

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
MELHORAMENTO GENÉTICO DE PLANTAS

LETÍCIA FERREIRA VIEIRA

**ANÁLISES DE TRILHA EM CARACTERES RELACIONADOS
À PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DE SORGO
SACARINO (*Sorghum bicolor* L. Moench)**

RECIFE - PE

2020

LETÍCIA FERREIRA VIEIRA

**ANÁLISES DE TRILHA EM CARACTERES RELACIONADOS
À PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DE SORGO
SACARINO (*Sorghum bicolor* L. Moench)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Melhoramento Genético de Plantas da UFRPE, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração: Melhoramento Genético de Plantas.

COMITÊ DE ORIENTAÇÃO:

Dr. Gerson Quirino Bastos – Orientador - UFRPE

Dr. José Wilson da Silva – Coorientador - UFRPE

RECIFE - PE

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Sistema Integrado de Bibliotecas

L636a Vieira , Leticia Ferreira
 ANÁLISES DE TRILHA EM CARACTERES RELACIONADOS
 À PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DE SORGO SACARINO
 (Sorghum bicolor L. Moench) / Leticia Ferreira Vieira . - 2020.
 80 f. : il.
 Orientador: Gerson Quirino Bastos.
 Coorientador: Jose Wilson da Silva.
 Inclui referências e anexo(s).

 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de
 Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Agronomia -
 Melhoramento Genético de Plantas, Recife, 2020.

 1. Melhoramento genético de plantas . 2. Estatística . 3. Sorgo
 Sacarino. 4. Análise de Trilha. 5. Produção de etanol. I. , Gerson
 Quirino Bastos, orient. II. Silva, Jose Wilson da, coorient. III. Título

CDD 581.15

LETÍCIA FERREIRA VIEIRA

**ANÁLISES DE TRILHA EM CARACTERES
RELACIONADOS À PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR
DE SORGO SACARINO (*Sorghum bicolor* L. Moench)
EM PERNAMBUCO**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora em
07/10/2020.

Orientador

Dr. Gerson Quirino Bastos - UFRPE

Examinadores:

Dr. Antônio Francisco de Mendonça Júnior - UFRPE

Dr. José Nildo Tabosa - IPA

Dr. Kleyton Danilo da Silva Costa - IFAL

RECIFE - PE

2020

AGRADECIMENTOS

Aos meu pais Luciene e Geraldo, aos meus irmãos Geraldo Jr e Henrick, a minha avó Lindnalva, e a todos da minha família que sempre me apoiaram em todos os momentos.

A minha tia Izabel pelos cuidados, carinho e compressão durante todo o período de realização do Mestrado.

Ao meu esposo Ihgo Cezar pelo companheirismo e incentivo nessa etapa desafiadora da minha vida.

Ao meu orientador Dr. Gerson Quirino Bastos e meu coorientador Dr. José Wilson da Silva pela confiança, orientações e auxílio para realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação da Universidade Federal Rural de Pernambuco pela oportunidade de realização do curso e proporcionar meu crescimento pessoal e profissional.

A todas as pessoas que contribuíram direta e indiretamente nessa jornada.

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO I** - Lista de progênies utilizadas no experimento.....76
- ANEXO II** - Lista de variedades utilizadas como testemunhas no experimento.....78
- ANEXO III** - Resumo da análise de variância para produção de matéria seca total (PMS), em t.ha⁻¹; porcentagem de matéria seca total (%MST), em porcentagem; produção de colmo (PCL), em t.ha⁻¹; Brix na colheita (BRIX), em graus Brix; eficiência na extração de caldo (EEC) em porcentagem e etanol teórico (ET), em l.ha⁻¹, obtidas da avaliação de 80 genótipos de sorgo sacarino, avaliadas em vitória de Santo Antão – PE, 2014.....79
- ANEXO IV** - Resumo da análise de variância para altura média das plantas (AMP), em centímetros; floração (FL), em números de dias; produção de matéria verde total (PVM), em t.ha⁻¹; produção de colmo (PCL), em t.ha⁻¹ e porcentagem de colmo na PMV (CL), em porcentagem, obtidas da avaliação de 80 genótipos de sorgo sacarino, avaliados em vitória de santo Antão – PE, 2014.....80

