSE é a raiz do erro médio quadrático, Oi o valor observado, Ei o valor simulado e n é o número de talhões avaliados.

$$d_r = \begin{cases} 1-\frac{\sum_{i=1}^{n}|Ei-Oi|}{\sum_{i=1}^{n}|Oi-\bar{o}|}, \text{ quando} \\ \sum_{i=1}^{n}|Ei-Oi| \le c\sum_{i=1}^{n}|Oi-\bar{o}| \\ \frac{\sum_{i=1}^{n}|Oi-\bar{o}|}{\sum_{i=1}^{n}|Ei-Oi|}-1, \text{ quando} \\ \sum_{i=1}^{n}|Ei-Oi| > c\sum_{i=1}^{n}|Oi-\bar{o}| \end{cases} \qquad (6)$$

em que concordância d, Oi o valor observado, Ei o valor simulado e $\bar{O}$ a média dos valores observados.

2.3. Resultados

2.3.1. Produtividade atingível e o déficit de produtividade

Os valores observados em campo variaram entre 50 e 105 Mg ha^{-1}, enquanto os valores simulados variaram entre 87 e 107 Mg ha^{-1} e 130 e 155 Mg ha^{-1} para Yw e Yp, respectivamente. Desse modo, a Yp média estimada foi de 150 Mg ha^{-1}, dada que a Yr média foi em torno de 75 Mg ha^{-1}, o Yg_t aproximado foi de 74 Mg ha^{-1}. A Yw média simulada foi de 102 Mg ha^{-1}, ocasionando um Yg_h de 47 Mg ha^{-1} com isso, o Yg_m encontrado foi de 27 Mg ha^{-1} (Figura 3).

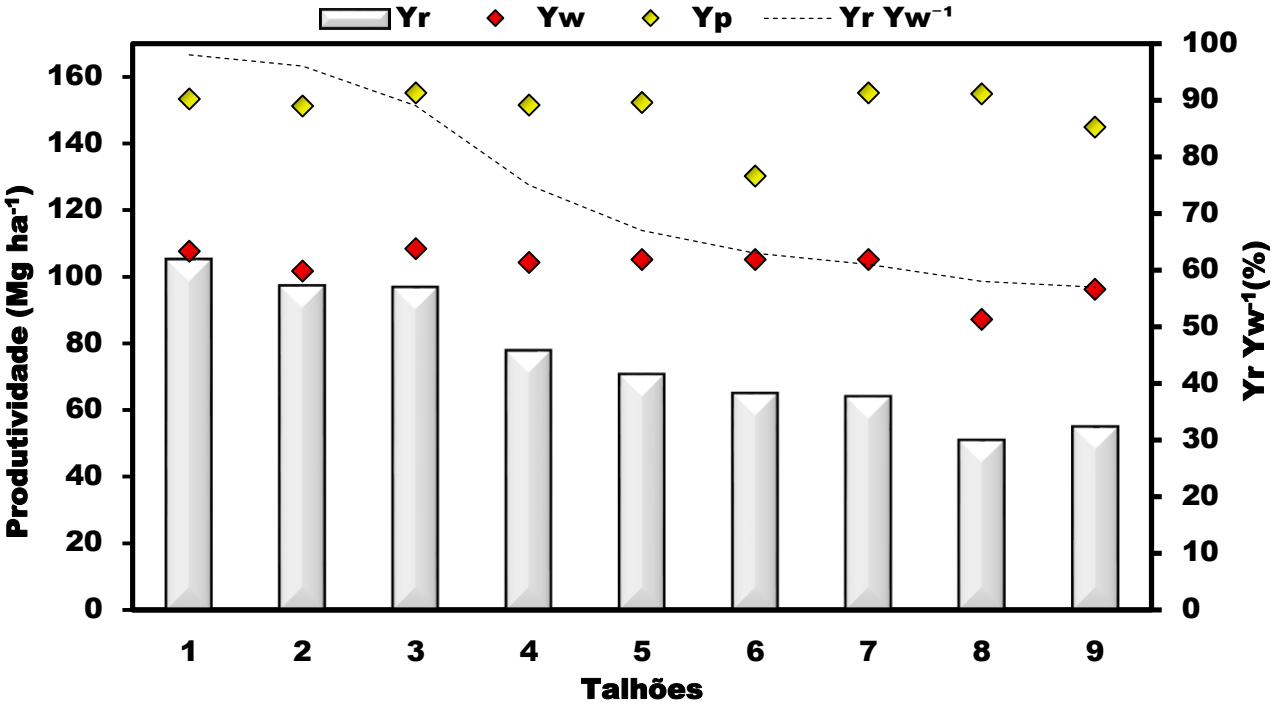

Figura 4. Produtividade potencial (Yp), produtividade atingível (Yw), produtividade real (Yr) e eficiência produtiva (Yr Yw-1) dos talhões avaliados na área comercial de cana-de-açúcar.

2.3.2 Fatores de depleção levantados em campo e perda de produtividade em função dos fatores de depleção levantados em campo

Os talhões avaliados apresentaram um Yg_m de aproximadamente 27 Mg ha^{-1} em função dos fatores de clima, solo e manejo, sendo possível incrementar a produtividade a partir da correção de ações de manejo dos fatores restritivos e limitantes a produtividades da cultura da cana-de-açúcar levantados em campo. Observou-se que os fatores encontrados na região do estudo estavam relacionados com o manejo de pragas, doenças, plantas daninhas, população de plantas, compactação do solo e deficiência nutricional. As perdas foram estimadas a partir das equações de perda de produtividade geradas para cada fator (Figura 5 e 6).

2.3.2.1 Pragas e doenças

Nos talhões amostrados foram identificadas diversas pragas, com destaque para a broca da cana (*Diatrea saccharalis*), cigarrinha (*Mahanara fimbriolata*) e o bicudo (*Sphenophorus levis*). No total, as pragas corresponderam a aproximadamente 9% da perda total estimada, sendo que a cigarrinha ocasionou a maior perda (3,81%), seguida por broca (3,63%) e bicudo (1,68%). Em relação à doença, ferrugem foi a única doença encontrada nos talhões avaliados. A severidade da doença observada nos talhões foi relativamente baixa, que resultou na menor perda de rendimento (5,53%) dentre os fatores avaliados (Tabela 8). As perdas ocasionadas por

esses fatores foram baixas, frente a outros problemas identificados, mas o manejo dos mesmos acarretaria um incremento na produtividade de 5,23 Mg ha^{-1}.

2.3.2.2 Plantas daninhas

As principais espécies de plantas daninhas encontradas em campo foram tiririca (*Cyperus rotundus*), corda-de-viola (*Ipomoea spp.*) e buva (*Conyza spp*). Na literatura não foram encontradas trabalhos referentes à infestação de buva em áreas de cana-de-açúcar, com isso a perda de produtividade pela espécie foi quantificada por meio da equação de perda de produtividade gerada para a tiririca (Figura 5f). A perda gerada pela corda-de-viola foi quantificada com a equação específica para a espécie (Figura 3e). Plantas daninhas resultaram em 9 % da perda total (Tabela 8), sendo que corda-de-viola correspondeu a 5% dessa perda.

2.3.2.3 População de plantas

Foi quantificada a perda ocasionada por falhas na população de plantas, por meio da equação de rendimento gerada a partir do banco de dados da Usina parceira (Figura 5g), onde foi avaliada a porcentagem de falhas para cada estágio de corte da cana-de-açúcar. A perda média ocasionada pela população de plantas (falhas) foi de aproximadamente, 3,75 Mg ha^{-1} por talhão avaliado, que representou 10,52% da perda total (Tabela 8).

2.3.2.4 Nutrientes

Observou-se a deficiência de alguns nutrientes ao realizar a análise foliar dos talhões selecionados. Para realizar a decomposição da perda de rendimento pelos teores de nutrientes foliares, utilizou-se a equação de perda de produtividade (Figura 6 A-D) gerada por dados da literatura para cada nutriente. A perda ocasionada pela carência de nutrientes correspondeu a 23% da perda total, sendo manganês (10,47%) o nutriente mais limitante a produtividade da cultura, seguido de nitrogênio (5,69%), fósforo (3,08%), boro (3%) e enxofre (0,90%), respectivamente (Tabela 8).

2.3.2.5 Sistema radicular

Buscou-se quantificar a perda ocasionada pela massa do sistema radicular nas áreas selecionadas pela equação de perda de rendimento gerada a partir de uma revisão de literatura para solos arenosos (Figura 5H) e argilosos (Figura 5I). O fator foi responsável por aproximadamente 42% da perda total (Tabela 8), sendo responsável pela maior perda de

produtividade da cultura da cana-de-açúcar. A massa de raízes (Mg ha^{-1}) do talhão variou de 0.33 a 1.24 Mg há (Figura 4). A maior produção de biomassa de raízes foi observada em solos arenosos (talhão 1,5,7,8,9), quando comparado a solos argilosos. Além disso, mais de 80% do sistema radicular foi observado na camada de 0 a 40 cm de profundidade (Figura 4). Em função do estágio de corte, os talhões em estágio de 2º soca apresentaram biomassa média de 2,49 Mg ha^{-1}, enquanto para o estágio de 3º e 7º soca a biomassa de raízes foi de 2,00 e 0,90 Mg ha^{-1}, respectivamente.

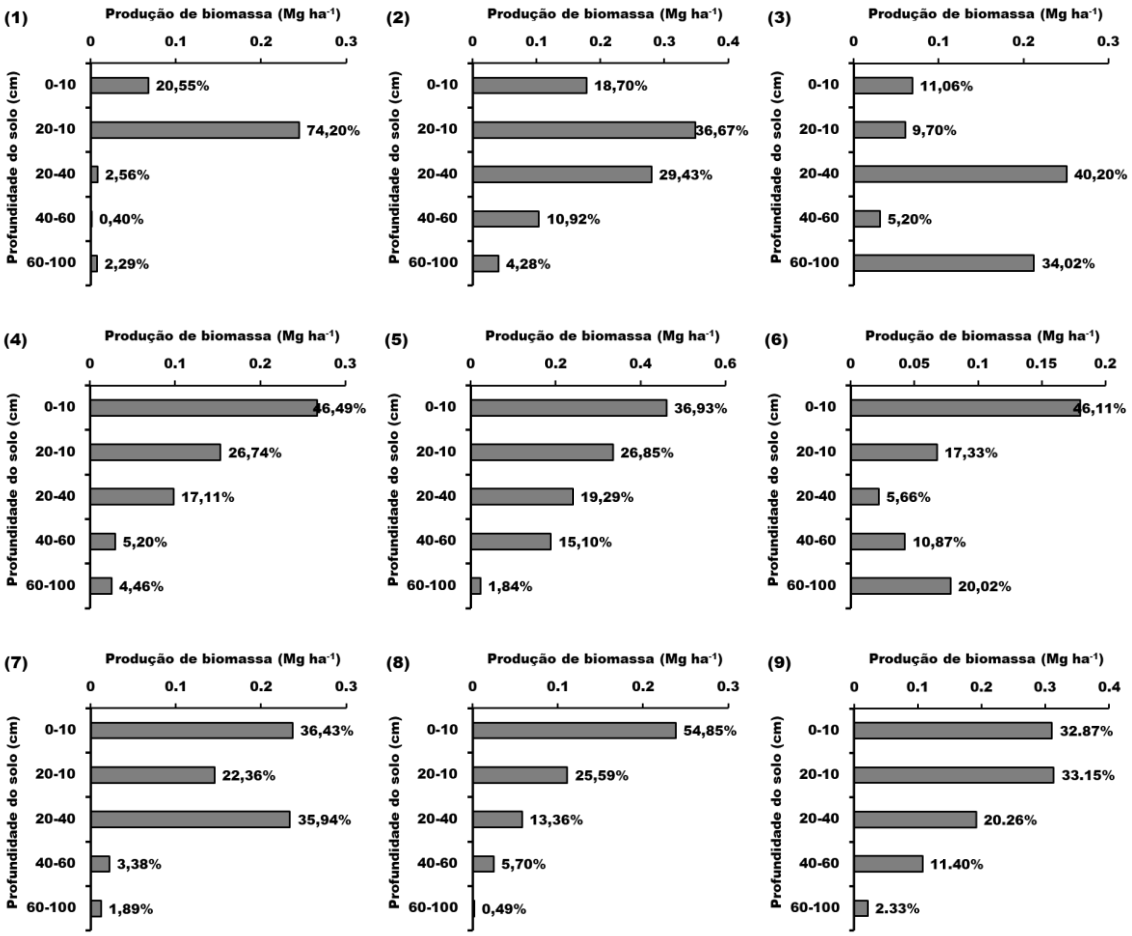

Figura 4. Produção de biomassa de raízes (Mg ha^{-1}) em cinco níveis profundidade para os talhões nove talhões avaliados.

