

PERDAS DE CANA-DE-AÇÚCAR NA COLHEITA MECANIZADA: UMA PROPOSTA DE ANÁLISE MULTIVARIÁVEL

SUGARCANE LOSSES IN MECHANIZED HARVEST: A MULTIVARIABLE ANALYSIS PROPOSAL

Carlos Roberto Souza Carmo¹

Michel dos Santos Moura²

Kléber Pereira Lanças³

Aldir Carpes Marques Filho⁴

RESUMO

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar como as variáveis relacionadas às variedades de cultivares, aos modelos de colhedoras e às respectivas velocidades de locomoção se comportam enquanto um conjunto de possíveis determinantes dos percentuais de perdas totais de cana-de-açúcar ocorridas no campo, decorrentes da respectiva colheita mecanizada. Para tanto, foi utilizada a análise de regressão linear múltipla pelo método stepwise como metodologia analítico-explicativa do comportamento das perdas em questão. A partir de quatro variáveis explicativas, o modelo proposto nesta investigação conseguiu explicar 93,4% das observações referentes aos percentuais de perdas analisadas, mostrando-se capaz de realizar inferências mais amplas que aquelas obtidas a partir de análises de caráter bivariado comumente utilizadas nos estudos dessa natureza.

Palavras-chave: Métodos quantitativos aplicados. Mecanização. Agricultura.

ABSTRACT

This research aimed to evaluate how the variables related to the varieties of cultivars, the models of harvesters and the respective locomotion speeds behave as a set of possible determinants of the percentages of total sugarcane losses that occurred in the field, resulting

¹ Mestre em Ciências Contábeis pela PUC-SP e Doutor em Agronomia pela UNESP (campus Botucatu). Professor da Faculdade de Ciências Contábeis da Univ. Federal de Uberlândia (FACIC-UFU). carlosjj2004@hotmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-3806-9228>

² Mestre em Agronomia pela UNESP (campus Botucatu). Doutorando do Depto. Engenharia Rural - NEMPA - UNESP (campus Botucatu). michelsmoura@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-5325-6048>

³ Doutor em Agronomia pela UNESP (campus Botucatu). Professor do Depto. Engenharia Rural - NEMPA - UNESP (campus Botucatu). kp.lancas@unesp.br. <https://orcid.org/0000-0003-3890-1165>

⁴ Doutorando em Agronomia pela UNESP (campus Botucatu), Depto. Engenharia Rural - NEMPA - UNESP (campus Botucatu). aldir.marques@unesp.br. <https://orcid.org/0000-0002-9105-0040>
GETEC, v.10, n.31, p.136-151/2021

from the respective mechanized harvest. For that, multiple linear regression analysis was used by the stepwise method as an analytical-explanatory methodology for the behavior of the losses in question. From four explanatory variables, the model proposed in this investigation was able to explain 93.4% of the observations regarding the percentages of losses analyzed, proving capable of making broader inferences than those obtained from bivariate analyzes commonly used in studies of this nature.

Keywords: Quantitative methods applied.. Mechanization. Agriculture.

1 Introdução

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018), a cultura da cana-de-açúcar ocupou cerca de 13% de toda a área colhida no Brasil no ano de 2018 (10.042.199ha/77.821.132ha x 100=12,8196%). Com isso, o setor sucroenergético brasileiro ocupa a terceira maior área cultivada do país (LORIZOLA; CAPITANI, 2018).

Diante da expressividade econômica e da dimensão territorial ocupada por essa cultura, é de se esperar que a complexidade do processo produtivo da cana-de-açúcar traga consigo uma série de desafios. Dentre tais desafios, destacam-se os problemas inerentes à colheita, que pode ser considerada um dos processos mais importantes do ciclo produtivo da cana-de-açúcar, uma vez que dela dependem a qualidade e a disponibilidade da matéria-prima entregue à indústria sucroenergética (MANHÃES *et al.*, 2014).

Nesse sentido, a introdução da colheita mecanizada da cana-de-açúcar pode ser visto como um dos mais importantes avanços tecnológico-produtivos desse setor, contudo, junto com esse avanço também surgiram novos desafios tanto em termos técnicos quanto em termos produtivos (SANTOS *et al.*, 2019).

Se por um lado a mecanização do processo de colheita contribuiu para a reestruturação e o crescimento das lavouras de cana-de-açúcar brasileiras, por outro, ela trouxe consigo a necessidade do correto manejo do equipamento demandado para tanto.

Assim, para que a introdução das máquinas no processo de colheita possa proporcionar o retorno esperado pelo respectivo investimento, a gestão dos fatores envolvidos nesse processo pressupõe o correto manejo dos recursos demandados, de forma a alcançar reduções nos custos operacionais (TORQUATO; JESUS; ZORZO, 2015). Sendo que, tais reduções de custos podem ocorrer tanto pelas economias geradas no processo de colheita em si, quanto pela redução dos níveis de desperdícios e perdas incorridos nas atividades inerentes à colheita da cana-de-açúcar

Dessa forma, a busca por melhores níveis de qualidade operacional e maiores níveis de produtividade levaram à preocupação com a identificação e controle das perdas relacionadas à matéria-prima produzida. Pois, se não forem diagnosticadas e controladas, as perdas decorrentes da colheita mecanizada podem atingir até 15 toneladas por hectare (BENEDINI; SILVA, 2010). Sendo

que, uma perda média de matéria-prima em torno de 10% da cana-de-açúcar colhida por hectare (ha) pode gerar prejuízos em torno de US\$ 450 milhões por ano (SEGATO; DAHER, 2011).

Nesse contexto, a presente pesquisa teve por objetivo avaliar como as variáveis relacionadas às variedades de cultivares, aos modelos de colhedoras e às respectivas velocidades de locomoção se comportam enquanto um conjunto de possíveis determinantes dos percentuais referentes perdas totais de cana-de-açúcar ocorridas no campo, decorrentes da respectiva colheita mecanizada.

Para atingir esse objetivo, inicialmente, foi realizado o embasamento teórico acerca dos resultados de estudos e experimentos relacionados às perdas totais de cana-de-açúcar ocorridas no campo em decorrência da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, conforme descrito na segunda seção deste artigo.