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1** - Vista parcial da variedade de sorgo duplo propósito IPA 2502 no agreste semiárido de Pernambuco (Tabosa et al. 2019).....20
- FIGURA 2** - Vista parcial de sorgo forrageiro apresentand colmo isoporizado (A) e colmo de sorgo sacarino com aspecto suculento (B) (Tabosa 2020).....20
- FIGURA 3** - Fluxograma simplificado de etapas de obtenção do etanol a partir de cana-de-açúcar e sorgo (Cunha e Severo Filho 2010).....28
- FIGURA 4** - Matriz de correlação do grupo de variáveis (r_1, r_2, \dots, r_n). Em que $r_{zn} = r_{nz}$ (Santos et al. 2008).....32
- FIGURA 5** - Diagrama casual ilustrativo dos efeitos diretos e indiretos das variáveis LP1 LP2 e LP3 sobre LY (Cruz, Regazzi e Carneiro, 2014).....34
- FIGURA 6** - (a) Presença de multicolinearidade; (b) Ausência de multicolinearidade (Salivan 2016).....37
- FIGURA 7** - Diagrama dos coeficientes de correlação genotípica entre os caracteres produção de matéria seca total (PMS), Brix na colheita (BRIX), eficiência na extração de caldo (EEC), produção de colmo (PCL), e o etanol teórico (ET).....59

- FIGURA 8** - Estimativas dos coeficientes de trilha (B) em função dos valores de k e obtidos da análise utilizando-se como variável básica o logaritmo de etanol teórico (ET) e como variáveis explicativas, produção de matéria seca total (PMS), Brix na colheita (BRIX), eficiência na extração de caldo (EEC), % de matéria seca na matéria verde total (% MST) e produção de colmo (PCL).....60
- FIGURA 9** - Estimativas dos coeficientes de trilha (B) em função dos valores de k e obtidos da análise utilizando-se como variável básica o logaritmo de etanol teórico (ET) e como variáveis explicativas, produção de matéria seca total (PMS), Brix na colheita (BRIX), eficiência na extração de caldo (EEC), e produção de colmo (PCL).....62
- FIGURA 10** - Diagrama dos coeficientes de correlação genotípica entre os caracteres altura média das plantas (AMP), floração (FL), % de colmo na PMV (CL), produção de matéria verde total (PMV) e a produção de colmo (PCL).....66
- FIGURA 11** - Estimativas dos coeficientes de trilha (B) em função dos valores de k e obtidos da análise utilizando-se como variável básica o logaritmo de produção de colmo (PCL) e variáveis explicativas, altura média das plantas (AMP), floração (FL), % de colmo na PMV (CL) e produção de matéria verde total (PMV).....67

LISTA DE SIGLAS

AMP	-	Altura média das plantas
ATR	-	Açúcar total recuperável
CL	-	Porcentagem de colmo na PMV
BRIX	-	Porcentagem de BRIX na colheita
CONAB	-	Companhia Nacional de Abastecimento
CTC	-	Capacidade de troca catiônica
EEC	-	Eficiência de extração de caldo
ET	-	Etanol teórico
FL	-	Floração
ICRISAT	-	Internacional Crop Research Institute for the Semiarid Tropics
IPA	-	Instituto Agrônomo de Pernambuco
NC	-	Número de condição
NCGRP	-	National Center for Genetic Resourcer Preservation
PCL	-	Produção de colmo
PE	-	Pernambuco
VIF	-	Inflação de variância

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	-	Alumínio
Ca	-	Cálcio
H	-	Hidrogênio
H ²	-	Herdabilidade
H ₂ O	-	Água
ha	-	Hectare
K	-	Potássio
L	-	Litros
M ³	-	Metros cúbicos
Mg	-	Magnésio
Na	-	Sódio
pH	-	Potencial de hidrogênio
S	-	Enxofre