Tabela 7. Perda de rendimento médio por fator (Mg ha^{-1}) e perda de rendimento (%) para cada fator levantado em campo**.**

Fatores de depleção da produtividade	Sub fatores	Perda (Mg ha^{-1})	Perda (%)	Perda Fator (%)
Solo	Sistema radicular	15.03	42	42.13
Nutricional	N	2.03	5.69	23.14
	P	1.09	3.08	
	S	0.32	0.90	
	B	1.06	3.00	
	Mn	3.73	10.47	
População de plantas	Falhas	3.75	10.52	10.52
Plantas daninhas	Corda de Viola	1.88	5.28	9.56
	Tiririca	1.52	4.28	
Pragas	Bicudo	0.60	1.68	9.12
	Cigarrinha	1.36	3.81	
	Broca	1.29	3.63	
Doença	Ferrugem	1.97	5.53	5.53
Total		35,68	100	100

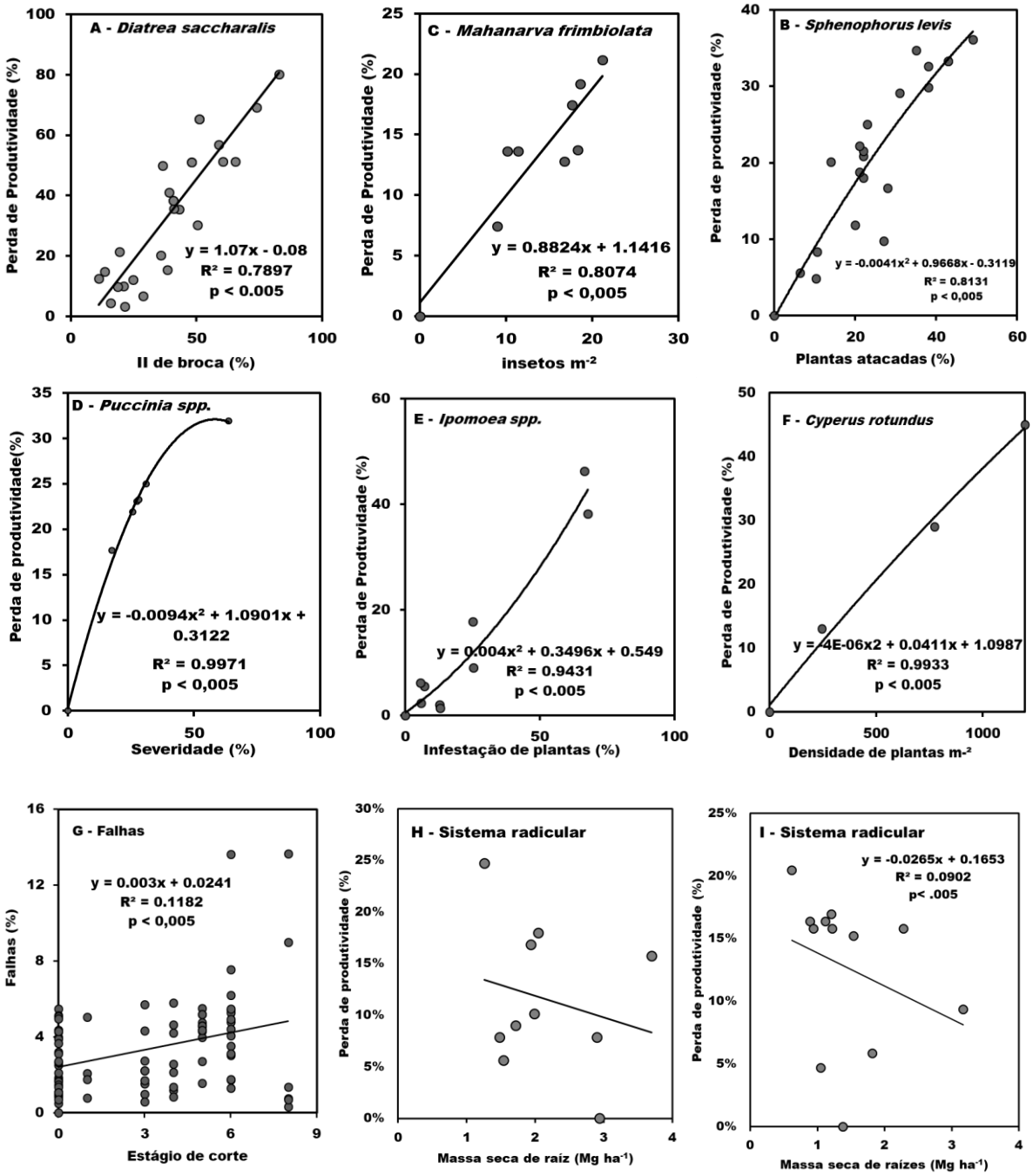

Figura 5. (A) Índice de infestação (%) *de Diatrea saccharalis* (Fonte: TÉRAN *et al*., 1985; TÉRAN *et al*., 1986); (B) Número de *Mahanarva frimbiolata* por metro (Fonte: DINARDO-MIRANDA *et al*., 2004); (C) Plantas atacadas (%) por *Sphenophorus levis* (Fonte: LEITE *et al*., 2012) ; (D) Severidade de ferrugem (%) (Fonte: COLETTE, 2016); (E) Infestação de *Ipomoea spp*. (%) (Fonte: JONES *et al*., 2009); (F) Densidade de plantas de *Cyperus rotundus* por metro (Fonte: DURIGAN *et al*., 2005) ; (G) População de plantas por estágio de corte ; (H) sistema radicular para solos arenosos e (I) sistema radicular dos solos argilosos (Fonte: ROSSI NETO, 2015) em função da perda de produtividade (%) da cultura da cana-de-açúcar.

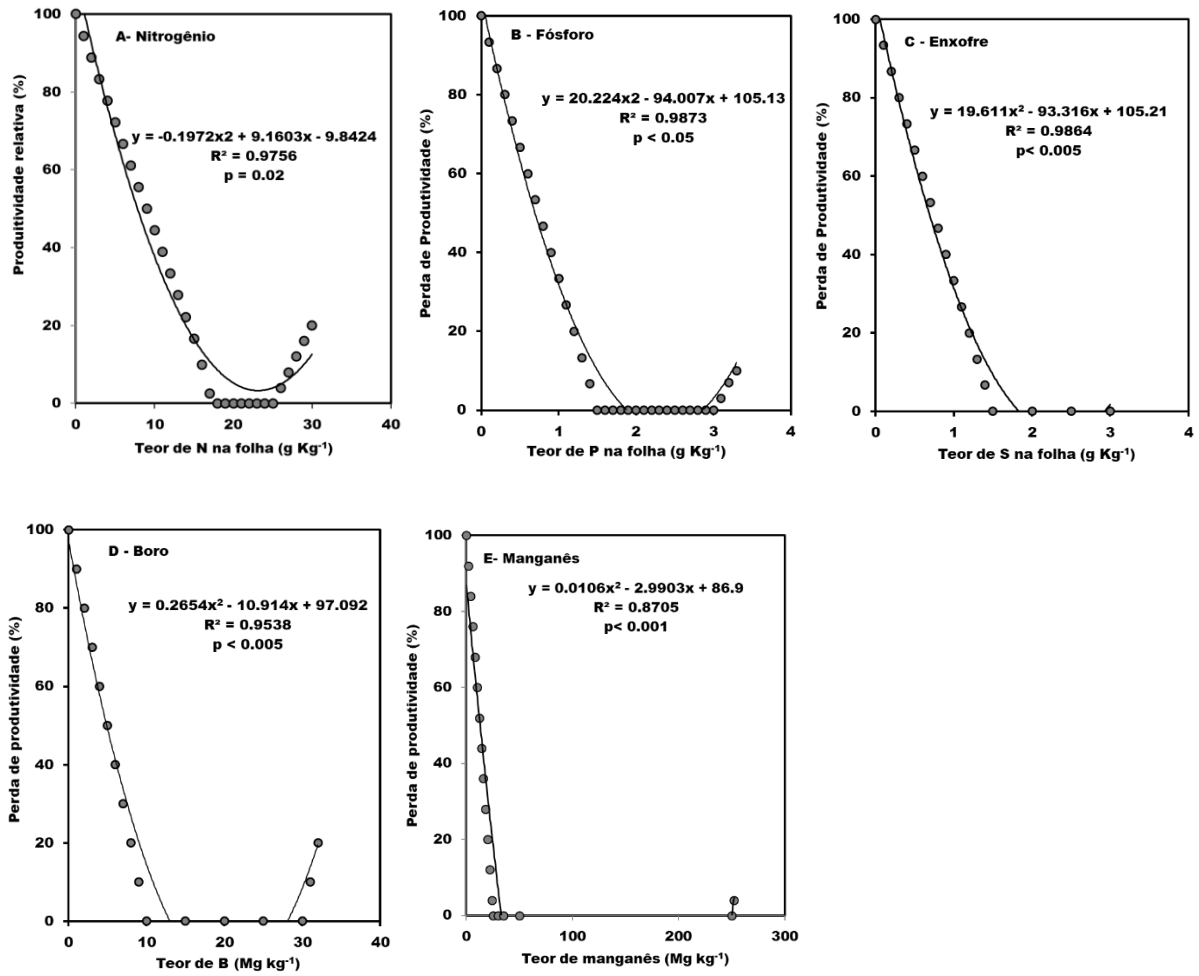

Figura 6. (A) Teor de N; (B) teor de fósforo; (C) teor de enxofre; (D) teor de boro e (E) teor de manganês em função da perda de produtividade (Fonte: Raij *et al*., 1996)

2.3.3 Decomposição do déficit de produtividade por talhão

Na Figura 7, a diferença entre as linhas azul e vermelha representa o déficit de produtividade da cultura e, consequentemente, quanto a usina poderia incrementar a produtividade de cada talhão. As lacunas coloridas representam os fatores limitantes e restritivos ao incremento da produtividade atingível dos talhões e a coluna amarela a $Yr_{est,n}$. Com base nesses dados observa-se que, à medida que a eficiência produtiva dos talhões diminuiu, intensifica-se a perda de produtividade da cultura da cana-de-açúcar, sendo o sistema radicular foi o fator com maior contribuição relativa nesta perda de produtividade. O sistema radicular inferiu na produtividade de todos os talhões. Esse fator foi o mais restritivo a produtividade para todos os talhões, exceto no 7 onde a deficiência de manganês foi superior.

Observou-se, ainda, que os talhões com menor eficiência (7 a 9) foram também os que apresentaram perda por deficiência nutricional. O talhão 7 foi o que apresentou maior perda em função da deficiência nutricional, e o principal elemento limitante à produtividade nesse talhão

foi o manganês. Nos demais talhões, 8 e 9, as perdas em decorrência da deficiência nutricional apresentaram valores semelhantes. No entanto, os principais elementos limitantes a produtividade foram fósforo e nitrogênio, respectivamente. O nitrogênio foi o fator limitante nos três talhões que apresentaram deficiência nutricional.

As perdas ocasionadas por pragas, doenças, plantas daninhas e população de plantas foram observadas em todos os talhões, mas as pragas detectadas em campo (cigarrinha, bicudo e broca) não foram encontradas simultaneamente em todos os talhões. O talhão 1 apresentou a menor perda em função desses fatores, notadamente foi o talhão mais eficiente, enquanto o talhão 8 foi o que apresentou a maior quantidade de perda e a menor eficiência produtiva.

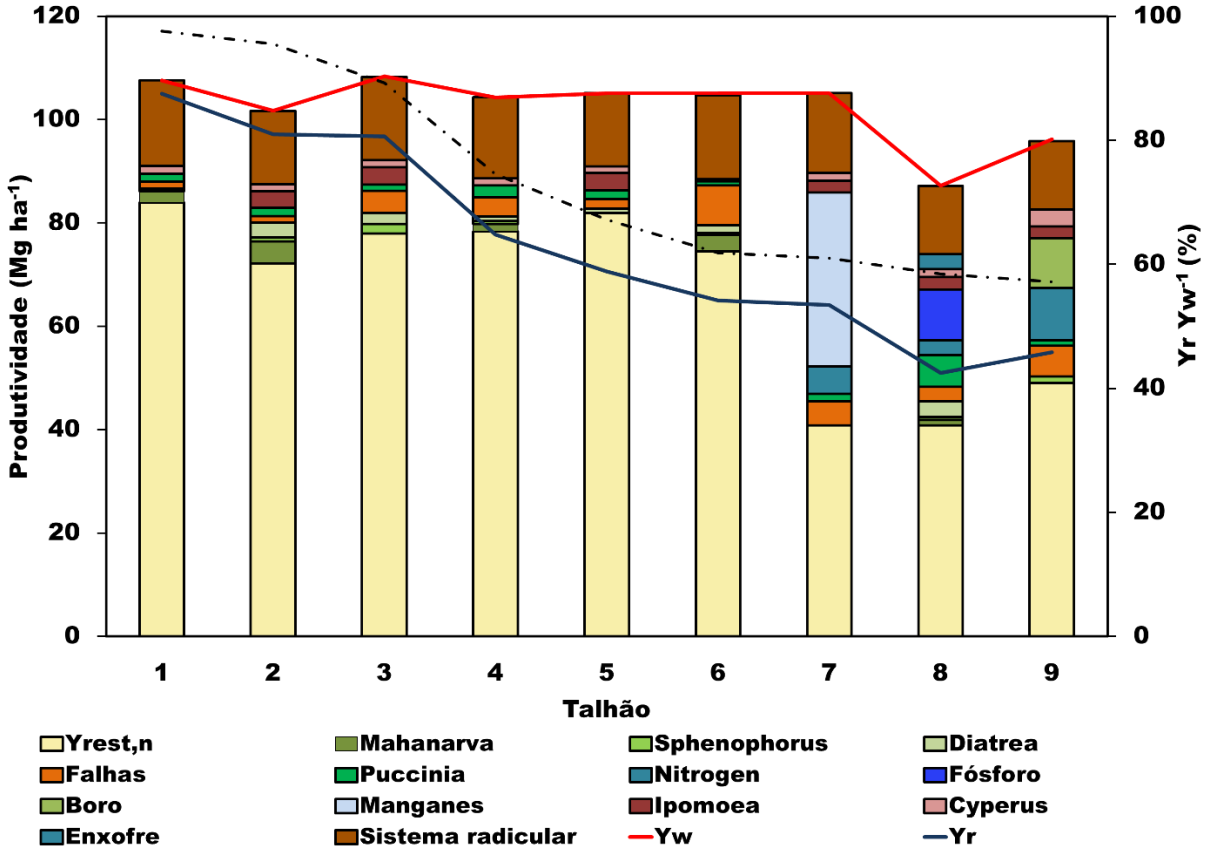

Figura 7. Decomposição do déficit de produtividade da cana-de-açúcar para os talhões avaliados, sendo que a linha vermelha a produtividade atingível (Mg ha^{-1}), a linha azul a produtividade real da Usina (Mg ha^{-1}), a linha preta tracejada a eficiência agrícola dos talhões (%), a coluna bege a $Yr_{est,\,n}$ (Mg ha^{-1}) e as colunas coloridas a perda por cada fator levantado em campo (Mg ha^{-1}).