A seguir, foi realizada a pesquisa e a identificação das fontes e dados referentes às possíveis variáveis explicativas (variedades, modelos de colhedoras e suas velocidades de locomoção) dos percentuais referentes perdas totais de cana-de-açúcar no campo (variável de estudo), conforme relatado na terceira seção deste trabalho. Adicionalmente, foi estudada e identificada a respectiva metodologia de análise de dados, de forma a permitir atingir objetivo geral estabelecido para esta pesquisa.

A partir do levantamento dos dados referentes às variáveis avaliadas neste estudo, e ainda, da identificação da respectiva metodologia de pesquisa, procedeu-se à análise de dados e a apresentação das principais evidências coletadas, conforme descrito na quarta seção deste artigo.

Finalmente, na quinta seção deste trabalho, foram apresentadas as considerações finais acerca de todo o processo de investigação científica realizado, suas limitações, e ainda, foram realizadas sugestões para a sua continuidade.

Dessa maneira, a presente pesquisa se justifica não só pela possibilidade de apresentar uma metodologia de análise multivariável, ou multivariada, voltada para a compreensão do comportamento de possíveis variáveis explicativas das perdas decorrentes da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, mas também, pelo fato da metodologia analítica ora proposta contemplar possíveis interações entre tais variáveis explicativas. Pois, conforme observam Noronha *et al.* (2011), a utilização de métodos quantitativos de análise aplicados às operações agrícolas pode levar a uma melhor compreensão acerca da variabilidade dos resultados de tais operações. Adicionalmente, a quantificação e a análise das perdas ocorridas no processo de colheita da cana-de-açúcar viabilizam a implementação de ajustes voltados para a correção de falhas mecânico-operacionais e, por consequência, levam à redução de custos e perdas (SANTOS *et al.*, 2019).

2 Referencial Teórico

Segundo o boletim técnico do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), as perdas ocorridas na colheita mecanizada da cana-de-açúcar podem ser classificadas em perdas visíveis e perdas invisíveis:

Perdas de cana-de-açúcar na colheita mecanizada

as perdas visíveis são aquelas detectadas no campo e podem ser coletadas para sua mensuração e classificação em tocos, cana inteira, cana ponta, toletes, lascas e pedaços; as perdas invisíveis não permitem sua observação direta no campo pelo fato de ocorrerem sob a forma de caldo, serragem e estilhaços pequenos, sendo geradas durante o processamento da cana-de-açúcar na colhedora (BENEDINI; BROD; PERTICARRARI, 2009).

Ainda segundo a metodologia proposta pelo CTC (BENEDINI; BROD; PERTICARRARI, 2009), depois de colhidas em uma área amostral composta por uma parcela medindo 10 m² (3,33m x 3,0m) que cubra 2 linhas já colhidas de cana-de-açúcar, cujo espaçamento entre elas seja de no máximo 1,5 m, as perdas devem ser classificadas (separadas por categorias), pesadas e quantificadas.

Ao multiplicar o peso das perdas por mil é possível identificar o seu valor absoluto em toneladas por hectares (t ha⁻¹), pois, 10 m² (área amostral) multiplicados por 1000 são equivalentes a área de um hectare (10.000 m²); a partir daí, para obter o valor relativo das perdas (percentual), basta dividir o seu valor absoluto (t ha⁻¹) pelo somatório da produtividade da área colhida (em t ha⁻¹) com o peso total das próprias perdas (também em t ha⁻¹), conforme descrito pela Equação 1 (BENEDINI; BROD; PERTICARRARI, 2009).

$$\text{Perdas (\%)} = \frac{\text{Perdas no campo (t ha}^{-1}\text{)}}{\text{Produtividade Perdas (t ha}^{-1}\text{)} + \text{Perdas no campo (t ha}^{-1}\text{)}} \quad (1)$$

Após identificadas e quantificadas, os percentuais de perdas totais devem ser classificados de acordo com os parâmetros estabelecidos pelo CTC (BENEDINI; SILVA, 2010), conforme descrito no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação das perdas visíveis totais ocorridas na colheita mecanizada da cana-de-açúcar

Nível de perdas	Percentual de perdas (%)
Baixo	< 2,5
Médio	2,5 < 4,5
Alto	>4,5

Fonte: elaborado pelos autores a partir de Benedini e Silva (2010, p.31)

Dentre os principais fatores determinantes da ocorrência das perdas de cana-de-açúcar no campo decorrentes da colheita mecanizada, destaca-se a velocidade de descolamento da colhedora (BENEDINI; BROD; PERTICARRARI, 2009; BENEDINI; SILVA, 2010; NORONHA *et al.*, 2011; SEGATO; DAHER, 2011; SILVA *et al.*, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2019; PELLOSO *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2019).

Contudo, é preciso observar também que a velocidade de deslocamento é influenciada por fatores das mais variadas naturezas. Desde a capacidade operacional relacionada às máquinas

(OLIVEIRA *et al.*, 2019) até as condições do terreno, passando pela qualidade das variedades plantadas e colhidas (SILVA *et al.*, 2015), são muito os fatores que afetam a velocidade de deslocamento da colhedora, mediante a interação ocorrida entre tais fatores.

Diante dessa interação de fatores, percebe-se a necessidade de se adotar uma metodologia de análise que vá além da influência da velocidade de deslocamento da colhedora. É preciso considerar a possibilidade, e por que não a necessidade, de se desenvolver a análise das perdas totais de cana-de-açúcar no campo a partir de uma perspectiva multivariável ou multivariada.

Nesse sentido, foi realizado o levantamento de um conjunto de dados e resultados identificados a partir de estudos e experimentos realizados anteriormente, cujos respectivos objetivos principais contemplaram dois fatores considerados essenciais para a pesquisa ora proposta, ou seja: primeiro, o fato dos estudos pesquisados terem realizado a avaliação e a quantificação de perdas de matéria-prima no campo decorrentes do processo de colheita mecanizada da cana-de-açúcar; segundo, a disponibilidade de informações referentes às variedades de cultivares de cana-de-açúcar colhida, aos modelos de colhedoras utilizadas e às respectivas velocidades de locomoção.