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- Acessos de sorgo introduzidos e obtidos do Programa Melhoramento do IPA/PE e atualmente no Banco Ativo de Germoplasma, 2010/2011 (Tabosa et al. 2019).....	21
TABELA 2	- Etanol produzido em milhões de m ³ em regiões do Brasil entre os anos de 2010 e 2018. (ANP 2019).....	24
TABELA 3	- Características agronômicas e produtivas entre culturas de sorgo sacarino e a cana-de-açúcar para produção de etanol (Silva 2017).....	25
TABELA 4	- Análise comparativa de caldo, colmo e bagaço entre sorgo sacarino e cana-de-açúcar (Durães, May e Parrelha 2012).....	26
..		
TABELA 5	- Comparativo entre o sorgo sacarino, cana-de-açúcar e milho para produção de etanol.....	27
TABELA 6	- Lucratividade por hectare do sorgo sacarino cultivado no período de entressafra da cana-de-açúcar, em relação ao rendimento de biomassa e etanol.	27
TABELA 7	- Análise de solo realizada na área 1 (Bloco 1) e na área 2 (blocos 2 e 3).....	53
TABELA 8	- Média dos dados meteorológicos da estação experimental do IPA, em Vitória do Santo Antão – PE, observadas no período de Fevereiro à Junho de 2014.....	53

- TABELA 9** - Efeitos diretos e indiretos das variáveis primárias, produção de matéria seca total (PMS), Brix na colheita (BRIX), eficiência na extração de caldo (EEC), produção de colmo (PCL) sobre a variável básica, etanol teórico (ET).....63
- TABELA 10** - Efeitos diretos e indiretos das variáveis primárias, altura média das plantas (AMP), floração (FL), % de colmo na PMV (CL) e produção de matéria verde total (PMV) sobre a variável básica, produção de colmo (PCL).....68

SUMÁRIO

LISTA DE ANEXOS.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	Vi
LISTA DE SIGLAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	Ix
LISTA DE TABELAS.....	X
CAPÍTULO I – REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
1.0 INTRODUÇÃO GERAL.....	15
2.0 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Sorgo.....	19
2.1.1 Origem, classificação, aspectos morfológicos e bancos de germoplasma.....	19
2.1.2 Aspectos econômicos.....	21
2.1.3 Produção de etanol a partir do sorgo.....	24
2.2 Correlações.....	29
2.3 Análise de trilha.....	32
2.4 Multicolinearidade.....	36
3.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39
CAPÍTULO II - Estudos de análise de trilha para componentes de produção de etanol e produção de colmos por hectare a partir de Sorgo Sacarino (<i>SORGHUM BICOLOR</i> L. MOENCH).....	47
RESUMO.....	48
ABSTRACT.....	49
1.0 INTRODUÇÃO.....	50

2.0 MATERIAL E MÉTODOS.....	53
2.1 Coleta de dados.....	53
2.2 Local e data de execução do experimento.....	52
2.3 Tratamentos.....	54
2.4 implantação e condução do experimento.....	54
2.5 Variáveis tecnológicas analisadas.....	54
2.6 Variáveis agronômicas analisadas.....	56
2.7 Análises estatísticas.....	56
2.8 Análise de trilha para produção de etanol por hectare.....	56
2.9 Análise de trilha para produção de colmos por hectare sob multicolinearidade.....	57
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
3.1 Análise de trilha para produção de etanol por hectare.....	59
3.2 Análise de trilha para produção de colmos por hectare sob multicolinearidade.....	65
4.0 CONCLUSÕES.....	71
5.0 REFERÊNCIAS.....	72
ANEXOS.....	76

CAPÍTULO I

REFERENCIAL TEÓRICO

1.0 INTRODUÇÃO GERAL

O sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é cultivado amplamente ao redor do mundo para fins de produção de silagem e, a depender do país, também é utilizado na alimentação humana. É tolerante a cultivo sob condições ambientais adversas, tem pleno desenvolvimento em áreas tropicais e apresenta um baixo custo de produção, sendo este, inferior a outros grãos de importância como o milho (Landau e Martins Netto 2015).

No caso das variedades de sorgo do tipo sacarino, as plantas possuem a característica biológica de armazenar açúcares nos colmos de forma equivalente a cana-de-açúcar, tal fato indica que a produção de grãos não é o único valor comercial da espécie, sendo esta possível também de ser explorada com o intuito de produzir bioetanol. Por apresentar também um ciclo curto, rusticidade, e possibilidade de extração de caldo no mesmo maquinário utilizado para cana-de-açúcar, o sorgo demonstra ser uma opção interessante a ser cultivado na época de entressafra das usinas de cana, e assim colaborar com o rendimento anual das mesmas (Santos et al. 2015).