Aplicando-se as equações de perdas sobre os valores de Yp estimados para cada um dos talhões analisados, foi possível estimar os respectivos valores de Yr. Assim, comparando-se os valores de Yr estimados por essa abordagem (Yr_{est}), obteve-se R^2=0,52; d=0,57; e RMSE =41 Mg ha^{-1}, com tendência média à subestimação (Figura 6).

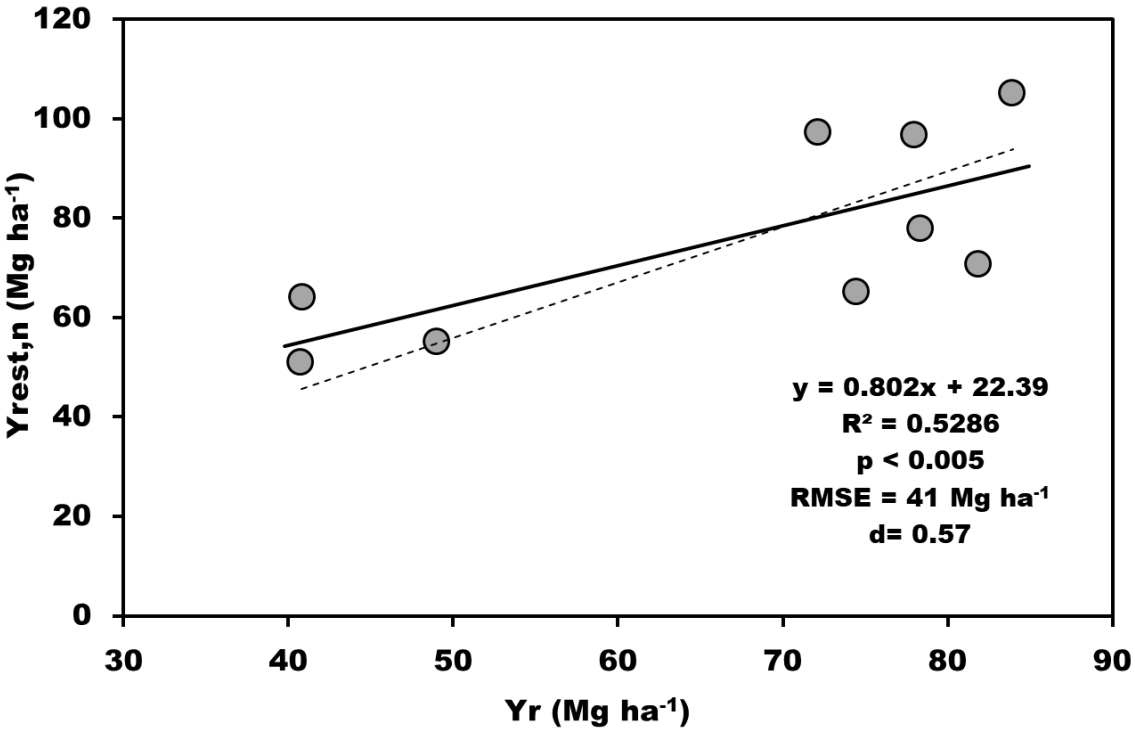

Figura 3. Relação linear entre a produtividade real (Yr) e a produtividade real estimada ($Yr_{est,n}$) em função dos fatores de depleção de produtividade e da produtividade potencial simulada, em nove talhões comerciais de cana-de-açúcar açúcar. A linha sólida representa a equação da regressão linear.

2.4. Discussão

O Yg_m médio, estimado a partir da diferença entre a Yw e Yr, foi de aproximadamente 27 Mg ha^{-1}, valor inferior ao encontrado na escala nacional para a cultura da cana-de-açúcar (MARIN *et al*., 2016). No entanto, a perda média estimada pelas equações de perda de rendimento foi de 36 Mg ha^{-1} (Tabela 7), ou seja, as equações de perda de produtividade superestimaram as das perdas, o que acarretou $Yr_{est,n}$ predominantemente inferiores a Yr. A avaliação do Yg_t dos talhões avaliados mostrou que 63% do Yg_t foi ocasionado pela deficiência hídrica da cultura, enquanto 37% do Yg_t estava relacionado a fatores de manejo.

O fator que ocasionou menor perda de rendimento foram as doenças. Dentre elas, a ferrugem alaranjada foi responsável pela menor taxa de perda, que está associada ao uso de variedades resistentes (BALSALOBRE *et al*., 2016) nos talhões avaliados. O uso de fungicidas para controle da doença não é considerado prático, e tampouco viável economicamente (RYAN & EGAN, 1989). Contudo, estudos apontam que a aplicação de silício pode auxiliar no controle da doença (MITANI & MA, 2005; DATNOFF *et al*., 2007) devido à sua associação com os constituintes da parede celular, tornando-a menos acessível às enzimas de degradação (MARAFON & ENDRES, 2011).

Os danos ocasionados por pragas também foram comparativamente baixos, sugerindo que o manejo de pragas na usina foi realizado de maneira eficiente. A cigarrinha das raízes, inseto que ganhou notoriedade no estado de São Paulo com a intensificação da colheita mecanizada, foi a praga que mais restringiu o incremento na produtividade da cultura. A broca-da-cana-de-açúcar foi responsável por perdas na faixa de 1,5%, em média, e isso parece ser consequência de métodos de controle eficaz associando a liberação de inimigos naturais da broca e o controle químico (DINARDO-MIRANDA, 2005). Quanto ao bicudo, observou-se baixa incidência de insetos na área, e consequentemente baixa interferência no rendimento final da cultura. Os métodos de controles dessa praga estão associados ao manejo cultural e ao controle de plantas daninhas (DEGASPARI *et al.*, 1987; PRECETTI & ARRIGONI, 1990; POLANZYC *et al.*, 2004). A área que apresentou maior perda pela praga também apresentou, maior infestação de plantas daninhas, o que pode sugerir alguma associação entre a sobrevivência de *S. levis* e a presença de plantas daninhas hospedeiras (PRECETTI & ARRIGONI, 1990).

O manejo eficiente de plantas daninhas nos canaviais é de grande importância, pois além de ser abrigo de pragas, podem competir diretamente com a cana-de-açúcar por recursos vitais, reduzindo sua disponibilidade para o crescimento da cana-de-açúcar. Observou-se que o talhão com menor população de daninhas foi aquele com maior porcentagem de falhas. A população de plantas da cultura principal (ou densidade de plantio) influenciou diretamente a precocidade e a intensidade do sombreamento das plantas daninhas, aumentando ou reduzindo a competição interespecífica por recursos limitados, tais como água, luz, nutrientes e espaço (VARGAS & ROMAN, 2008); consequentemente na produtividade final. Ressalta-se, que a intensificação da colheita mecanizada nos canaviais brasileiros contribuiu para o controle de plantas daninhas (JUNIOR *et al.*, 2009), uma vez que a camada de palhada deixada sobre o solo dificulta a emergência delas (AZANIA *et al.*, 2006; PITELE & DURIGAN, 2001)

A perda ocasionada por deficiência nutricional, além de estar relacionada a uma adubação ineficiente, poder se intensificada pelo comprimento do sistema radicular, resultado de uma compactação do solo ou preparo do solo ineficiente. Observou-se que os valores constatados para nitrogênio, fósforo, enxofre, boro e manganês estavam abaixo do teor adequado para a cultura da cana-de-açúcar (RAIJ *et al*., 1996) para esses talhões. No campo, existem constatações de que a omissão dos macronutrientes diminui a produção da cana-soca em 30% (ROSSETO *et al.*, 2008), ou até 38% com a omissão apenas do nitrogênio (VALE, 2009). Valores similares ao encontrado nesse estudo. Estes nutrientes são de extrema

importância para a cana-de-açúcar, podendo limitar o desenvolvimento de parte aérea e radicular, bem como as atividades fotossintéticas da cultura (MALAVOLTA *et al*., 1997) e consequentemente, a redução no rendimento final da cultura.

O sistema radicular da cultura foi o fator mais restritivo ao desenvolvimento da cultura. A produção de biomassa da planta apresentou-se em sua maioria, mais que 80%, entre a profundidade de 0 a 40 cm. Sabe-se que o desenvolvimento radicular pode ser influenciado por restrições químicas e físicas (VASCONCELOS & CASAGRANDE, 2008), porém não foram realizadas análises específicas para avaliar o porquê desse comportamento das raízes, mas alguns pontos podem ser levantados, como: 1) por se tratar de cana-soca, após o corte da cana-planta o sistema radicular é substituído pelas raízes dos novos perfilhos da soqueira, que tendem a crescer mais na superfície do solo, pelo fato dos perfilhos da cana-soca também brotarem mais superficialmente 2) o tráfego de maquinários nas áreas de produção de cana-de-açúcar pode comprometer os atributos físicos do solo, interferindo no desenvolvimento e distribuição do sistema radicular (OTTO *et al*., 2011) resultando em grande proporção das raízes nas camadas superficiais; 3) a distribuição e disponibilidade de água no solo, o que causa diferenças na capacidade das plantas de explorar camadas mais profundas (SMITH *et al*., 2005) e 4) ausência de doses de gessos no preparo de solo, uma vez que o gesso quando bem manejado, induz a um crescimento em profundidade do sistema radicular. Assim, a distribuição do sistema radicular no perfil do solo e sua interação com o seu ambiente de produção atuam diretamente em alguns fatores dos quais afetam a produtividade final, como tolerância a seca, capacidade de germinação, porte da planta, tolerância a movimentação de máquinas, eficiência na absorção dos nutrientes do solo, resistência ao ataque de pragas e parasitas do solo (VASCONCELOS & DINARDO-MIRANDA, 2011).

A correção dos fatores avaliados resultaria em um incremento médio na produtividade de 35,69 Mg ha^{-1}; a perda de produtividade causada por pragas, doenças e plantas daninhas foram relativamente menores, sugerindo que o manejo realizado para esses fatores foi realizado de maneira eficiente. Assim, corrigindo-se somente os principais fatores de perda de rendimento (adubação, população de plantas e sistema radicular) o incremento na produtividade seria de 27 Mg ha^{-1}. A análise estatística mostrou que as equações de perda de rendimento correspondem a 52% da variabilidade da produtividade observada nos talhões e, ainda que superestimem a perda de rendimento, a abordagem aqui empregada pode ser utilizada para a identificação dos fatores depletores da produtividade e quais sua magnitude relativa.

2.5 Conclusão

A partir do modelo de simulação foi possível quantificar a Yw, a eficiência agrícola e o Yg dos talhões comerciais avaliado. Os valores encontrados sugeriram a necessidade de se identificar as causas de redução e limitação da produtividade agrícola da cultura nesses talhões. As equações de perda de produtividade conseguiram explicar de maneira razoável como fatores restritivos e limitantes a cultura, que foram identificados em cada talhão específico, influenciou na produtividade da cultura. Os fatores que mais influenciaram foram sistema radicular, deficiência nutricional e população de plantas.

Trata-se do primeiro estudo no Brasil que busca decompor a perda ocasionada pelos fatores levantados em campo para a cultura da cana-de-açúcar. Estudos buscando aprimorar essas equações devem ser realizados. No entanto, trata-se de uma importante ferramenta para auxiliar os produtores nas tomadas de decisão.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. C. Bicudo da cana-de-açúcar. **Boletim Tecnico C. T. C.**, p. 1–3, 2005.

AMORIM, L.; BERGAMIN FILHO, A.; SANGUINO, A.L.; CARDOSO, C.O.N.; MORAES, V.A. DE; FERNANDES, C.R. Metodologia de avaliacao da ferrugem da cana-de-acucar (*Puccinia melanocephala*), Boletim Técnico Copersucar**,** n. 39, p. 6–13, 1987.

ARRIGONI, E.B. Flutuação populacional de *Migdolus fryanus Westwood*, 1863 (*Coleoptera: Cerambycidae*). Boletim Técnico Copersucar, n.44, p.22-26, 1988.

AZANIA, C. A. M.; ROLIM, J. C.; AZANIA, A. A. P. M. Plantas Daninhas. In: DINARDOMIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, p. 465-491, 2008.

BALSALOBRE, T. W. A.; MANCINI, M. C.; PEREIRA, G. S.; ANONI, C. O.; BARRETO, F. Z.; HOFFMANN, P. H.; SOUZA, A. P.; GARCIA, A. A. F.; CARNEIRO, M.S. Mixed modeling of yield componentes and Brown rust resistance in sugarcane families. **Agronomy Journal**, v.108, p.1-14, 2016.

CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D.T.; YANG, H.S. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. **Annual Review of Environment and Resources**, Palo Alto, v. 28, p. 315–358, 2003.

COLETTE, L. P. Controle químico da ferrugem alaranjada na cultura da cana-de-açúcar. **Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinarias – Dissertação (mestrado),** p.28, 2016.

CONAB. Série histórica das safras. Disponível em <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras> Acesso em: 27 out. 2019

CONROY, C. & SUTHERLAND, A. Participatory technology development with resource-poor farmers: Maximizing impact through the use of recommendation domains, **Agricultural Research & Extension Network**. V. 133, 11p, 2004.

DATNOFF, L.E.; RODRIGUES, F.A.; SEEBOLD, K.W. Silicon and Plant Disease. In: Mineral Nutrition and Plant Disease. DATNOFF, L.E.; ELMER, W.H.; HUBER, D.M. (Ed.). St. Paul: **American Phytopathological Society**, p.233-24, 2007.

DE WIT, C. T. Resource use efficiency in agriculture. **Agricultural Systems**, v. 40, n. 1, p. 125–151, 1992.