Dessa forma, Noronha *et al.* (2011) desenvolveram um estudo com o objetivo de analisar a variabilidade das perdas de cana-de-açúcar no campo e dos danos causados à soqueira em decorrência da colheita mecanizada da variedade RB855156, realizada em dois turnos, utilizando uma colhedora Case A7700. A partir da aplicação do controle estatístico de processos e da análise de variância para comparação de médias, Noronha *et al.* (2011) não observaram diferenças estatisticamente significativas quanto aos danos à soqueira; contudo, foram constatadas perdas totais acima de níveis considerados aceitáveis, sendo que, sua maior ocorrência se deu na colheita realizada ao longo do período noturno.

Silva *et al.* (2015) realizaram uma pesquisa voltada para a quantificação e análise das perdas visíveis na colheita mecanizada de duas variedades de cultivares comerciais de cana-de-açúcar (RB867515 e RB92579) em decorrência do deslocamento em duas velocidades diferentes ($3,2 \text{ km h}^{-1}$ e $3,6 \text{ km h}^{-1}$) de uma colhedora John Deere 3520. A partir da análise de variância para comparação de médias, Silva *et al.* (2015) constataram que as variáveis referentes a rebolos picados e a cana inteira apresentaram as perdas mais representativas, e ainda, que a variedade RB 867515 apresentou percentuais de perdas totais acima de níveis considerados aceitáveis, entre outros resultados.

Por meio da análise de variância e da análise comparativa de médias realizada mediante o uso do teste de Scott-Knott, Santos *et al.* (2019) avaliaram a influência da velocidade de trabalho de uma colhedora Case IH A8800 sobre as perdas na colheita mecanizada da variedade de cana-de-açúcar SP80-1842. Entre outros resultados, observou-se que maiores velocidades de trabalho ($6,0 \text{ km h}^{-1}$; $7,0 \text{ km h}^{-1}$; $8,0 \text{ km h}^{-1}$) provocaram a elevação dos índices percentuais de perdas visíveis, sendo que, nas velocidades de trabalho de $3,0 \text{ km h}^{-1}$, $4,0 \text{ km h}^{-1}$ e $5,0 \text{ km h}^{-1}$, os níveis de perdas foram menores (SANTOS *et al.*, 2019)

Perdas de cana-de-açúcar na colheita mecanizada

Pelloso *et al.* (2019) avaliaram as variações ocorridas nos níveis de perdas visíveis e invisíveis decorrentes da colheita mecanizada realizada em uma variedade de cana-de-açúcar do tipo RB965902, mediante o uso de diferentes velocidades de deslocamento (3,0 km h⁻¹; 5,0 km h⁻¹; e 6,0 km h⁻¹) de uma colhedora John Deere 3520 e diferentes velocidades de rotação do extrator primário. A partir do teste de Tukey para comparação de médias, Pelloso *et al.* (2019) concluíram que o aumento de rotação do extrator primário e a redução da velocidade de locomoção tendem a elevar as perdas de cana-de-açúcar, entre outras constatações.

De uma maneira geral, é possível identificar um conjunto de características comuns em relação aos experimentos analisados (NORONHA *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2019; PELLOSO *et al.*, 2019), conforme demonstrado no Quadro 2. Isto é, o conjunto de informações referentes às seguintes variáveis: variedade de cultivar da cana-de-açúcar colhida; marca e modelo da colhedora utilizada; velocidades de locomoção; e, obviamente, a variável de estudo, ou seja, os percentuais de perdas totais observados.

Quadro 2 - Níveis de perdas visíveis totais, velocidade de locomoção e algumas variáveis qualitativas

Fonte	Variedade	Colhedora	Velocidades de locomoção da colhedora (km h ⁻¹)	Porcentagem de Perdas (%)
Noronha <i>et al.</i> (2011)	RB855156	Case A7700	6,2	9,30
			6,2	11,20
Silva <i>et al.</i> (2015)	RB867515	John Deere 3520	3,2	5,89
			3,6	8,08
	RB92579	John Deere 3520	3,2	3,49
			3,6	2,75
Santos <i>et al.</i> (2019)	SP80-1842	Case IH A8800	3,0	2,25
			4,0	2,40
			5,0	2,22
			6,0	4,16
			7,0	4,84
			8,0	4,59
Pelloso <i>et al.</i> (2019)	RB965902	John Deere 3520	3,0	1,38
			6,0	1,92
			6,0	1,12
			3,0	1,80
			5,0	2,30

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Além das variáveis descritas no Quadro 2, também é possível observar que os estudos analisados utilizaram algum método de análise de dados baseado em estatística bivariável ou bivariada. Isto é, os dados coletados foram analisados em duplas de variáveis, ou ainda, os dados das respectivas variáveis foram comparados aos pares. Sendo que, a explicação para tal fato poderia ser atribuída à impossibilidade técnico-operacional e/ou aos custos (financeiros, técnicos e operacionais) de se realizar experimentos envolvendo mais de uma ou duas marcas/modelo de colhedoras, e/ou ainda, em mais de uma ou duas áreas com variedades de cana-de-açúcar cultivadas.

Assim, diante da possibilidade de interação entre os fatores/variáveis observados (variedade de cultivar; marca e modelo da colhedora; velocidade de locomoção), a presente pesquisa vislumbra a possibilidade de identificar um modelo matemático capaz de explicar as variações ocorridas nos níveis percentuais de perdas de cana-de-açúcar campo (variável de estudo), em função de um conjunto de fatores formado tanto por variáveis explicativas quantitativas (velocidades de locomoção da colhedora) quanto por variáveis explicativas qualitativas (variedades de cultivar da cana-de-açúcar colhida e modelos de colhedoras utilizadas). Pois, conforme observado por Oliveira *et al.* (2019), para reduzir custos e obter melhores resultados, a avaliação das perdas decorrentes da mecanização da colheita deve ser uma preocupação constante do setor sucroenergético.