Em plantios realizados com variedades adequadas de sorgo sacarino para produção de biocombustível, em apenas um ciclo da cultura, é possível atingir índices de produtividade em torno de 2.400 litros por hectare, sendo produzidos a cada hectare 60 toneladas de colmo, e cada tonelada capaz de produzir 40 litros de etanol (Tabosa et al. 2019).

A atividade de cultivo de terras para produção de etanol exclusivamente com sorgo sacarino, também pode ser considerada viável economicamente, a depender da variedade escolhida e condições ambientais. O montante máximo do combustível possível de ser produzido por unidade de área por ano, é também expressivo nesse caso, visto a capacidade de cultivo de mais de um ciclo por ano, em decorrência da planta apresentar um ciclo fenológico curto que compreende um período de 3 a 4 meses (Dutra 2014).

Um estudo realizado pela Embrapa com a utilização de dados estabelecidos pela Embrapa Milho e Sorgo, referentes ao rendimento de sorgo sacarino, teve como objetivo avaliar a receita adicional por hectare gerada pela implantação do sorgo

sacarino na entressafra da cana-de-açúcar para produção de etanol, e como resultado foi indicado a grande possibilidade de alta rentabilidade com tal atividade, porém que esta sofre grande variação de acordo com a produtividade de biomassa e etanol atingida pelo sorgo em tal período (May et al. 2012).

Na quase totalidade dos países ao redor do mundo, bem como no Brasil, a dependência por combustíveis fósseis e por consequência seu consumo são altos. Tal fato é conflituoso com a intenção mundial de redução da emissão de CO₂ na atmosfera, na tentativa de assim reduzir seus impactos ambientais negativos. Outros dois pontos nada atrativos de tais combustíveis, são, sua origem ser de fonte não-renovável e seu constante aumento de preço nos últimos anos (Cunha e Severo Filho 2010).

O Brasil tem longo histórico e destaque mundial no que se trata da produção e consumo de bicomcombustíveis com ênfase maior para o etanol, tal fato se deve em grande parte ao programa nacional do álcool, que foi fundado em 1975, com o intuito de incentivo de tornar a matriz energética do país mais dependente de fontes renováveis, visto o aumento mundial do preço do petróleo (Ramos e Pelegrin 2019).

Visto a forma de exploração atual do Sorgo, os principais parâmetros de produtividade da cultura são variáveis agrônômicas que colaboram com a produção de grãos. Nos últimos anos, diversos estudos foram realizados para identificar os principais parâmetros de produtividade de grãos de sorgo, Akatwijuka, Rubaihayo e Odong (2019) e Subalakhshmi et al. (2019) destacaram os seguintes, dias para o florescimento, altura de planta, comprimento da panícula, largura e comprimento da folha, largura e comprimento da panícula, quantidade de folhas e panículas, diâmetro do caule, massa de 100 grãos.

A partir do momento em que uma cultura é explorada para uma nova finalidade seus componentes de produtividade podem ser alterados. Portanto alguns dos parâmetros supracitados, são substituídos por diversas variáveis tecnológicas que influenciam a quantidade e a composição do caldo extraídos dos colmos. Alguns estudos realizados por França (2015), Lombardi et al. (2015) e Kavya et al. (2020), destacam a importância da quantificação de diversas variáveis tecnológicas (teor de sólidos solúveis totais, teor de sacarose, teor de fibra no colmo, teor de açúcares totais recuperáveis, toneladas de colmo por hectare, peso de massa verde, peso do caldo,

sacarose no caldo e pureza aparente), nos estudos relacionados ao melhoramento genético da cultura realizado com finalidade de produção de etanol.

Para o desenvolvimento de novas variedades é interessante que se tenha a maior quantidade e grupo de informações possível acerca dos genótipos, bem como das variáveis analisadas. Estudos com o objetivo de obter o conhecimento do sentido e magnitude com que características relevantes estão correlacionadas, são fatores que contribuem na elaboração do plano estratégico a ser aplicado no decorrer de um determinado programa de melhoramento genético de plantas (Olivoto et al. 2017).