DEGASPARI, N.; BOTELHO, P. S. M.; ALMEIDA, L. C.; CASTILHO, H. J. Biologia de *Sphenophorus levis* Vaurie, 1978 (Coleoptera: Curculionidae) em dieta artificial e no campo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira,** Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 553-558, 1987.

DEVKOTA, K. P.; MCDONALD, A. J.; KHADKA, A.; KHADKA, L.; PAUDEL, G.; DEVKOTA, M. Decomposing maize yield gaps differentiates entry points for intensification in the rainfed mid-hills of Nepal. **Field Crops Research**, v. 179, p. 81–94, 2015.

DILLEWIJN, C. van. **Botany of sugarcane.** 1. ed. [s.l.] Waltham: Chronica Botanica, 1952.

DINARDO-MIRANDA, L.L., COELHO, A.L.; FERREIRA, J.M.G. Influência da época de aplicação de inseticidas no controle de *Mahanarva fimbriolata* (Stål) (*Hemiptera: Cercopidae*), na qualidade e na produtividade da cana-de-açúcar. **Neotropropical Entomology**, Vacaria, v.33, V.1, p.91-98, 2004.

DINARDO-MIRANDA, L. L. Nematoides e pragas de solo. Campinas: Instituto Agronômico, 2005, 32 p.

DURIGAN, J. C.; TIMOSSI, P. C.; CORREIA, N. M. Densidades e manejo químico da tiririca na produtividade de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 23, n. 3, p. 463–469, 2005.

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.

INMAN-BAMBER, N. G.; MUCHOW, R. C.; ROBERTSON, M. J. Dry Matter Partioning of Sugarcane. v. 76, p. 71–84, 2002

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema de Recuperação automática (SIDRA).** Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 25 out. 2019.

JONES, C. A.; GRIFFIN, J. L. Red morningglory (*ipomoea coccinea*) control and competition in sugarcane. **Journal of the American Society Sugar Cane Technologists**, v. 29, p. 25–35, 2009.

JUNIOR, J. B. D.; COELHO, F. C.; FREITAS, S. P. Dinâmica de populações de plantas daninhas na cana-de-açúcar em sistema de plantio direto e convencional. Semina: Ciências Agrárias, v. 30, n. 3, p. 595-612, 2009.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift, Berlin**, v. 15, n.2, p. 259-263. 2006.

LEATHERS, H. D.; SMALE, M. A Bayesian Approach to Explaining Sequential Adoption of Components of a Technological Package, **American Journal of Agricultural Economics,** v. 73, p. 734–742, 1991, https://doi.org/10.2307/1242825

LEITE, L. G. et al. Eficiência de nematoides entomopatogênicos e inseticidas químicos contra *Sphenophorus levis e Leucothyreus sp.* em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 1, p. 40–48, 2012.

LOBEL, 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.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas. 2.ed. Piracicaba: **Potafos**, 319p, 1997.

MARAFON, A. C.; ENDRES, L. Adubação silicatada em cana-de-açúcar. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2011. 48 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 165).

MARIN, F. R. Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos. **Escola Superior de Agricultura "Luiz de Quieroz" - Tese de Livre Docência**, p. 262, 2014.

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

MARIN, F. R.; PILAU, F. G.; SPOLADOR, H. F.S.; OTTO, R.; PEDREIRA, C. G. S. Intensificação sustentável da agricultura brasileira. **Revista de Política Agrícola**, p. 108–124, 2016.

MITANI N.; MA, J. F. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, p. 1255-1261, 2005.

NASSIF, D.S.P.; MARIN, F.R.; PALONE FILHO, W.J.; RESENDE, R.S.; PELLEGRINO, G.Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 3, p. 311-318, 2012.

NYKO, D.; VALENTE, M.; MILANEZ, A.; TANAKA, A.; RODRIGUES, A. A evolução das tecnologias agrícolas do setor sucroenergético: estagnação passageira ou crise estrutural? Bionergia. BNDES Setorial, v.37, p.399-442, 2013.

O'LEARY, G. J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, v. 68, n. 2, p. 97–111, 2000.

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

PITELLI, R. A.; DURIGAN, J. C. Ecologia das plantas daninhas no sistema plantio direto. In: ROSSELLO, R. D. **Siembra directa en el cono sur.** Montevideo: PROCISUR, p. 203-210, 2001.

POLANCZYK, R. A.; ALMEIDA, L.C.; PADULLA, L.; ALVES, S. B. Pragas de cana-de-açúcar x métodos alternativos de controle. **Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, Brasilia, n. 33, p. 13-17, 2004.

PRECETTI, A .C. C.; ARRIGONE, E. Aspectos biológicos e controle do besouro *Sphenophorus levis* Vaurie, 1978 (Coleoptera: Curculionidae) em cana-de-açúcar. São Paulo: COPERSUCAR, 1990. 15 p. (Boletim Técnico).

RAIJ, B. van et al. **Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo Title**. 2 ed. Campinas: Boletim técnico 100, 1996.

ROSSETO, R.; DIAS, F.L.F.; VITTI, A.C. Fertilidade do solo, nutrição e adubação. In: Dinardo-Miranda, L.L; Vasconcelos, A.C.M.; Landell, M.G.A. (Eds.). Cana-de-açúcar. **Campinas**: Instituto Agronômico, 2008. p.271-287.

ROSSI NETO, João. Desenvolvimento do sistema radicular e produtividade da cana-de-açúcar em diferentes espaçamentos. 2015. 112 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/256756>.

RYAN, C. C.; EGAN, B. T. Rust. In: RICAND, C.; EGAN, B. T. ; GILLASPIE JUNIOR, A. G. ; HUGHES, C. G. **Diseases of sugarcane.** Amsterdam: Elsevier,. p. 189- 210, 1989.

SHIFERAW, B.; OKELLO, J.; REDDY, R. Adoption and adaptation of natural resource management innovations in smallholder agriculture: Reflections on key lessons and best practices. **Environment, Development and Sustainability**. v. 11, p. 601– 619, 2009.

SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v.92, p.169-183, 2005.

STOLF, R. Universidade Federal de São Carlos. **Metologia de Avaliação de falhas nas linhas de cana-de-açúcar**, p. 36, 1986.

TÉRAN, F. O.; PRECETTI, A. A. C. M.; SÁNCHEZ, A. G. Importância econômica, aspectos bioecológicos e manejo populacional da broca da cana-de-açúcar, Diatraea saccharalis. In: ARRIGONI, E.B.; DINARDOMIRANDA, L.L.; ROSSETTO, R. Pragas da cana-de-açúcar – Importância econômica e enfoques atuais., São Paulo. **Anais**... São Paulo: Coopersucar, 1986.

TÉRAN, F.O.; SÁNCHEZ, A.G.; PRECETTI, A.A.C.M. Estudos sobre resistência da cana à broca em telado: Primeiros resultados. Boletim Técnico Copersucar, v.29, p.2-11. 1985.

TITTONELL, P.; GILLER, K.E. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. **Field Crops Research**, v. 143, p. 76–90, 2013.

VALE, D.W. **Efeito da aplicação de nitrogênio nos atributos químicos do solo, na nutrição e na produção de cana-de-açúcar**. Dissertação Mestrado Jaboticabal: UNESP, 120p. 2009.

VAN INTTERSUM, 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.; LEFFELAAR, P. A.; VAN KEULEN, H.; KROPFF, M.J.; BASTIAANS, L.; GOUDRIAAN, J. On approaches and applications of the Wageningen crop models. **European Journal. Agronomy**, v. 18, p. 201-234, 2003.

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.

VARGAS, L.; ROMAN, E. S. **Manual de manejo e controle de plantas daninhas**. Passo Fundo: Embrapa Trigo. 780 p. 2008.

VASCONCELOS, A.C.M; CASAGRANDE, A.A. **Fisiologia do sistema radicular.** In: Dinardo-Miranda, L. L.; Vasconcelos, A. C. M.; Landell, M. G. A. (Eds). Cana-de-açúcar. Campinas, Instituto Agronômico, pag. 79-97, 2008.

VASCONCELOS, A.C.M.; DINARDO-MIRANDA, L.L. Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e implicações no controle de nematóides**. Revista e Ampliada**. 2ª Edição. Campinas. 2011.

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance: A rejoinder. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 4, p. 1088–2094, 2012.

3. EFEITO DO ESPAÇAMENTO DE CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA PRODUTIVIDADE: UMA REVISÃO EXTENSIVA

RESUMO

A redução no espaçamento entre fileiras de cana-de-açúcar tem potencial para aumentar o rendimento da safra. Os resultados de pesquisas em cana-de-açúcar no Brasil e no mundo ainda são inconclusivos. Dessa forma, o objetivo desta revisão foi avaliar a influência do espaçamento entre fileiras na produtividade da cultura da cana-de-açúcar e identificar o espaçamento de fileiras mais adequado. Neste estudo, revisões de estudos publicados no Brasil e no mundo foram realizadas para avaliar a influência do espaçamento entre fileiras na produtividade da cana. Um total de 28 estudos publicados foram encontrados, incluindo 170 experimentos de campo no total. Os dados experimentais de campo foram agrupados com base na similaridade do clima, utilizando análise hierárquica de agrupamentos, com base na classificação climática de acordo com Koppen, para experimentos de sequeiro e irrigados. Foi utilizado ANOVA para avaliar se houve variação entre os valores do SFY e, posteriormente, os testes de Tukey para a comparação entre as médias ($p \leq 0,05$). Nossos resultados indicaram que a produtividade aumentou significativamente à medida que o espaçamento entre filas foi reduzido. O espaçamento entre fileiras de 90 e 100 cm foi o que apresentou maior produtividade ($p < 0,01$) para os tratamentos irrigados e de sequeiro. Enquanto, os menores valores médios de produtividade variaram de acordo com a zona climática (CZs) e o tratamento (irrigado e de sequeiro), no entanto, estavam entre 150 e 180 cm. Apesar do aumento no rendimento, o uso de espaçamento mais estreito de linhas ainda é limitado principalmente devido a colheita mecanizada.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., População de plantas; Colheita mecanizada; Mecanização; Compactação

ABSTRACT

The reduction sugarcane interrow spacing has the potential to increase a yield of the crop. Research results in sugarcane in Brazil and in the worldwide are still inconclusive. Thereby, the objective of this review was to evaluate the influence of interrow spacing on the stalk fresh yield (SFY) of sugarcane crop and to identify the most appropriate row spacing. In this study, reviews of published studies in Brazil and in worldwide were conducted to evaluate the influence of interrow spacing on sugarcane SFY. A total of 28 relevant published studies were founded, including 170 field experiments in total. We grouped the field experimental data based on similarity of climate using hierarchical cluster analysis, based in climatic classification according to Koppen, for rainfed and irrigated experiments. We used ANOVA to evaluate if there was a variation between the SFY values and, later, the Tukey tests were applied to make a comparison between the means ($p \leq 0.05$). Our results indicated that SFY significantly increased as interrow spacing was reduced. Interrow spacing of 90 and 100 cm was the one with the highest SFY ($p < 0.01$) for the irrigated and rainfed treatments. While, the lowest average SFY values varied according to the climatic zone (CZs) and treatment (irrigated and rainfed), however, were between 150 and 180 cm. Despite the increase in yield, the use of narrower row spacing is still limited mainly due to the combine width gauge.

Keywords: *Saccharum* spp., Plant population, Mechanized harvesting, Mechanization, Compaction

3.1 Introdução

A definição da população de plantas numa cultura agrícola é um dos pontos mais importantes em termos de manejo e do potencial produtivo das culturas (LOMIS & CONNOR, 1992). Nas culturas de milho e soja, por exemplo, observou-se uma expressiva redução do espaçamento nas últimas duas décadas, como resultado de adaptações genotípicas que permitiram um aumento expressivo da produtividade ao longo das últimas décadas (FAWCETT *et al*.,2015; CARCIOCHI *et al*., 2019; ANDRADE *et al*., 2019; BATTAGLIA *et al.*, 2019).

No setor canavieiro, a despeito do grande número de experimentos já realizados sobre este tema no Brasil e no mundo e diferentemente do que se observa no setor de grãos, a definição do melhor espaçamento permanece ainda em debate no meio técnico-científico. Tais estudos sobre os espaçamentos de plantio da cultura representam uma rica fonte de informação científica, pois reportam a variação da produtividade com distância entrelinhas sob diferentes condições experimentais (e.g. variedades, climas, solos e irrigação) e estão todos disponíveis na literatura científica.

A indústria canavieira tem especificidades que limitam a comparação com os sistemas produtivos de grãos. Os principais são: 1) a habilidade de rebrota da cana-de-açúcar permitindo que uma área seja colhida por diversas vezes sem a necessidade de replantio; 2) o colmo fresco é a parte de interesse econômico, demandando corte e transporte rápido de grande massa e volume para a indústria; 3) a produção restringe-se a zona tropical do planeta incluindo países com baixa taxa de mecanização agrícola.

Tais especificardes, em grande medida, justifica a dificuldade em se definir o melhor espaçamento para cultivo da cana-de-açúcar, uma vez que o sistema de produção é relativamente mais complexo e há dificuldade na condução de experimentos que reflitam as condições comerciais de cultivo. Neste trabalho, com base numa ampla revisão de 28 artigos científicos abrangendo 170 experimentos avaliando o efeito da distância entrelinhas na produtividade da cana-de-açúcar, buscou-se contribuir com a definição da melhor população de plantas nos canaviais brasileiros, além de isolar os fatores biológicos dos demais aspectos agronômicos envolvidos na produção canavieira do Brasil.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Descrição da base de dados

Com base na revisão da literatura, compilamos dados de experimentos de campo realizados em todo o mundo, nos quais a influência do espaçamento entre fileiras em função a produtividadefoi investigada (Fig. 1). No total, foram encontrados 30 artigos científicos que relatam 180 experimentos de campo em 9 países. O foco de todos os estudos recuperados foi avaliar o efeito do espaçamento entre filas estreitas e largas na produtividade, com espaçamento entre fileiras variando de 90 a 180 cm. No entanto, a maioria deles incluiu outros tratamentos além das comparações entre espaçamentos, como densidade de plantio, quantidade de irrigação, doses de adubação nitrogenada e cultivares. Para experimentos de campo testando doses de adubação nitrogenada, foram utilizados apenas os dados referentes à quantidade de nitrogênio que resultaram em maior produtividade para comparar o espaçamento entre fileiras. Todas as experiências de campo selecionadas foram colhidas manualmente. Como o número de experimentos para diferentes estágios da cultura (cana e soca) foi razoavelmente semelhante (Tabela 1), não consideramos os estágios da cultura em nossa análise estatística. Após o controle de qualidade, o banco de dados continha 28 artigos científicos, um total de 170 experimentos de campo realizados em 26 locais em 9 países.