3 Material e Métodos

A fim de avaliar como as variáveis relacionadas às variedades de cultivares, aos modelos de colhedoras e às respectivas velocidades de locomoção se comportam enquanto um conjunto de possíveis determinantes dos percentuais referentes perdas totais de cana-de-açúcar ocorridas no campo em decorrência do processo de colheita mecanizada, inicialmente, foi realizado o levantamento de um conjunto de dados e resultados identificados a partir de estudos e experimentos realizados anteriormente, conforme descrito na seção anterior do presente artigo.

A partir de informações disponíveis nos estudos de Noronha *et al.* (2011), Silva *et al.* (2015), Santos *et al.* (2019) e Peloso *et al.* (2019), já descritas no Quadro 2 do referencial teórico, foram tabulados os dados para realização desta pesquisa, conforme descrição detalhada pela Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição da base de dados referentes às variáveis desta pesquisa

Perdas	Km h ⁻¹	RB855156	RB867515	RB92579	RB965902	SP80-1842	Case A7700	Case IH A8800	John Deere 3520
9,30	6,20	1	0	0	0	0	1	0	0
11,20	6,20	1	0	0	0	0	1	0	0
5,89	3,20	0	1	0	0	0	0	0	1
8,08	3,60	0	1	0	0	0	0	0	1
3,49	3,20	0	0	1	0	0	0	0	1
2,75	3,60	0	0	1	0	0	0	0	1
2,25	3,00	0	0	0	0	1	0	1	0
2,40	4,00	0	0	0	0	1	0	1	0
2,22	5,00	0	0	0	0	1	0	1	0
4,16	6,00	0	0	0	0	1	0	1	0
4,84	7,00	0	0	0	0	1	0	1	0
4,59	8,00	0	0	0	0	1	0	1	0
1,38	3,00	0	0	0	1	0	0	0	1
1,92	6,00	0	0	0	1	0	0	0	1
1,12	6,00	0	0	0	1	0	0	0	1
1,80	3,00	0	0	0	1	0	0	0	1
2,30	5,00	0	0	0	1	0	0	0	1

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

As informações referentes às características e às formas de tratamento atribuídas às variáveis utilizadas para formar o conjunto dos dados desta pesquisa (Tabela 1) encontram-se descritas no GETEC, v.10, n.31, p.136-151/2021

Quadro 3. Dessa forma, a variável de estudo é o percentual de perdas totais de cana-de-açúcar ocorridas no campo em decorrência do processo de colheita mecanizada, e as demais variáveis foram consideradas como possíveis variáveis explicativas a serem analisadas a partir do processo de modelagem proposto para esta investigação científica.

Para analisar os dados desta pesquisa, foi utilizada a análise de regressão linear múltipla pelo método *stepwise*, mediante o uso do pacote estatístico *SPSS (Statistical Package for the Social Sciences)* versão 15.0.

Quadro 3 – Características das variáveis desta pesquisa

Tipologia no modelo de pesquisa	Unidade de medida	Identificação na análise de dados
Variável de estudo (y)	Percentual	Perdas
Variáveis explicativas (x)	Quilômetro por hora	Km h ⁻¹
	Binária, sendo: 1 (um) quando a variável estiver presente; e, 0 (zero) para ausente.	RB855156
		RB867515
		RB92579
		RB965902
		SP80-1842
		Case A7700
		Case IH A8800
John Deere 3520		

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

A análise de regressão produz um modelo matemático analítico-explicativo do comportamento de uma variável de estudo (*Y*) a partir das observações referentes ao comportamento de um conjunto de variáveis explicativas (*X*), conforme proposto pela Equação 2 (SANZ, 2010). O método *stepwise* promove a entrada e a saída das variáveis explicativas (*X*) no modelo de forma hierárquica, da mais significativa para a menos significativa, removendo aquelas que não são estatisticamente relevantes na composição de modelo analítico-explicativo do comportamento da variável de estudo (*Y*) (FÁVERO *et al.*, 2009; FIELD, 2009).

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + u \quad (2)$$

Na Equação 2, “ $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ ” são coeficientes representativos da magnitude dos efeitos de cada uma de as variáveis explicativas “ X_1, X_2, \dots, X_k ” sobre a variável de estudo (*Y*), “ β_0 ” é o coeficiente representativo de um termo constante ou independente, e “*u*” é o termo de erro ($\hat{Y} - Y$) do modelo analítico (\hat{Y}) em relação aos valores reais (*Y*) observados para a variável de estudo (SANZ, 2010).

Para validação do modelo explicativo do comportamento dos percentuais de perdas totais de cana-de-açúcar ocorridas no campo decorrentes da colheita mecanizada foram utilizados os testes e parâmetros descritos no Quadro 4, cuja finalidade é avaliar a qualidade analítica do modelo como um

todo, suas variáveis e coeficientes (coeficiente de correlação, coeficiente de determinação, estatística F e estatística T), e ainda, garantir o cumprimento dos pressupostos básicos da análise de regressão linear (ausência de problemas envolvendo autocorrelação residual, multicolinearidade, heterocedasticidade e independência residual).

Quadro 4 - Relação dos testes e parâmetros estatísticos utilizados para validação da modelagem pesquisada a partir da análise de regressão linear múltipla (nível de confiança = 95%)