Avaliar a forma com que dados referentes a dois atributos de interesse distintos de uma planta variam conjuntamente, é de grande valia por parte dos pesquisadores. Coeficientes de correlações são índices numéricos que variam de -1 a 1 e dizem respeito ao grau e sentido com que um par de características em questão interagem entre si, sendo valores maiores que zero referentes a correlações positivas, menores que zero referentes a correlações inversas e o valor zero se refere a ausência de correlações. Tais coeficientes podem ser úteis na realização de seleção indireta para uma característica quantitativa complexa que sofre muita influência ambiental e por isso possui baixa herdabilidade, por meio da uma segunda característica de mensuração mais simples e que possua alta herdabilidade (Calegari-Jaques 2003, Coimbra et al. 2005, Silva et al. 2005).

Quando se pretende estudar a interferência de um grupo de variáveis explicativas em que uma é considerada como básica, e de maior importância para o estudo, o ideal é que seja realizado um estudo de análise de trilha, pois esta técnica permite partilhar os coeficientes de correlação entre os efeitos diretos que determinada variável exerce sobre tal característica considerada como principal, e efeitos indiretos exercidos via os outros caracteres do grupo avaliado, tais efeitos diretos e indiretos podem ser ainda quantificados de acordo com sua intensidade (Oliveira et al. 2010, Rios et al. 2012).

A multicolinearidade é o fenômeno caracterizado pela ocorrência de um alto grau de correlação existente entre o conjunto de variáveis consideradas explicativas em relação a uma variável dependente, resultando em erros padrões dos coeficientes de correlações elevados e por consequência, tornando a interpretação dos resultados de uma análise trilha muito complexa, e até mesmo pouco confiável (Kraha et al. 2012,

Haesbaert 2016). A partir da detecção da presença e grau de tal efeito em uma análise, se faz necessária a utilização de alguma estratégia para contornar os efeitos adversos da multicolinearidade (Carvalho et al. 2001).

Salla et al. (2015) e Zuffo (2020) foram capazes de realizar estudos de análise de trilha em que foi detectado a presença de algum grau de colinearidade, por meio da utilização de metodologias capazes de quantificar e contornar tal efeito negativo.

A produtividade é geralmente utilizada como exemplo ao se estudar a complexidade dos caracteres quantitativos, esta sofre grande influência por parte do ambiente e é resultado da convergência da ação de um número enorme de outros caracteres que são desconhecidos em sua totalidade (Khadakabhavi, Girish e Yashoba 2017, Mengesha et al. 2019, Subalakshmi et al. 2019). Com o atual interesse do cultivo de sorgo para fins de produção de etanol, esta característica quantitativa, passa a ser considerada como variável principal, em estudos realizados com a espécie, e outros parâmetros de produtividade, além dos convencionais serão destacados. (Ceccon, Teodoro e Santos 2017, Kavya et al. 2020).

O objetivo deste trabalho foi a realização de estudos análises de trilha em genótipos de sorgo sacarino, para quantificar a magnitude dos efeitos diretos e indiretos de variáveis tecnológicas (PMS, PCL, BRIX e EEC) sobre a produção de etanol e de variáveis agronômicas (AMP, FL, PMV e CL) sobre a produção de colmos por hectare.

2.0 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sorgo

2.1.1 Origem, classificação, aspectos morfológicos e bancos de germoplasma.

A maior variabilidade genética de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) está presente atualmente no continente africano, sendo este considerado como sendo o centro de origem primário da espécie, centros de origem secundários foram formados no continente asiático, devido à grande dispersão da espécie. O gênero *Sorghum* é dividido em cinco seções, *Stiposorghum*, *Parasorghum*, *Heterosorghum*, *Chaetosorghum* e *Sorghum*, sendo esta última seção responsável por compreender as espécies cultivadas ao redor do mundo. A classificação botânica completa do gênero é a seguinte, Divisão *Magnoliophyta*, Classe *Liliopsida*, SubClasse *Commelinidae*, Ordem *Cyperales*, Família *Poaceae*, Tribo *Andropogonae*, Gênero *Sorghum*. O sorgo sacarino é ainda pertencente à uma subespécie denominada *bicolor* (Santos, Casela e Waqui 2005, Ferreira 2015, França 2015).