Tabela 1. Porcentagem de experimentos realizados para diferentes estágios das culturas.

Estágio da cultura	Sequeiro ou Irrigado	Número de experimentos	Fração do número de experimentos
Cana planta	Sequeiro	58	33%
Cana planta	Irrigado	36	22%
Soca 1	Sequeiro	27	16%
Soca 1	Irrigado	24	14%
Soca 2	Sequeiro	8	5%
Soca 2	Irrigado	17	10%

A análise dos efeitos do espaçamento entre fileiras requer o agrupamento dos dados experimentais com base nos fatores biofísicos que provavelmente têm maior influência na produtividade da cultura. Neste estudo, agrupamos os dados experimentais com base na

similaridade do clima usando a análise hierárquica de agrupamentos. Utilizamos a classificação climática de acordo com Köppen, como critério para classificar as zonas climáticas (CZs), tanto para experimentos de sequeiro quanto para irrigação, como mostra a Figura 1.

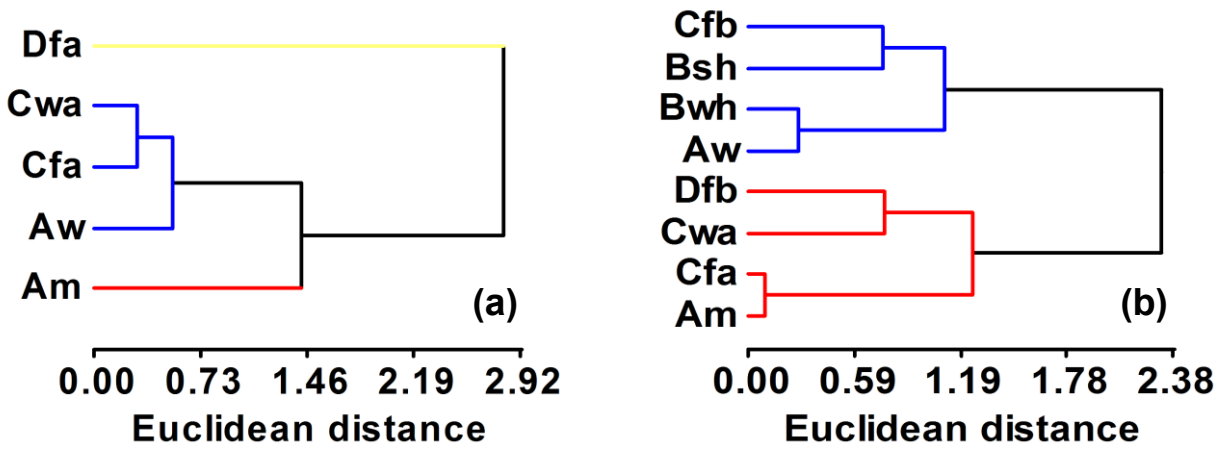

Figura 1. Agrupamento de zonas climáticas usando análise hierárquica de agrupamentos para sequeiro (a) e irrigado (b).

3.2.2 Análises estatísticas

Foi realizada a normalização dos dados para uma comparação quantitativa significativa da produtividade e espaçamento. Para normalizar os dados, a produtividade máxima foi estabelecida para cada uma das 180 experiências. O valor máximo da produtividade encontrada para cada experimento foi dividido pelos demais produtividades de cada espaçamento para os respectivos experimentos. Assim, para cada experimento, um espaçamento com 100% SFY foi obtido, enquanto o outro espaçamento do mesmo experimento mostrou SFY abaixo de 100%

Utilizou-se ANOVA como um primeiro passo para entender as fontes de variação da produtividade em função dos espaçamentos entre fileiras. Os efeitos de CZs, espaçamento entre fileiras e tratamento de água (de sequeiro ou irrigado) no SFY foram avaliados usando ANOVA (valor-p) e os testes de Tukey ($p \leq 0,05$) foram utilizados para realizar comparações entre médias. A análise de regressão foi usada para descrever o efeito causal do espaçamento entre fileiras na produtividade.

3.3 Resultados

Uma grande variabilidade dos dados foi identificada para o mesmo espaçamento entre linhas, devido à condução dos experimentos em diferentes regiões, sob diferentes classificações

climáticas e tratamentos variados, o que dificultou nossa análise. Um total de 28 estudos relevantes foram considerados e forneceram informações suficientes para a realização das análises (consulte o Apêndice A). Em 28 estudos, 7 foram conduzidos na América do Sul, 5 na Ásia, 9 na América do Norte, 6 na África e 1 na Oceania (fig. 1). Esses estudos forneceram 170 experimentos, sendo que 32% avaliaram o espaçamento entre fileiras de 90 e 180 cm, enquanto 5% dos experimentos avaliaram o espaçamento entre filas de 160 cm. Além disso, em 170 experimentos, 93 foram conduzidos em sequeiro e 77 irrigados. Esses tratamentos foram avaliados separadamente para que não houvesse influência, por exemplo, da irrigação, na produtividade final da cultura em relação aos tratamentos que não receberam irrigação.

A análise hierárquica por agrupamento agrupou os tratamentos em de CZs com base na precipitação anual, média de temperatura e latitude (Fig. 1). Para o tratamento irrigado, os dados foram agrupados em dois grandes grupos (CZ1 e CZ2). Os experimentos agrupados em CZ1 apresentaram temperaturas mais altas (23,51 versus 20,03 ºC) e maior variação na latitude, mas menor precipitação (1505 versus 586 mm) quando comparadas à CZ2. No tratamento de sequeiro, os dados foram divididos em três grandes grupos, com base nas variáveis climáticas. Os experimentos agrupados em CZ3 foram os que apresentaram temperaturas mais altas que os CZ4 e CZ5. O mesmo foi observado em relação à precipitação média total (mm). A latitude na CZ3 não se alterou, enquanto em outros aglomerados observou-se uma variação maior (Tabela 2).

Tabela 2. Temperatura média, precipitação média anual e latitude para cada zona climática (CZ) obtida por análise hierárquica de agrupamentos nos tratamentos irrigados e de sequeiro.

Irrigado ou Sequeiro	CZs	Classificação de Koppen	Temperatura média (ºC)	Precipitação anual média (mm)	Latitude
Irrigated	CZ1	Cfb, Bsh, Bwh, Aw	23.51	586.92	12.33 a 37.7
Irrigated	CZ2	Dfb, Cfa, Am, Cwa	20.93	1505.81	20.8 a 31.25
Rainfed	CZ3	Dfa	29.58	1586.23	20.8
Rainfed	CZ4	Cwa, Cfa, Aw	21.10	1347.00	16.72 a 32.21
Rainfed	CZ5	Am	26.1	1375.66	17.08 a 22.91

No tratamento irrigado, na CZ1, o maior intervalo de produtividade foi de 0,99 e 0,80 entre o espaçamento entre linhas de 100 e 130 cm, respectivamente; representando uma redução na produtividade de aproximadamente 19% com o aumento do espaçamento entre linha ($p < 0,01$; Tabela 3). Também foi observada diferença na produtividade entre os espaçamentos de 100 e 150 cm. No entanto, a redução na produtividade com o aumento do espaçamento para 150 cm foi de aproximadamente 17% ($p < 0,01$; Tabela 3). O intervalo de rendimento para o espaçamento de 100 cm foi de 1,0 a 0,86 (Fig. 2A). Para o espaçamento entre fileiras de 150 cm, a variação no SFY foi de 1 a 0,67 (Fig. 2A). Para o espaçamento de 130 cm, a variação no SFY relativo ficou entre 0,88 e 0,78 (Fig. 2A).

Ainda no tratamento irrigado, mas na CZ2, o espaçamento entre linhas de 90 cm foi o que apresentou maior produtividade quando comparado aos demais espaçamentos, sendo significativamente maior que o espaçamento entre linhas de 150, 170 e 180 cm ($p < 0,01$; Tabela 3). Com o aumento do espaçamento de 90 cm para 150, 170 e 180cm, a redução da produtividade foi de aproximadamente 8, 9 e 14%, respectivamente. O espaçamento entre linhas mais amplo apresentou maiores variações na produtividade (1 a 0,70), resultando em valores mais baixos da produtividade média, enquanto no espaçamento mais estreito (90 cm) a variação no SFY foi de 10% (Fig. 2B)

A produtividade média mostrou uma diferença de 18% entre os espaçamentos de 90 e 180 cm ($p < 0,01$), sendo o maior intervalo de diferença de espaçamento entre fileiras para CZ3 em condições de sequeiro (Tabela 3). O espaçamento entre filas de 90 cm não apresentou

variação na produtividade, ou seja, em todos os experimentos o SFY foi máximo para esse espaçamento no CZ3. No espaçamento entre linhas de 180 cm, os valores de SFY variaram entre 1,00 e 0,43 (Fig. 2C), mostrando que, para essas condições, a redução no SFY pode ser de até 57%.

O espaçamento entre linhas de 90 e 100 cm apresentou valores de produtividade superiores ao espaçamento entre linhas de 180 cm ($p < 0,01$; Tabela 3) na CZ4. A variação da produtividade no espaçamento de 180 cm foi de 36% (1 a 0,64), enquanto no espaçamento de 100 cm os todos valores foram 1 (Fig. 2D). A redução do SFY com o aumento do espaçamento pode ser de até 16% com base nos dados observados da diferença entre o maior e o menor intervalo de produtividade, que foi entre o espaçamento de 100 e 180 cm (Tabela 3).

Apesar das diferenças de produtividade observadas entre os espaçamentos de linha na CZ5, a ANOVA não mostrou diferença significativa entre os valores ($p > 0,05$; Tabela 3). No entanto, o espaçamento de 90 cm foi o que apresentou a maior produtividade média. O espaçamento de 140 e 160 apresentou os menores valores de SFY, respectivamente (Tabela 3).

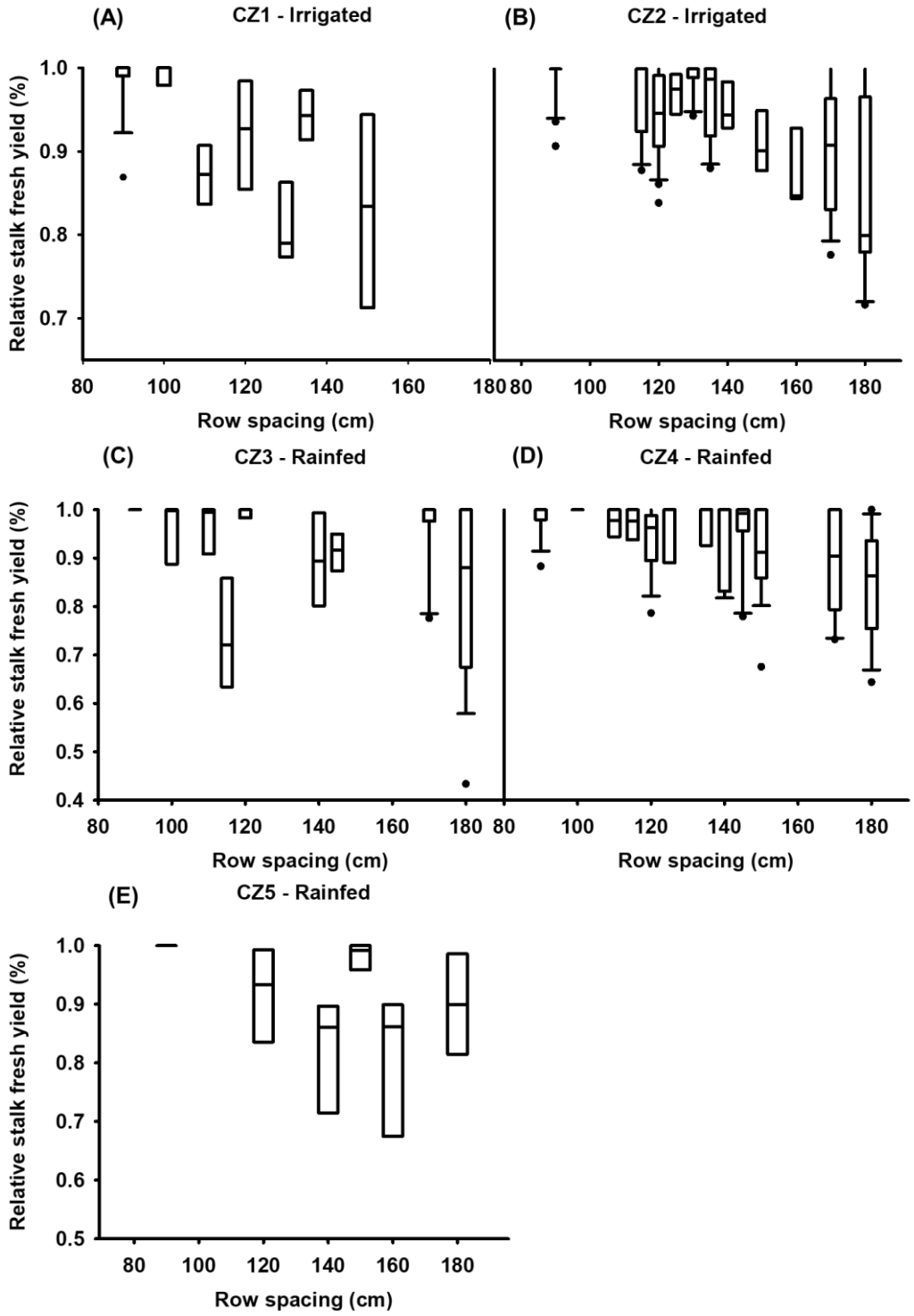

Figura 2. *Box-plots* para produtividade de cana-de-açúcar em zonas climáticas (classificação Köppen) para tratamentos irrigados e de sequeiro. As caixas representam um intervalo entre os percentis 25 e 75, com a linha horizontal mostrando a mediana. As barras indicam os percentis 95 e 5.