Teste	Sigla	Finalidade	Parâmetro desejável
Coeficiente de correlação	R	Tem por objetivo avaliar a correlação geral entre as variáveis explicativas (X) e variável de estudo(Y), no modelo pesquisado (\hat{Y}).	Quanto mais próximo de 1,00 melhor.
Coeficiente de determinação	R ²	Tem por objetivo avaliar o poder explicativo do modelo pesquisado (\hat{Y}).	Quanto mais próximo de 1,00 melhor. Contudo, uma vez que é o quadrado da correlação, será menor que R.
Estatística F	Est. F	Tem por objetivo avaliar se a combinação linear das variáveis explicativas (X_1, X_2, \dots, X_n) exerce influência sobre a variável de estudo (Y).	Sua significância deve ser menor que 0,05. Portanto: sig. do valor-p < 0,05
Estatística T	Est. T	Tem por finalidade avaliar a possibilidade dos coeficientes ($\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$) da modelagem explicativa (\hat{Y}) serem diferente de zero.	Sua significância estatística deve ser menor que 0,05. Portanto: sig. do valor-p < 0,05
Estatística de Durbin-Watson	Est. DW	Tem por objetivo diagnosticar a presença de autocorrelação residual, ou seja, a existência de problemas envolvendo a correlação entre os ($u = \hat{Y} - Y$) resíduos e variável de estudo (Y).	Quanto mais próxima de 2 melhor. Contudo, em uma regra bastante conservadora, merecem preocupação, valores maiores que 3 e menores que 1. Logo: 1 < Est. DW < 3
Estatística VIF	VIF	Tem por objetivo diagnosticar a presença de multicolinearidade, ou seja, a existência de problemas envolvendo a correlação entre as variáveis explicativas (X) do modelo pesquisado (\hat{Y}).	Deve ser inferior a 5,00 para que seja descartada a hipótese de multicolinearidade, nos casos de regressão múltipla. Portanto: VIF < 5,00
Estatística de Tolerância	Tolerance	Também serve para o diagnóstico de multicolinearidade. Indica a tolerância de uma variável explicativa em relação às demais.	Deve ser superior a 0,20 para que seja descartada a hipótese de multicolinearidade, nos casos de regressão múltipla. Portanto: tolerance > 0,20
Teste de Pesarán-Pesarán	Pesarán-Pesarán	Tem por objetivo diagnosticar a presença de heterocedasticidade ou ausência de resíduos com comportamento homocedásticos, ou seja, a existência de problemas envolvendo a correlação entre os resíduos ($u = \hat{Y} - Y$) resíduos e uma ou mais variáveis explicativas (X).	A estatística f da regressão do quadrado dos resíduos padronizados (ZRE ²) em função do quadrado dos valores estimados (ZPR ²) não deve apresentar significância estatística. Portanto: sig. do valor-p > 0,05
Teste de normalidade	Kolmogorov-Smirnov Z	Tem por objetivo avaliar a independência dos resíduos gerados pelo modelo pesquisado (u	Sua significância estatística deve ser maior que 0,05.

de Kolmogorov-Smirnov	= $\hat{Y} - Y$), sendo que, para tanto eles devem apresentar distribuição normal ou Gaussiana.	Portanto: <i>sig. do valor-p</i> >0,05
-----------------------	--	---

Fonte: Field (2009), Fávero *et al.* (2009), Gujarati e Porter (2011) e Cunha e Coelho (2007).

Diante do objetivo proposto para a presente investigação, sua natureza, bem como, a respectiva metodologia de análise de dados, este estudo pode ser classificado como uma pesquisa científica de natureza analítica baseada em métodos quantitativos aplicados.

4 Análise dos Dados e Apresentação dos Resultados

A aplicação da análise de regressão linear múltipla levou à identificação de um modelo formado pelas variáveis referentes às variedades de cana-de-açúcar RB855156, RB867515 e RB965902 e à velocidade de locomoção da colhedora medida em km h⁻¹, conforme pode ser visto no modelo 4 descrito na Tabela 2. Contudo, devido à hierarquização promovida pelo método *stepwise*, foram identificados 3 modelos intermediários (modelos 1, 2 e 3) até que aquele modelo com maior coeficiente de determinação (R²) fosse identificado.

Tabela 2 – Resumo do modelo (\hat{Y})

Modelo	Variáveis explicativas (X)	R	R ²	Est. F	<i>Sig. do valor-p</i>
1	Constante, RB855156	0,786	0,617	24,204	0,000
2	Constante, RB855156, RB867515	0,920	0,846	38,321	0,000
3	Constante, RB855156, RB867515, RB965902	0,951	0,905	41,118	0,000
4	Constante, RB855156, RB867515, RB965902, km h ⁻¹	0,967	0,934	42,776	0,000

Est. DW: 2,1868

Est. F do teste de Pesarán-Pesarán: 2,046 (*Sig. do valor-p* = 0,173)

Kolmogorov-Smirnov Z: 0,572 (*Sig. do valor-p* = 0,899)

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

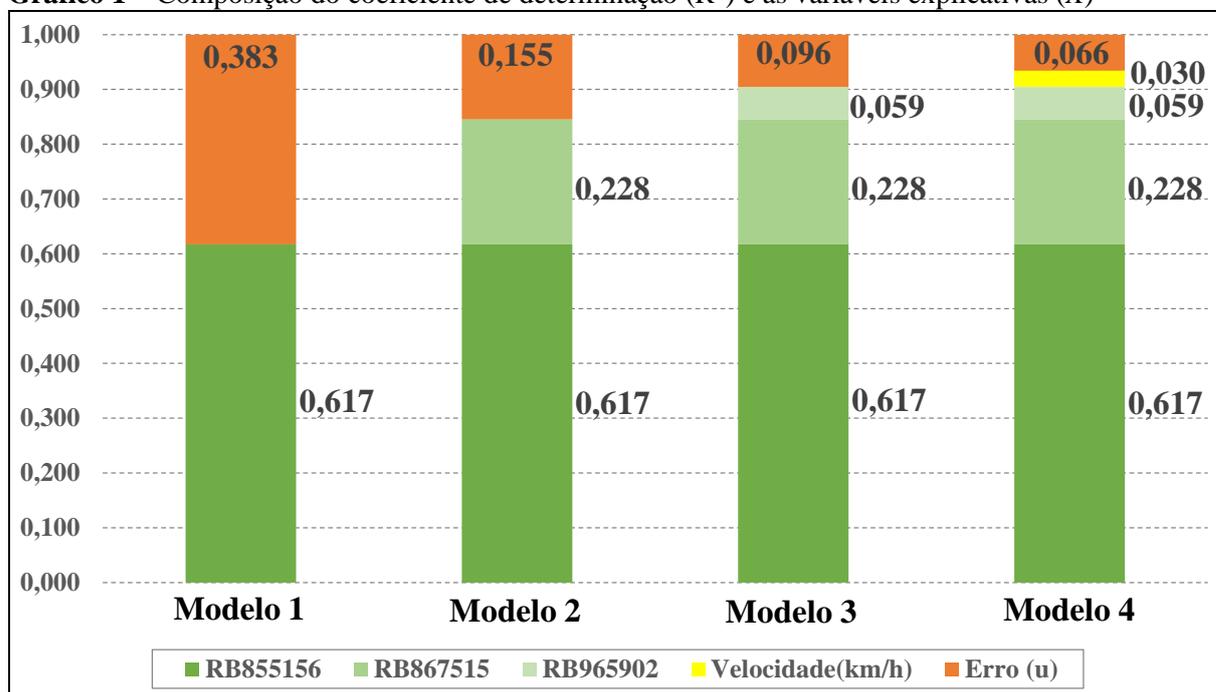
De acordo com as informações resumidas na Tabela 2, a combinação linear das variáveis referentes às variedades de cana-de-açúcar RB855156, RB867515 e RB965902 e à velocidade de locomoção da colhedora pode ser considerada estatisticamente significativa (*Sig. do valor-p* da estatística F <0,05) para explicar 93,4% (R²) das observações referentes ao percentual de perdas totais decorrentes da colheita mecanizada da cana-de-açúcar,