Em uma classificação do ponto de vista agrônomo as variedades de sorgo podem se enquadrar nas seguintes categorias: granífero, sacarino, forrageiro, vassoura, energia e duplo-propósito. Tal classificação diz respeito a finalidade do plantio, bem como o produto final a ser obtido. O sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench $2n = 20$ cromossomos) possui a característica de acumulação de açúcares em seus colmos similarmente à cana-de-açúcar e pode ser cultivado para produção de etanol (Ferreira 2015, Tabosa et al. 2019).

O sorgo é uma espécie que apresenta folhas alternadas em que o comprimento varia de acordo com o genótipo, bem como a altura das plantas (0,4 a 5 metros). Se reproduz majoritariamente por autofecundação das flores completas, sendo considerada uma planta autógama com baixa incidência de alogamia. As flores são dispostas em inflorescências do tipo panícula. O tipo de fruto gerado é cariopse de colorações distintas a depender da variedade (Figura 1) (Oliveira 2015).



Figura 1. Vista parcial da variedade de sorgo duplo propósito IPA 2502 no agreste semiárido de Pernambuco (Tabosa et al. 2019).

As plantas da variedade sacarino, apresentam panículas com baixa produção de grãos e a altura comumente é maior que 3 metros. A parte comercial da planta são os colmos que tem a particularidade de acumular alto índice de açúcares de forma similar a cana-de-açúcar (Figura 2) (Tabosa 2020).



Figura 2. Vista parcial de sorgo forrageiro apresentand colmo isoporizado (A) e colmo de sorgo sacarino com aspecto succulento (B) (Tabosa 2020).

A Embrapa Milho e Sorgo é detentora do mais importante banco de germoplasma da espécie para o país, possuindo um total de 7.213 acessos de sorgo, no estado Pernambuco o IPA possui o banco de maior relevância (Tabela 01). A nível mundial, os seguintes bancos tem maior destaque, NCGRP (National Center for Genetic Resourcer Preservation) pertencente ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos e ICRISAT (Internacional Crop Research Institute for the Semiarid Tropics) que se encontra localizado na Índia (França 2015, Tabosa et al. 2019).

Tabela 01. Acessos de sorgo introduzidos e obtidos do Programa Melhoramento do IPA/PE e atualmente no Banco Ativo de Germoplasma, 2010/2011 (Tabosa et al. 2019).

Natureza do Material	Origem	N° de acessos	Ano
Introduzido (linhagens) ⁽¹⁾	<u>EUA</u>		
	Purdue	20	1973/74
	Texas A&M	15	1973/74
	Kansas	14	1973
	Fort Collins	9	1973
	USAID	11	1973/75
Linhasgens ⁽¹⁾	<u>EMBRAPA</u> Via ICRISAT	38	1974/86
	(Índia)		
	<u>ÁFRICA</u>		
	Uganda	13	1973
	Etiópia	17	1973
	Sudão	15	1974/86
	Nigéria	30	1974/86
Variedades selecionadas/obtidas	<u>IPA-PE</u>	130	1986/2006
Variedades em processo de seleção (Progênes) ⁽²⁾	IPA-PE	390	2007/2011
Total		702	

(1) Materiais periodicamente multiplicados e armazenados em câmara fria.

(2) Método de genealógico (Pedigree; ICRISAT – International Crop Research of Semiarid Tropic)

2.1.2 Aspectos econômicos

Os biocombustíveis são fontes de energia que vem recebendo grande interesse mundialmente, tanto por parte dos consumidores, quanto por parte dos produtores, o

que caminha juntamente com o número de realizações de trabalhos de pesquisa em tal área. Os pontos principais de tais combustíveis são o fato de serem advindos de fontes renováveis, e quando comparados a combustíveis fósseis, apresentarem menor custo e menor impacto ambiental (Santos et al. 2015).

Há uma intenção mundial de redução de combustíveis derivados do petróleo e o Brasil se enquadra neste cenário. Nesta busca por uma matriz energética mais sustentável, o país já está localizado em uma posição satisfatória em relação à média mundial, visto que a porcentagem de energia produzida, advinda de fontes renováveis ser relevante no país. No que se refere especificamente a produção de biocombustíveis, no Brasil é produzida uma quantidade considera alta, sem que a produção de alimentos seja prejudicada (Pacheco 2011).