Tabela 3. Análise de variância para o efeito de zonas climáticas (CZ) e tratamentos sobre o rendimento de caules frescos (SFY). A comparação das médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) também é mostrada. Todos os termos foram estatisticamente significativos (teste F; $p < 0,01$), exceto em um caso (ns; $p = 0,09$).

Irrigado ou sequeiro	**CZ**	**Produtividade relativa (%) em função do espaçamento (cm)**														**P valor**
		90	**100**	**110**	**115**	**120**	**125**	**130**	**135**	**140**	**145**	**150**	**160**	**170**	**180**	
Irrigado	CZ1	0.98b	0.99ab	0.87ac	-	0.92abc	-	0.80c	0.94abc	-	-	0.82c	-	-	-	p < 0.01
Irrigado	CZ2	0.99a	-	-	0.96ab	0.94abc	0.96abc	0.99a	0.96abc	0.95abc	0.96abcd	0.90bcd	0.87bcd	0.89cd	0.84d	p < 0.01
Sequeiro	CZ3	1.00a	0.95abc	0.96ab	0.73c	0.99abc	-	-	-	0.89abc	0.91abc	-	-	0.96a	0.82b	p < 0.01
Sequeiro	CZ4	0.98a	1.00a	0.97abc	0.97abc	0.93abc	0.95abc	0.89abc	0.96abc	0.94abc	0.95ac	0.91abc	-	0.89abc	0.84b	p < 0.01
Sequeiro	CZ5	0.99	-	-	-	0.90	-	-	-	0.82	-	0.98	0.81	-	0.86	ns

De maneira geral, quando os dados foram analisados em conjunto (sem distinção entre tratamento e zonas climáticas), foi possível observar uma tendência a redução da produtividade da cana-de-açúcar à medida que os valores de espaçamento aumentaram, com uma redução de 1,3% a cada 10 cm (Fig. 3).

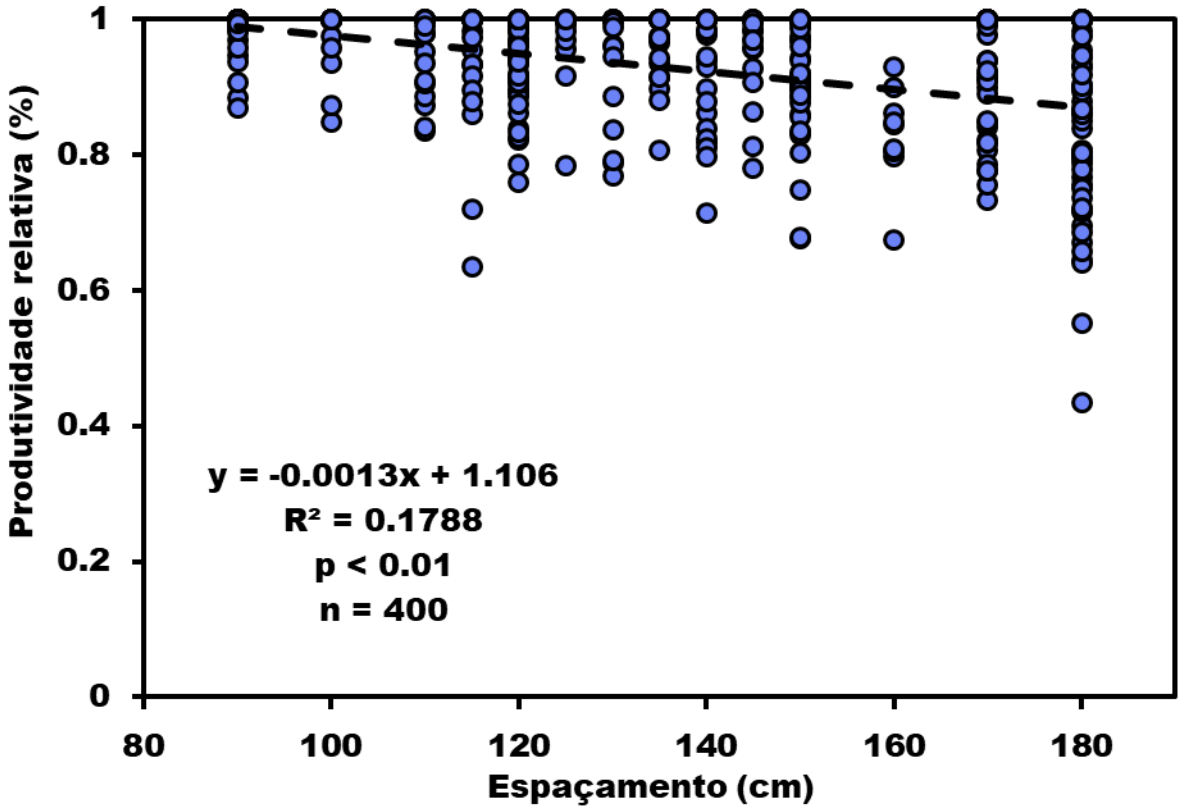

Figura 3. Relação entre rendimento da safra de cana (em porcentagem) e espaçamento entre fileiras realizado na operação de plantio. A linha tracejada representa a regressão linear ajustada. A normalização dos dados foi obtida a partir da razão entre o SFY máximo de cada experimento e o outro SFY avaliado no mesmo experimento.

3.4 Discussão

A análise dos dados de campos experimentais realizados em uma ampla gama de locais e clima revelou uma diferença estatística no rendimento de linhas estreitas e largas em 80% das análises. Em geral, o espaçamento entre linhas de 90 e 100 cm resultou em maior produtividade quando comparado aos espaçamentos mais amplos. A perda de rendimento no espaçamento maior pode ter ocorrido devido a uma menor área foliar (GALVANI et al., 1997); fechamento mais lento do dossel que leva a uma maior competição entre as culturas e as ervas daninhas (BARBIERI et al., 1987); menor área foliar, menor número de linhas de plantio por área (GARSIDE & BELL; 2009) e diminuição da população de plantas por hectare (MATHERNE, 1971; ROACH, 1976; KANWAR & SHARMA, 1974; IRVINE & BENDA, 1980a; BARBIERI et al., 1987; BASILE FILHO et al., 1993; ERNANDES, 2005; SMIT & SINGELS, 2006).

Na cultura do milho, como exemplo, a linha estreita, juntamente com a modificação na arquitetura das plantas, variando o ângulo de inserção da folha no caule, reduzindo sua altura, o comprimento da borla e diminuindo a número e tamanho de folhas (ARGENTA et al., 2001), permitiram uma interceptação mais eficiente da radiação fotossinteticamente ativa, aumentando o rendimento de grãos, quando os fatores de produção não eram limitantes (OTTMAN & WELCH, 1989).

Para a cana-de-açúcar, os trabalhos realizados até o momento sobre o espaçamento entre fileiras ideal foram inconclusivos, uma vez que os experimentos foram realizados isoladamente em diferentes locais do mundo, proporcionando diferentes ambientes de produção. No entanto, o resultado deste estudo mostrou que o espaçamento entre linhas de 90 ou 100 cm foi o que proporcionou os maiores rendimentos médios para a cultura. Entretanto, a redução do espaçamento entre fileiras deve ocorrer associada ao uso de variedades que respondem à redução de espaçamento, controle de tráfego, pisoteio de soqueiras, compactação do solo e longevidade da cana-de-açúcar que são fatores determinantes na tomada de decisão; finalmente, esse é um dos os principais fatores se correlacionaram com a estagnação da produção agrícola de cana no Brasil (BERNARDES e BELARDO, 2015).

A mecanização no sistema de colheita resultou na adoção de um maior espaçamento de plantio para ajustar o espaçamento entre fileiras com aquele que melhor se adapta à distância entre as rodas da ceifeira (BERNARDES & BELARDO, 2015). Devido ao tráfego intenso, o espaçamento ideal entre linhas para colheita mecanizada é de 150 cm. Esse maior espaçamento

entre fileiras permite que o processo de colheita mecanizada cause menos danos às plantas, reduzindo o declínio da produtividade com os estágios da colheita e, portanto, aumentando a longevidade da colheita. O espaçamento mais estreito, variando de 90 e 110 cm, na colheita mecanizada agrava ainda mais o atropelamento e a compactação do solo, pois a intensidade do tráfego aumenta significativamente, proporcional ao maior número de medidores lineares a serem colhidos. (BENEDINDE & CONE, 2009).

De fato, observa-se que o espaçamento do plantio está vinculado aos medidores das colheitadeiras e que, para que ocorram alterações consideráveis no espaçamento das culturas, seria necessário pensar em uma reformulação total do processo de colheita, passando para colheitadeiras com medidores acima de 6 me não apenas fazendo adaptações. O potencial de ganhos de produtividade, bem como a redução de custos associados a essas mudanças, são de tal magnitude que tornam os custos de desenvolvimento de novas máquinas, que são necessários, insignificantes (BRAUNBECK, 2018).

3.5 Conclusão

O espaçamento de 90 e 100 cm foram os que apresentaram as maiores produtividades para a cultura da cana-de-açúcar em todas as analises realizadas. A redução do espaçamento entre linhas poderia resultar em incrementos na produtividade da cultura de 1,3% a cada 10 cm. No entanto, a redução do espaçamento ainda não é possível devido ao uso intenso de maquinários para a colheita da cana-de-açúcar, que ocasionaria pisoteamento das soqueiras e perda significativa de produtividade.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. F.; EDREIRA, J. I. R.; MOURTZINIS, S.; CONLEY, S. P.; CIAMPITTI, I. A.; DUNPHY, J. E.; GASKA, J. M.; GLEWEN, K.; HOLSHOUSER, D. L.; KANDEL, H. J.; KYVERYGA, P.; LEE, C. D.; LICHT, M. A.; LINDSEY, L. E.; MCCLURE, M. A.; NAEVE, S.; NAFZIGER, E. D.; ORLOWSKI, J. M.; ROSS, J.; STATON, M. J.; THOMPSON, L.; SPECHT, J. E.; GRASSINI, P. Assessing the influence of row spacing on soybean yield using experimental and producer survey data. **Field crops research**, v. 230, p. 98-106, 2019.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. da; SANGOI, L. Arranjo de plantas em milho: análise do estado-da-arte. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 6, p. 1075-1084, nov./dez. 2001.

ARRUDA, H. C. Contribuição para o estudo da técnica cultural da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Piracicaba, 1961. 57p. (Mestrado – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”).

BARBIERI, V.; MANIERO, M. A.; PEREIRA, A. R. Espaçamento e características agroindustriais da cana-de-açúcar. In: Congresso Nacional da Stab, Olinda: **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos,** p.23-27, 1987.

BASILE FILHO, A.; CÂMARA, G.S.M.; CÉSAR, M.A. A; PIEDADE, S.M.S.; MIRANDA, R.E. Produção e qualidade tecnológica de três variedades de cana-de-açúcar, conduzidas sob espaçamento reduzido e tradicional de plantio em condições de cana-de-ano. IN: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 5; Águas de São Pedro, 1993. **Anais**... Águas de São Pedro, p.15-19, 1993.

BATTAGLIA, M.; LEE, C.; THOMASON, W.; MULLEKOM, J. V. Effects of Corn Row Width and Defoliation Timing and Intensity on Canopy Light Interception. **Crop Science,**vol. 59 No. 4, p. 1718-1731, 2019.

BENEDINI, M. S.; CONDE, A. C. Espaçamento ideal de plantio para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar. **Revista Coplacana**, 2008.p. 26-28.

BERNARDES, M.S.; BELARDO, G.C. Espaçamento de plantio: espaçamentos para a cultura da cana-de-açúcar. In: BELARDO, G.C.; CASSIA, M.T.; SILVA, R.P. (Eds.). Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar. Jaboticabal: SBEA, 2015. p.243-258.

BULL, T. A. Row Spacing and Potential Productivity in Sugarcane 1. **Agronomy Journal**, v. 67, n. 3, p. 421-423, 1975.

CARCIOCHI, W. D.; SCHWALBERT, R.; ANDRADR, F. H.; CORASSA, G. M.; CARTER, P.; GASPAR, A. P.; SCHMIDT, J.; CIAMPITTI, I. G. Soybean Seed Yield Response to Plant Density by Yield Environment in North America. **Agronomy Journal**, 2019.

DILLEWIJN, C. van. **Botany of sugarcane.** 1. ed. [s.l.] Waltham: Chronica Botanica, 1952.

EL-FATTAH, G. A. S.; EL-KAREEM, G.; ABDALLA, F. H. Cane productivity asaffected by inter-row spacing and cane cultivars. **Proc. 19th Cong**. *ISSCT*, n. 1, p. 1-8, 1986.

ERNANDES, M. L. Comportamento de variedades de cana-de-açúcar (Saccharum spp.) cultivadas em espaçamentos simples e duplos. 2005. 56p**. Dissertação (Mestrado em Agronomia)** - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2005.

EVANS, H. Some preliminary results from field trials designed to test the value of various cultural practices under British Guiana conditions. **Proceedings 1954 Mtg B.W.I**. Sugar Tech. p.87-95, 1954.