Ainda segundo às informações apresentadas na Tabela 2, pôde-se descartar a possibilidade de existência de problemas relacionados autocorrelação residual (Est. DW= 2,1868, portanto, 1 < Est. DW <3), heterocedasticidade (Est. F do teste de Pesarán-Pesarán com *Sig. do valor-p* = 0,173, portanto, *Sig. do valor-p* > 0,05), e ainda, ausência de dependência residual, ou melhor, os resíduos (termos de erro) gerados pelo modelo analítico-explicativo foram considerados independentes por apresentarem distribuição normal (Kolmogorov-Smirnov Z com *sig. do valor-p* = 0,899, portanto, *Sig. do valor-p* > 0,05).

Em relação às evidências que podem ser extraídas a partir desses resultados iniciais, observa-se que, além da velocidade de locomoção (em Km h⁻¹), outras três variáveis foram consideradas significativas para explicar os percentuais de perdas totais de cana-de-açúcar no campo. Contudo, essas três variáveis apresentaram um poder explicativo (R²) maior que a velocidade de locomoção em Km h⁻¹. Isso pode ser melhor observado a partir da análise da composição do coeficiente de determinação (R²) fornecida pelo Gráfico 1.

O Gráfico 1 informa qual a contribuição individual de cada variável para a composição do coeficiente de determinação (R²) geral do modelo desta pesquisa ($R^2_{\text{modelo 4}} = 0,617 + 0,228 + 0,059 + 0,03 = 0,934$). Pode-se observar que, à medida que as variáveis referentes às variedades de cana-de-açúcar são inseridas nos modelos 1, 2 e 3, o erro (*u*) é reduzido de forma mais acentuada do que quando ocorre finalmente a inserção da variável referente à velocidade de locomoção (Km h⁻¹) no modelo 4.

Gráfico 1 – Composição do coeficiente de determinação (R²) e as variáveis explicativas (X)



Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Contudo, deve-se destacar que é a combinação linear dessas 4 variáveis que potencializa o coeficiente de determinação (R²) geral do modelo. Pois, isoladamente, seus coeficientes de correlação (R) com a variável de estudo (variáveis duas a duas), e por consequência seus coeficientes de determinação (R²), não seriam iguais, exceto pela primeira variável a ingressar no processo de modelagem, ou seja, a variedade RB855156.

Nesse sentido, individualmente, as variedades RB855156, RB867515, RB965902 e a velocidade de locomoção da colhedora (km h⁻¹) apresentariam correlação (R) com a variável de estudo

Perdas de cana-de-açúcar na colheita mecanizada

(duas a duas, isto é, X_k com Y) de 0,786, 0,369, -0,541 e 0,292, e coeficientes de determinação (R^2) de 0,617, 0,136, 0,293 e 0,085, respectivamente. Ao passo que, conjuntamente, essas variáveis explicam 93,4% ($R^2 \times 100$) das observações referentes aos percentuais de perdas totais de cana-de-açúcar no campo.

De acordo com os dados analisados, a segunda evidência extraída dessa etapa inicial do processo de análise é o fato das variáveis referentes às marcas/modelos de colhedoras não terem sido consideradas estatisticamente significativas na determinação dos percentuais de perdas totais de cana-de-açúcar decorrentes da colheita mecanizada. Essa constatação sinaliza que, de acordo com os dados analisados nesta investigação, a marca/modelo das colhedora não tem influência sobre a variável de estudo.

Segundo as informações resumidas na Tabela 3, caso se desejasse expressar o modelo pesquisado sob a forma de equação, ela assumiria o forma do descrita pela Equação 3. Contudo, por se tratar de um modelo matemático analítico-explicativo, as informações da Tabela 3 são bem mais completas.

$$\text{Perdas}(\%) = 1,588 + 6,482 \text{ RB855156} + 4,201 \text{ RB867515} - 1,502 \text{ RB965902} + 0,352 \text{ km h}^{-1} \quad (3)$$

Com base nas informações apresentadas na Tabela 3, observa-se que a estatística T dos coeficientes identificados no processo de modelagem analítico-explicativo dos percentuais de perdas totais de cana-de-açúcar apresentaram a significância estatística necessária para descartar a possibilidade de tais coeficientes tenderem a zero, com um nível de confiança de 95% para ($\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$) as variáveis relacionadas às variedades RB855156, RB867515, RB965902 e a velocidade de locomoção da colhedora em Km h^{-1} (*Sig. do valor-p* da estatística T $< 0,05$), e com um nível de confiança de 90% para o termo constante (β_0) do modelo pesquisado (*Sig. do valor-p* da estatística T $< 0,10$). Adicionalmente, tanto a estatística de *Tolerance* (*Tolerance* $> 0,20$) quanto a *VIF* (*VIF* $< 5,00$) permitiram descartar a presença de problemas relacionados à multicolinearidade entre variáveis explicativas identificadas, validando completamente o modelo proposto nesta investigação científica.