FAWCETT, J.; LICHT, M.; SIEVERS, J.; ROGERS, J. On-farm corn row spacing trials. 2015.

FREEMAN, K. C. Influence of Row Spacings on Yield and Quality of Sugarcane in Georgia. **Agronomy Journal**, v. *60*, n. 4, p. 424-425, 1968.

FU, H. C.; SOO, T. P.; HSIEH, Y. H.; A study on plating time and spacing of summer-planted sugarcane. Rep. Taiwan Sugar Exp. Sta., v. 38, p. 1-12. 1965.

GALVANI, E.; BARBIERI, V.; PEREIRA, A. B.; VILLA NOVA, N. A. Efeitos de diferentes espaçamentos entre sulcos na produtividade agrícola da cana-de-açúcar (Saccharum spp.). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.54, n.1/2, p.62-68, 1997.

GARSIDE, A. L.; BELL, M. J. Row spacing and planting density effects on the growth and yield of sugarcane. 1. Responses in fumigated and non-fumigated soil. **Crop and Pasture Science**, Oxford, v.60, n.6, p.532-543, 2009.

GLOVER, J. The behaviour of the root-system of sugarcane at and after harvest**. Proceedings of The South African Sugar Teclznologists' Association.** v. 42, p. 133– 135, 1968.

HEBERT, L. P., MATHERNE, R. J., & DAVIDSON, L. G. Row-spacing experiments with sugarcane in Louisiana. **Proceedings. 12th Congr. int. Soc. Sugar Cane Technol.,** Puerto Rico, p.96-102, 1967.

IRVINE, J.E.; BENDA, G.T.A. Sugar cane spacing II. Effects of spacing on the plant. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 17., Manila, 1980. **Proceedings.** Manila: ISSCT, 1980. p.357-367.

IRVINE, J.E.; BENDA, G.T.A.; RICHARD, C.A. Sugar cane spacing I. Historical and theoretical aspects. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 17., Manila, 1980a. **Proceedings.** Manila: ISSCT, 1980a. p.350-356

IRVINE, J.E.; RICHARD, C.A.; GARRISON, D.D.; JACKSON, W.R. Sugar cane spacing III. Development of production techniques fornarrow rows. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 17., Manila, 1980b. **Proceedings.** Manila: ISSCT, 1980b. p.368-376.

KANWAR, R. S.; SHARMA, K. K. Effect of inter row spacing on tiller mortality, stalk population and yield of sugarcane. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 15. Durban, 1974. **Proceedings...** Durban: ISSCT, p. 151-755, 1974.

KNOWLES, W.H.C. e CAMERON, C. (1950). “Field experiments with sugarcane.” Sugar Bulletin British Guiana, Dept. Agric. 18:1-37. Tirado da fonte IAA – Planalsucar – Barbieri, V. et. Alii, 1985 e Revista STAB. p.29-32. Set-out/1988.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 15, n.2, p. 259-263. 2006.

MATHERNE, R.J. Influence of interrow spacing and planting rate os stalk population and cane yield in Louisiana. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 14., New Orleans. **Proceedings.** New Orleans: ISSCT,. p.640-645, 1971

MATHUR, B. K.; BHADOURIA, V.S.; SINGH, A. Study on the effects of diferente doses of nitrogen and systems of planting on plantcane and its subsequentes effect on ratoon crop. **Indian Sugar**, p. 611-619, 1968.

MURARO, G. B.; JUNIOR, P. R.; SCHOGOR, A. L. B. Produção de biomassa de cana-deaçúcar em dois espaçamentos e duas frequências de cortes. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.35, n.1, p.131-136, 2011.

OTTMAN, M.J., WELCH, L.F. Planting patterns and radiation interception, plant nutrient concentration, and yield in corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.81, n.2, p.167-174, 1989.

PARANHOS, S.B**. Espaçamentos e densidades de plantio em cana-de-açúcar**. Piracicaba, 1972. 109p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

PATIL, S. V.; TIPPANNAVAR, M. B.; KULKARNI, M. V. Effect of spacing-cum-nitrogen application on the yield of sugarcane in malnad tract. **Mysore Agric. Jour.,** v. 33, p. 66-70, 1958.

PEARSON, C. H. O. Space plating of sugarcane in relation to soil misture. p. 99 a 101, 1958.

PEREIRA JUNIOR, A.C.G. Efeitos da irrigação e do espaçamento no desenvolvimento e na produção de três variedades de cana-de-açúcar (**Saccharum** spp.) Piracicaba, 1984. 142p. Dissertação (M.S.) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

ROACH, B.T**. Observations on the effect of row spacing on sugar cane yield**. In: FORTYTHIRD CONFERENCE. CSR Limited, Macknade, 1976.

ROHRIG, P. E.; ELLIS, T. O.; ARCENEUX, G. Results of experiments on distance of planting sugar cane under dry land conditions at Central Romana. **Proceedings 1960 Mtg BWI Sugar Tech**, *1960.*

ROUILLARD, G. Climate and cultivation. 2. Results on spacing experiments. **Annual Report**. **Mauritius Sugar Industry Research Institute.** p.102-104, 1969.

SHIH, S.F.; GASCHO, G.J. Relationships among stalk length, leaf area, and dry biomass of sugarcane. **Agronomy Journal**, v.72, n.2, p.309-313, 1980a.

SILVA, F. C.; ANTONIOLLI, A.; BORGES, L. A.; ZOTELLI, H. B.; DE FREITAS, P. L.; PIRES, R. F.; DONAGEMMA, G. K.; DE CARVALHO, J. R. P.; CUADRA, S. V. Avaliação da produtividade agrícola cana-de-açúcar sob diferentes espaçamentos e arranjos entre plantas para produção de açúcar. In: **Embrapa Informática Agropecuária-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: MAGNONI JÚNIOR, L.; STEVENS, D.; SILVA, WTL da; VALE, JMF do; PURINI, SR de M.; MAGNONI, M. da GM; SEBASTIÃO, E.; BRANCO JÚNIOR, G.; ADORNO FILHO, EF; FIGUEIREDO, W. dos S.; SEBASTIÃO, I.(Org.). JC na Escola Ciência, Tecnologia e Sociedade: mobilizar o conhecimento para alimentar o Brasil. 2. ed. São Paulo: Centro Paula Souza, 2017., 2017.

SMIT, M. A.; SINGELS, A. The effect of row spacing on inter-row competition in sugarcane. In: South African Sugar Technologists Association, 80, Durban, 2006. **Proceedings...** Durban: SASTA, p. 139-142, 2006.

TANG, K.H.. “A comparison study of different planting systems in connection with the mechanized cultivation of sugarcane”. Resp. Taiwan Sugar Exp. Stat., 14:36-46. 1956.

THOMPSON, G.D.; TOIT, J.L. du. The effects of row spacing on sugar cane crops in Natal. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 12., San Juan, 1965. **Proceedings**. San Juan: ISSCT, 1965. p.103-112.

TSE, C.C.; CHU, J.M. Study of the planting spacing of sugar cane new variety F.146. **Taiwan Sugar Experiment Station,** n.3, p.71-81, 1967.

VEIGA, F. M. Ensaio de espaçamento de cana-de-açúcar. Boletim do Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas, Rio de Janeiro, (7): 1-24, 1950.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dado o aumento da demanda por etanol, principalmente proveniente da cana-de-açúcar, e a necessidade de uma agricultura sustentável, o manejo mais eficiente da cultura é uma medida viável para aumentar incrementar a produtividade dos canaviais. O trabalhou mostrou que a correção dos principais fatores redutores de produtividade (adubação, compactação e população de plantas) aumentaria a produtividade em até 27 Mg ha^{-1}. Ademais, o adensamento do plantio da cultura da cana-de-açúcar, de 150 para 90 cm, também resultaria ganhos na produtividade. De maneira geral, o incremento médio seria de 1,3% a cada 10 cm de adensamento no plantio da cultura. No entanto, a redução do espaçamento em áreas de produção de cana-de-açúcar acarretaria maiores danos a cultura, devido o pisoteio de soqueira pelo pisoteio das máquinas e pela compactação.

ANEXO

Tabela 13. Produtividades de cana-de-açúcar (Mg ha^{-1}) em função do espaçamento de plantio (cm) obtidos em experimentos conduzidos em diferentes locais e clima.

Referências	País	Cidade	Clima			Estágio (corte)	Produtividade (Mg ha^{-1})												
							Espaçamento (cm)												
			Temperatura (ºC)	Precipitação (mm)	Köppen		90	100	110	120	125	130	135	140	145	150	160	170	180
Galvani *et al.*, 1997	Brasil	Pirassununga	20.6	1238	Cwa	Cana-planta			145	152		146				138		137	
Galvani *et al.*, 1997	Brasil	Pradópolis	21.9	1371	Aw	Cana-planta	101			105						94			92
Galvani *et al.*, 1997	Brasil	Rubiace	22.1	1179	Aw	Cana-planta	125			132						128			118
Galvani *et al.*, 1997	Brasil	Cristalina	22.9	1524	Aw	Cana-planta	75			70						68			64
Galvani *et al.*, 1997	Brasil	Araras	20.3	1312	Cwa	Cana-planta			127							114		102	
Gamal *et a*l., 1981	Egito	Kom Ombo	26.8	1.00	Bwh	Cana-planta	133		120			118				111			
Gamal *et al.*, 1981	Egito	Kom Ombo	26.8	1.00	Bwh	Cana-planta	135		122			106				101			
Gamal *et al.*, 1981	Egito	Kom Ombo	26.8	1.00	Bwh	Cana-planta	92		78			72				93			
Gamal *et al.*, 1981	Egito	Kom Ombo	26.8	1.00	Bwh	Cana-planta	115		97			91				78			
Silva *et al.*, 2017*	Brasil	Guaiçara	21.8	1241	Cwa	Cana-planta										102			97
Garside e Bell, 2009*	Austrália	Gordonvale	29	1994	Am	Cana-planta										117			118
Garside e Bell, 2009*	Austrália	Gordonvale	29	1994	Am	Cana-planta										124			104
Garside e Bell, 2009*	Austrália	Gordonvale	29	1994	Am	Cana-planta										123			111
Garside e Bell, 2009*	Austrália	Gordonvale	29	1994	Am	Cana-planta										131			139
Garside e Bell, 2009*	Austrália	Farnsfield	25.4	1019	Cfa	Cana-planta										115			107

Referências	País	Cidade	Clima			Estágio (corte)	Produtividade (Mg ha^{-1})												
							Espaçamento (cm)												
			Temperatura (ºC)	Precipitação (mm)	Köppen		90	100	110	120	125	130	135	140	145	150	160	170	180
Garside e Bell, 2009*	Austrália	Farnsfield	26.4	1019	Cfa	Cana-planta										114			125
Garside e Bell, 2009*	Austrália	Farnsfield	27.4	1019	Cfa	Cana-planta										128			119
Garside e Bell, 2009*	Austrália	Farnsfield	28.4	1019	Cfa	Cana-planta										115			113
Hebert *et al*., 1967	Estados Unidos	Luisiana	20.8	1586	Dfa	Cana-planta				81									69
Hebert *et al*., 1967	Estados Unidos	Luisiana	20.8	1586	Dfa	Cana-planta				92									83
Hebert *et al*., 1967	Estados Unidos	Luisiana	20.8	1586	Dfa	Cana-planta				81									82
Hebert *et al*., 1967	Estados Unidos	Luisiana	20.8	1586	Dfa	Cana-planta			85						76				74
Hebert *et al*., 1967	Estados Unidos	Luisiana	20.8	1586	Dfa	Cana-planta			91						85				86
Hebert *et al*., 1967	Estados Unidos	Luisiana	20.8	1586	Dfa	Cana-planta													103
Hebert *et al*., 1967	Estados Unidos	Luisiana	20.8	1586	Dfa	Cana-planta													98
Hebert *et al*., 1967	Estados Unidos	Luisiana	20.8	1586	Dfa	Cana-planta													91
Hebert *et al*., 1967	Estados Unidos	Luisiana	20.8	1586	Dfa	Cana-planta													80
Matherne, 1971	Estados Unidos	Houma	20.8	1586	Dfa	Cana-planta	108		92										67
Matherne, 1971	Estados Unidos	Houma	20.8	1586	Dfa	Cana-planta	87		78										56
Matherne, 1971	Estados Unidos	Houma	20.8	1586	Dfa	Cana-planta	108												74
Kanwar e Sharma, 1971	India	Jullundur	23.9	769	Cwa	Cana-planta	87			86						79			70
Kanwar e Sharma, 1971	India	Jullundur	23.9	769	Cwa	Cana-planta	79			78						70			63
Tang, 1956	China	Taiwan	22.80	2067	Cfa	Cana-planta					141		147						

Referências	País	Cidade	Clima			Estágio (corte)	Produtividade (Mg ha^{-1})												
							Espaçamento (cm)												
			Temperatura (ºC)	Precipitação (mm)	Köppen		90	100	110	120	125	130	135	140	145	150	160	170	180
Tang, 1956	China	Taiwan	22.80	2067	Cfa	Cana-planta					126		130						
Tang, 1956	China	Touliu	22.90	1920	Cfa	Cana-planta					142		143						
Tang, 1956	China	Touliu	22.90	1920	Cfa	Cana-planta					128		130						
Tang, 1956	China	Hu-Wei	22.80	2067	Cfa	Cana-planta					119		129		125				
Tang, 1956	China	Talin	6.80	429	Dfb	Cana-planta					88		86		85				
Thompson e Toit, 1965	Africa do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	Cana-planta	171						165						
Thompson e Toit, 1965	Africa do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	Cana-planta	166						161						
Thompson e Toit, 1965	Africa do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	Cana-planta	168						154						
Thompson e Toit, 1965	Africa do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	Cana-planta	138						130						
Pearson, 1958	Africa do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	Cana-planta	136				154					149			
Pearson, 1958	Africa do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	Cana-planta	109									111			
Pearson, 1958	Africa do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	Cana-planta	99									88			
Arruda, 1961	Brasil	Piracicaba	20.8	1255	Cfa	Cana-planta		103		92				87			82		79
Arruda, 1961	Brasil	Piracicaba	20.8	1255	Cfa	Cana-planta		124		111				101			100		99
Arruda, 1961	Brasil	Piracicaba	20.8	1255	Cfa	Cana-planta		149		133				123			120		113
Boyce, 1968	Africa do Sul	Pongola	21.7	678	Bsh	Cana-planta	150	146		137				140				129	
Boyce, 1968	África do Sul	Pongola	21.7	678	Bsh	Cana-planta	118	130		136				135				132	
Freeman, 1968	Estados Unidos	Georgia	15.8	1303	Cfa	Cana-planta			60	47			48			50		44	