Tabela 3 – Análise dos coeficientes do modelo

Variáveis (X)	Coeficientes (β)	Est. T	Sig. do valor-p	Estatísticas de colinearidade	
				Tolerance	VIF
Constante	1,588	1,961	0,073		
RB855156	6,482	9,093	0,000	0,846	1,182
RB867515	4,201	5,769	0,000	0,811	1,234
RB965902	-1,502	-3,005	0,011	0,861	1,162
km h^{-1}	0,352	2,336	0,038	0,802	1,247

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

O estudo dos sinais dos coeficientes (β) do modelo analítico-explicativo das perdas percentuais totais de cana-de-açúcar indica que na colheita das variedades RB855156 e RB867515 as perdas tendem ser maiores, e na colheita da variedade RB965902 as perdas tendem a ser menores, segundo as informações resumidas e apresentadas na Tabela 3.

De acordo com os dados analisados, o sinal positivo dos coeficientes daquelas duas primeiras variedades (RB855156 e RB867515) indica que sua presença (pois, são variáveis binárias do tipo 0 ou 1) eleva o percentual das perdas em 6,482% e 4,201%, respectivamente. Sendo que, o inverso também é verdadeiro, ou seja, no caso da variedade RB965902 o coeficiente com sinal negativo indica que sua presença (pois, essa também é uma variável binária do tipo 0 ou 1) faz com que as perdas percentuais sejam reduzidas em 1,502%.

Em relação à velocidade de locomoção da colhedora, cada Km h⁻¹ de velocidade faz com que o percentual de perdas totais se eleve em 0,352%, sendo que, no caso da colheita realizada em variedades de cana-de-açúcar diferentes das variedades RB855156, RB867515 e RB965902 as perdas seriam expressas mediante a formulação descrita pela Equação 4, o que implica em assumir um percentual constante de perdas de 1,588% e um adicional de 0,352% para cada Km h⁻¹ de velocidade de locomoção da colhedora.

$$\text{Perdas(\%)} = 1,588 + 0,352 \text{ km h}^{-1} \quad (4)$$

Por exemplo, de acordo com os danos analisados, para uma colhedora se deslocando a uma velocidade média de 4,82 Km h⁻¹, que é a velocidade média das observações analisadas nesta pesquisa (já descritas tanto no Quadro 2 quanto na Tabela 1), o percentual de perda seria de 3,28% (Perda = 1,588 + 0,352 x 4,82 = 3,28%), classificado portanto como uma perda de nível médio, segundo a metodologia de avaliação do CTC (BENEDINI; BROD; PERTICARRARI, 2009; BENEDINI; SILVA, 2010).

De outra forma, de acordo com os danos analisados, se fosse mantida aquela mesma velocidade média (4,82 Km h⁻¹), com a variedade colhida sendo a RB855156, a perda seria de quase 10% (Perda = 1,588 + 6,482(1) + 0,352 x 4,82 = 9,77%); se a variedade colhida fosse a RB867515, a perda seria de quase 7,5% (Perda = 1,588 + 4,201(1) + 0,352 x 4,82 = 7,48%); por outro lado, se a variedade colhida fosse a RB965902, a perda seria inferior a 1,80% (Perda = 1,588 - 1,502(1) + 0,352 x 4,82 = 1,78%).

Por fim, resta destacar que os percentuais de perdas exemplificados a partir do modelo analítico-explicativo identificado por esta investigação trazem consigo uma margem de erro de 6,60% ($[1 - R^2] \times 100 = [1 - 0,934] \times 100$), para um nível de confiança de 95%. Contudo, ainda assim, o modelo em questão apresenta um poder analítico-explicativo bem expressivo, podendo ser utilizado também como uma ferramenta analítico-preditiva, se admitidas algumas limitações acerca da sua

estimativa (margem de erro de 6,60%; nível de confiança de 95%; possibilidade de maiores erros caso a variedade colhida fosse diferente das variedades RB855156, RB867515, RB92579, RB965902 e SP80-1842).

5 Considerações Finais

Ao avaliar como as variáveis relacionadas às variedades de cultivares, aos modelos de colhedoras e às respectivas velocidades de locomoção se comportam enquanto um conjunto de possíveis determinantes dos percentuais referentes perdas totais de cana-de-açúcar ocorridas no campo em decorrência do processo de colheita mecanizada, esta pesquisa utilizou uma metodologia analítica baseada na estimativa de um modelo multivariável, ou ainda, em um método estatístico multivariado.

A metodologia de modelagem analítica proposta foi capaz de identificar um modelo analítico-explicativo da variável de estudo (perdas percentuais totais) a partir de 4 variáveis que, combinadas linearmente, se mostraram suficientes para explicar 93,4% das observações avaliadas nesta investigação, em um nível de confiança de 95%.

Além de ser possível avaliar qual a capacidade explicativa do modelo proposto pela presente pesquisa científica, a modelagem matemática em questão permite estimar como os percentuais de perdas totais decorrentes da colheita mecanizada tendem a se comportar em função de variações no comportamento das respectivas variáveis explicativas.

Nesse sentido, a metodologia utilizada neste estudo se mostrou capaz de realizar inferências mais amplas que aquelas geradas a partir de análises de caráter bivariado comumente utilizadas nos estudos voltados para a compreensão do comportamento das perdas em questão.

Como principal limitação desta pesquisa, destaca-se o fato dela ter sido desenvolvida com base em dados obtidos a partir de fontes secundárias (resultados de outros estudos), devido à ausência de dados primários disponíveis mais facilmente. Contudo, deve-se destacar que, por contar com dados de experimentos de naturezas variadas, o modelo proposto nesta investigação traz consigo um conjunto de aspectos implicitamente inerentes às diferentes características dos experimentos dos quais os dados em questão foram extraídos, por exemplo, localização, umidade, tipologia de solos, topografia dos respectivos terrenos, entre outros.

Para continuidade desta pesquisa, sugere-se a utilização da metodologia ora proposta aplicada ao maior conjunto de variáveis possíveis, por exemplo, uma maior quantidade de variedades de cultivares, maior variação nas velocidades de locomoção da colhedora, entre outros, e ainda, sugere-se a diversificação das possíveis variáveis explicativas das perdas, ou seja, a utilização de variáveis relacionadas à declividade do terreno de colheita, tipo de solo, estágio de maturação da cana-de-açúcar colhida, entre outros possíveis.

Diante do exposto, espera-se que os resultados produzidos a partir desta investigação científica possam ser somados aos achados de outros estudos e, assim, tenha-se contribuído para o debate e o

avanço do conhecimentos relacionado aos possíveis fatores determinantes das perdas de matéria-prima ocorridas no campo durante a colheita mecanizada da cana-de-açúcar.

Referências

BENEDINI, Mauro Sampaio; BROD, Fernando Pedro Reis; PERTICARRARI, José Guilherme. **Perdas de cana e impurezas vegetais e minerais na colheita mecanizada**. Boletim técnico. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira, 2009.

CUNHA, Jacqueline Veneroso Alves da; COELHO, Antonio Carlos. Regressão linear múltipla. In: CORRAR, Luís J. (org). **Análise multivariada para os cursos de administração, ciências contábeis e economia**. São Paulo: Atlas, 2007.

FÁVERO, Luiz Paulo Lopes; BELFIORE, Patrícia Prado; SILVA, Fabiana Lopes da; CHAN, Betty Lilian. **Análise de dados**: modelagem multivariada para tomada de decisões. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FIELD, Andy. **Descobrimo a estatística usando SPSS**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

GUJARATI, Damodar N.; PORTER, Dawn C.. **Econometria básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

BENEDINI, Mauro Sampaio; SILVA, Adriana Lúcia da. Perdas de cana na colheita mecanizada. **Revista Canavieiros**, Sertãozinho, v. 5, n. 48, p.28-31, jun. 2010.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal: PAM 2018**. Lavouras temporárias: Tabela 5457 - Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes. Rio de Janeiro: Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457#n1/all/v/214,216,8331/p/last%201/c782/0,40106/l/v,p+c782,t/resultado>. Acesso em 09 jul. 2020.

LORIZOLA, Gabriela Micheletti; CAPITANI, Daniel Henrique Dario. Análise do modelo estrutura-conduta-desempenho do setor sucroenergético brasileiro. **Nucleus**, Ituverava, v.15, n.2, p.383-399, out. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3738/1982.2278.2920>. Acesso em: 01 jul. 2020.

MANHÃES, Carmen Maria Coimbra; GARCIA, Ricardo Ferreira; FRANCELINO, Francisco Maurício Alves; CORREA JUNIOR, Delorme; SOLANO, Cristóbal Soto; FRANCELINO, Helenilson de Oliveira. Visible losses in mechanized harvesting of sugarcane using the Case IH A4000 harvester. **American Journal of Plant Sciences**, [S. l.], v.5, n.18, article: 49142, p. 1-8, Aug. 2014. DOI: 10.4236/ajps.2014.518289. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=49142>. Acesso em 06 junl. 2020.

NORONHA, Rafael Henrique de Freitas; SILVA, Rouverson Pereira da; CHIODEROLI, Carlos Alessandro; SANTOS, Edvaldo Pereira dos; CASSIA, Marcelo Tufaile. Controle estatístico aplicado ao processo de colheita mecanizada diurna e noturna de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p.931-938, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/brag/v70n4/28.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2020.

OLIVEIRA, Adriana Barros de; CARVALHO, Lucas Roberto de; LIMA JUNIOR, Antônio Florentino de; ROSA, Juliano Queiroz Santana; BARBUIO, Roberto; MOREIRA, Juracy Mendes. Perdas na colheita mecanizada da cana-de-açúcar sob diferentes velocidades de corte. **Revista da GETEC**, v.10, n.31, p.136-151/2021

FAR, Rio Verde, v. 7, n. 7, p.154-163, 2019. Disponível em:
<https://www.faculdefar.edu.br/arquivos/revista-publicacao/files-135-0.pdf>. Acesso em 07 jul. 2020.

PELLOSO, Murilo Fuentes; LIMA, Adriano Aparecido de; PELLOSO, Bruno Fuentes; SILVA, Arthur Pereira da. Perdas na colheita mecanizada da cana-de-açúcar em resposta a diferentes velocidades da colhedora e de rotação do extrator primário. **Colloquium Agrariae**, v. 15, n.2, p. 114-120, mar-abr., 2019,. DOI: 10.5747/ca.2019.v15.n1.a290. Disponível em:
<http://journal.unoeste.br/index.php/ca/article/view/2780/2733>. Acesso em: 09 jul. 2020.

SANTOS, José Roberto dos; MIRANDA, Alexandre Tadeu de Oliveira; CARDOSO, Daniel Dias; SANTOS, Bruno Teixeira; AMARO, Hugo Tiago Ribeiro; PORTO, Edson Marcos Viana. Perdas na colheita mecanizada da cana-de-açúcar em função da velocidade de trabalho da colhedora. **Pesq. Agropec. Pernamb.**, Recife, v. 24, n.2, e2102242019, p. 1-5, 2019. DOI:
<https://doi.org/10.12661/pap.2019.009>. Acesso em: 03 jul. 2020.

SANZ, Pablo Valderrey. **SPSS17**: extracción del conocimiento a partir del analyses de datos. México (DF): Alfaomega Grupo Editor, 2010.

SEGATO, Silvelena Vanzolini; DAHER, Fabio. Perdas visíveis na colheita mecanizada de cana-de-açúcar crua sob velocidades de deslocamento da colhedora. **Nucleus**, Ituverava, v.8, n.1, p. 315-326, abr.2011. DOI: <https://doi.org/10.3738/nucleus.v8i1.471>. Acesso em 4 jul. 2020

SILVA, Rivonete Coelho da; OLIVEIRA, Taniele Carvalho de; FIGUEIREDO, Zulema Netto; CALDEIRA, Daniela Soares Alves. Nota Técnica: Perdas visíveis na colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Engenharia na agricultura**, Viçosa-MG, v. 23, n.1, p. 71-77, jan./ fev. 2015. DOI:
<https://doi.org/10.13083/reveng.v23i1.515>. Acesso em 02 jul. 2020.

TORQUATO, Sérgio Alves; JESUS, Kátia Regina E. de; ZORZO, Catiana Regina Brumatti. Inovações no sistema de produção de cana-de-açúcar: uma contribuição do Protocolo Agroambiental para a região de Piracicaba, Estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo-SP, v. 45, n. 2, p. 28-37, mar./abr. 2015. Disponível em:
<http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=13759>. Acesso em 09 jul. 2020.