Referências	País	Cidade	Clima			Estágio (corte)	Produtividade (Mg ha^{-1})												
							Espaçamento (cm)												
			Temperatura (ºC)	Precipitação (mm)	Köppen		90	100	110	120	125	130	135	140	145	150	160	170	180
Freeman, 1968	Estados Unidos	Georgia	15.8	1303	Cfa	Cana-planta			56	58			60			51		45	
Freeman, 1968	Estados Unidos	Georgia	15.8	1303	Cfa	Cana-planta			108	105			110			94		90	
Veigas, 1950	Brasil	Campos	15.8	1303	Cfa	Cana-planta	92			75						62			59
Veigas, 1950	Brasil	Campos	15.8	1303	Cfa	Cana-planta	109			99						100			81
Glover, 1968	África do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	Cana-planta					165								
Glover, 1968	África do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	Cana-planta					138								
Pereira Jr, 1984	Brasil	Rio de Janeiro	23.2	1278	Am	Cana-planta	108			96				102			91		93
Pereira Jr, 1984	Brasil	Rio de Janeiro	23.2	1278	Am	Cana-planta	103			100				96			87		89
Pereira Jr, 1984	Brasil	Rio de Janeiro	23.2	1278	Am	Cana-planta	91			86				80			85		73
Pereira Jr, 1984	Brasil	Rio de Janeiro	23.2	1278	Am	Cana-planta	76			71				69			69		69
Pereira Jr, 1984	Brasil	Rio de Janeiro	23.2	1278	Am	Cana-planta	70			64				60			61		57
Pereira Jr, 1984	Brasil	Rio de Janeiro	23.2	1278	Am	Cana-planta	80			61				57			54		44
Patil, 1958	India	Mysore	24.5	805.2	Aw	Cana-planta	70			59									
Patil, 1958	India	Mysore	24.5	805.2	Aw	Cana-planta	79			74									
Murato et al., 2011*	Brasil	Santo Antonio da Platina	20.8	1389	Cfa	Cana-planta	226					189							
Irvine e Benda, 1980	Estados Unidos	Luisiana	20.3	1546	Cfa	Cana-planta													
Irvine e Benda, 1980	Estados Unidos	Luisiana	20.3	1546	Cfa	Cana-planta													80
Irvine e Benda, 1980	Estados Unidos	Luisiana	20.3	1546	Cfa	Cana-planta	146												115

Referências	País	Cidade	Clima			Estágio (corte)	Produtividade (Mg ha^{-1})												
							Espaçamento (cm)												
			Temperatura (ºC)	Precipitação (mm)	Köppen		90	100	110	120	125	130	135	140	145	150	160	170	180
Irvine e Benda 1980	Estados Unidos	Luisiana	20.3	1546	Cfa	Cana-planta													59
Irvine e Benda, 1980	Estados Unidos	Luisiana	20.3	1546	Cfa	Cana-planta													72
Irvine e Benda, 1980	Estados Unidos	Luisiana	20.3	1546	Cfa	Cana-planta													65
Irvine e Benda, 1980	Estados Unidos	Luisiana	20.3	1546	Cfa	Cana-planta													
Rohrig et al., 1960	Porto Rico		22.8	1280	Aw	Cana-planta	100			98						94			
Evans, 1954	British Guiana	Port Mourant	26.5	1703	Am	Cana-planta													116
Evans, 1954	British Guiana	Port Mourant	26.5	1703	Am	Cana-planta													126
Mathur *et al*., 1968	India	Gorakphur	25.5	1227	Cwa	Cana-planta	65												
Mathur *et al*., 1968	India	Gorakphur	25.5	1227	Cwa	Cana-planta	68												
Mathur *et al*., 1968	India	Gorakphur	25.5	1227	Cwa	Cana-planta	70												
Fu *et al*., 1965	China	Taiwan	22.8	2067	Cfa	Cana-planta		87		83									
Fu *et al*., 1965	China	Taiwan	22.8	2067	Cfa	Cana-planta		59		57									
Tse e Chu, 1967	China	Taiwan	22.8	2067	Cfa	Cana-planta					147		147						
Knowles, 1950	Estados Unidos	Sophia	10.3	1078	Cfb	Cana-planta	128						129						
Rouilard, 1969	Republica da Mauricia	Port Louis	23.8	1616	Am	Cana-planta	85			86						84			82
Gamal *et al.*,1981	Egito	Kom Ombo	26.8	1.00	Bwh	1º soca	148		136			122				110			
Gamal *et al.*,1981	Egito	Kom Ombo	26.8	1.00	Bwh	1º soca	153		123			114				104			
Gamal *et al.*,1981	Egito	Kom Ombo	26.8	1.00	Bwh	1º soca	111		92			86				73			

Referências	País	Cidade	Clima			Estágio (corte)	Produtividade (Mg ha^{-1})												
							Espaçamento (cm)												
			Temperatura (ºC)	Precipitação (mm)	Köppen		90	100	110	120	125	130	135	140	145	150	160	170	180
Gamal *et al.*,1981	Egito	Kom Ombo	26.8	1.00	Bwh	1º soca	127		121			112				94			
Silvia *et al.*, 2017	Brasil	Guaiçara	21.8	1241	Cwa	1º soca										64			83
Garside e Bell, 2009*	Australia	Farnsfield	25.4	1902	Cfa	1º soca										109			114
Garside e Bell, 2009*	Australia	Farnsfield	26.4	1902	Cfa	1º soca										111			102
Garside e Bell, 2009*	Australia	Farnsfield	27.4	1902	Cfa	1º soca										117			144
Garside e Bell, 2009*	Australia	Farnsfield	28.4	1902	Cfa	1º soca										122			111
Hebert *et al.*, 1957	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	1º soca				44									69
Hebert *et al.*, 1957	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	1º soca				65									75
Hebert *et al.*, 1957	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	1º soca				82									59
Hebert *et al.*, 1957	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	1º soca			64						62				70
Hebert *et al.*, 1957	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	1º soca			62						61				72
Hebert *et al.*, 1967	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	1º soca													83
Hebert *et al.*, 1967	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	1º soca													83
Hebert *et al.*, 1967	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	1º soca													73
Hebert *et al.*, 1967	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	1º soca													63
Matherne, 1971	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	1º soca	103		110										72
Matherne, 1971	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	1º soca	108		96										76
Matherne, 1971	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	1º soca	94												83
Kanwar e Sharma, 1971	India	Jullundur	23.9	769	Cwa	1º soca	60			61						66			55
Tang, 1956	China	Taiwan	22.80	2067	Cfa	1º soca					93		89						
Tang, 1956	China	Taiwan	22.80	2067	Cfa	1º soca					92		94						

Referências	País	Cidade	Clima			Estágio (corte)	Produtividade (Mg ha^{-1})												
							Espaçamento (cm)												
			Temperatura (ºC)	Precipitação (mm)	Köppen		90	100	110	120	125	130	135	140	145	150	160	170	180
Tang, 1956	China	Touliu	22.90	1920	Cfa	1º soca					112		113						
Tang, 1956	China	Touliu	22.90	1920	Cfa	1º soca					119		126						
Tang, 1956	China	Hu-Wei	22.80	2067	Cfa	1º soca					80		81		80				
Tang, 1956	China	Talin	6.80	429	Dfb	1º soca					80		79		78				
Thompson e Toit, 1961	Africa do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	1º soca	184						179						
Pearson, 1958	Africa do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	1º soca	100				105					127			
Pearson, 1958	Africa do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	1º soca	135									143			
Pearson, 1958	Africa do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	1º soca	117									107			
Arruda, 1961	Brasil	Piracicaba	20.8	1255	Cfa	1º soca		64		63				59			58		59
Arruda, 1961	Brasil	Piracicaba	20.8	1255	Cfa	1º soca		50		50				51			53		55
Arruda, 1961	Brasil	Piracicaba	20.8	1255	Cfa	1º soca		69		62				62			61		65
Paranhos, 1972	Brasil	Piracicaba	20.8	1255	Cfa	1º soca		111				87					89		
Paranhos, 1971	Porto Rico	Gurabo	25.2	1869	Af	1º soca	152									121			
Paranhos, 1971	Porto Rico	Mercedita	22.6	2050	Af	1º soca	204									173			
Paranhos, 1971	Porto Rico	Fortuna	26.9	1113	Aw	1º soca	169									156			
Patil, 1958	India	Mysore	24.5	805.2	Aw	1º soca	51			47									
Patil, 1958	India	Mysore	24.5	805.2	Aw	1º soca	46			43									
Murato *et al*., 2011	Brasil	Santo Antonio da Platina	20.8	1389	Cfa	1º soca	183					142							
Rohrig *et al*., 1960	Porto Rico		22.8	1280	Aw	1º soca	74			74						73			
Evans, 1954	British Guiana	Port Mourant	26.5	1703	Am	1º soca	22												116

Referências	País	Cidade	Clima			Estágio (corte)	Produtividade (Mg ha^{-1})												
							Espaçamento (cm)												
			Temperatura (ºC)	Precipitação (mm)	Köppen		90	100	110	120	125	130	135	140	145	150	160	170	180
Evans, 1954	British Guiana	Port Mourant	26.5	1703	Am	1º soca	40												126
Evans, 1954	British Guiana	Port Mourant	26.5	1703	Am	1º soca	50												126
Evans, 1954	British Guiana	Port Mourant	26.5	1703	Am	1º soca	23												116
Evans, 1954	British Guiana	Port Mourant	26.5	1703	Am	1º soca	38												126
Evans, 1954	British Guiana	Port Mourant	26.5	1703	Am	1º soca	43												126
Mathur *et al*., 1968	India	Gorakphur	25.5	1227	Cwa	1º soca	56												
Mathur *et al*., 1968	India	Gorakphur	25.5	1227	Cwa	1º soca	57												
Mathur *et al*., 1968	India	Gorakphur	25.5	1227	Cwa	1º soca	57												
Fu *et al*., 1965	China	Taiwan	22.8	2067	Cfa	1º soca		86		82									
Fu *et al*., 1965	China	Taiwan	22.8	2067	Cfa	1º soca		59		55									
Tse e Chu, 1967	China	Taiwan	22.8	2067	Cfa	1º soca					101		103						
Gamal *et al*.,1981	Egito	Kom Ombo	26.8	1.00	Bwh	2º soca	146		137			125				117			
Gamal *et al*.,1981	Egito	Kom Ombo	26.8	1.00	Bwh	2º soca	118		111			109				95			
Gamal *et al*.,1981	Egito	Kom Ombo	26.8	1.00	Bwh	2º soca	107		99			89				79			
Gamal *et al*.,1981	Egito	Kom Ombo	26.8	1.00	Bwh	2º soca	106		95			89				75			
Silvia *et al*., 2017	Brasil	Guaiçara	21.8	1241	Cwa	2º soca										94			82
Hebert *et al*., 1957	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	2º soca				38									59
Hebert et al., 1957	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	2º soca				43									59
Hebert *et al*., 1957	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	2º soca				49									65
Hebert *et al*., 1967	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	2º soca													59

Referências	País	Cidade	Clima			Estágio (corte)	Produtividade (Mg ha^{-1})												
							Espaçamento (cm)												
			Temperatura (ºC)	Precipitação (mm)	Köppen		90	100	110	120	125	130	135	140	145	150	160	170	180
Hebert *et al*., 1967	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	2º soca													55
Hebert *et al*., 1967	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	2º soca													51
Hebert *et al*., 1967	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	2º soca													42
Matherne, 1971	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	2º soca	99		94										85
Matherne, 1971	Estados Unidos	Lousiana	20.8	1586	Dfa	2º soca	99		92										83
Tang, 1956	China	Taiwan	22.80	2067	Cfa	2º soca					82		89						
Tang, 1956	China	Taiwan	22.80	2067	Cfa	2º soca					108		102						
Tang, 1956	China	Touliu	22.90	1920	Cfa	2º soca					67		71						
Tang, 1956	China	Touliu	22.90	1920	Cfa	2º soca					83		91						
Tang, 1956	China	Hu-Wei	22.80	2067	Cfa	2º soca					69		72		72				
Tang, 1956	China	Talin	6.80	429	Dfb	2º soca					74		73		70				
Pearson, 1958	Africa do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	2º soca	122				132					130			
Pearson, 1958	Africa do Sul	Monte Edgecomb	20.4	950	Aw	2º soca					112					114			
Arruda, 1961	Brasil	Piracicaba	20.8	1255	Cfa	2º soca		50		54				47			44		50
Arruda, 1961	Brasil	Piracicaba	20.8	1255	Cfa	2º soca		45		41				47			46		46
Arruda, 1961	Brasil	Piracicaba	20.8	1255	Cfa	2º soca		55		54				53			51		55
Patil, 1958	India	Mysore	24.5	805	Aw	2º soca	110			89									
Patil, 1958	India	Mysore	24.5	805	Aw	2º soca	134			111									
Rohrig *et al*., 1960	Porto Rico		22.8	1280	Aw	2º soca	49			49						49			