Devido a criação de um projeto para incentivar a produção e consumo de biocombustíveis o Proálcool (Programa Nacional do Álcool) no ano de 1975, o Brasil tem longo histórico e destaque mundial no que se refere a utilização de etanol como combustível, a partir da época de criação desse decreto o país passou a ser mais dependente de fontes renováveis de energia. O foco inicial do projeto foi a produção de bioetanol anidro, para vir a ser misturado com a gasolina. Com o advento da tecnologia de fabricação de veículos capazes de utilizar unicamente o etanol como combustível, o Brasil se tornou em 1985, o país com maior frota deste tipo de veículo ($\cong 4.000.000$) (Silva, Migot e Silva 2019).

Em decorrência da vigência do Proálcool e visto as possibilidade de produção de biocombustível a partir do Sorgo Sacarino, seu cultivo passou a ser realizado de forma mais expressiva no país. Também contemporâneo ao Proálcool houveram avanços significativos melhoramento genético da cultura d sorgo e em meados da década de 80 foram lançadas pela Embrapa cinco variedades com capacidades produtivas superiores a 40 toneladas de colmo por hectare e teor de sólidos solúveis totais de 18 a 20° BRIX (BR 500, BR 501, BR 502, BR 503, BR 504 e BR 505), posteriormente foram lançados três materiais (variedade BRS 506 e híbridos BRS 601 e RS 602) que são produzidos até os dias atuais devido ao seu alto potencial produtivo e se encaixam na categoria de duplo propósito (forrageiro e sacarino) (Slano 2016, Coelho 2017).

Segundo Tabosa et al. (2019) a capacidade produtiva média de etanol dos genótipos de Sorgo Sacarino é de aproximadamente 40 L/tonelada de colmo e a produção de colmos é em torno de 60 toneladas por hectare. Tais estimativas variam de acordo com as variáveis tecnológicas e agronômicas dos genótipos e também ao ambiente ao qual são submetidos.

Em ensaios realizados no ano 1986, a cultivar de sorgo forrageiro de colmo sacarino IPA 467 – 42 apresentou sob condições de sequeiro (345 mm de chuva no ciclo), a produtividade de 126 t/ha de matéria verde e 50 t/ha de matéria seca (Carvalho e Aragão 1989). Em Condé de São Francisco – SE, cultivos de sorgo forrageiro/sacarino (variedade SF 15), atingiram sob condição irrigada, os valores de produção de 194 t/ha de matéria verde e 58 t/ha de matéria seca (Tabosa et al. 2010).

Em estudos realizados com seis variedades de sorgo sacarino (SF15, IPA-467, Theis, Roma, Rio e Ramada) em diferentes locais do semiárido brasileiro, Tabosa et al. (2019), obteve valores de produção de colmo de 60t/ha com o genótipo SF15 e produção de caldo por hectare em torno de 24.000 com as variedade SF15 e Theis.

Em um estudo em realizado por Emygdio et al. (2011) com Sorgo para produção de etanol, as variedades Wray e BR 506 apresentaram respectivamente valores de 20.000 e 30.000 litros de caldo por hectare.

Há uma escassez de dados a respeito da produção de etanol a partir do Sorgo devido a cultura ser pouco explorada para tal finalidade. Os dados divulgados anualmente pelo IBGE e CONAB são referentes a produção de grãos, que é expressiva. Segundo Coelho (2017) na safra 2011/2012 (novembro-dezembro/março-abril) o total de área plantada no Brasil com Sorgo do tipo sacarino foi de aproximadamente 20.000 hectares.

No ano de 2018, o volume total de etanol produzido no Brasil foi de 30,1 milhões de m³, a maior produção atingida nos últimos 10 anos (tabela 02). A região brasileira produtora que mais contribuiu com este volume foi a região Sudeste, 19,7 milhões de m³ produzidos, sendo o estado de São Paulo responsável por 16,2 milhões de m³ dessa produção. A região Nordeste fica em terceiro lugar no ranking das regiões brasileiras, no referido ano foram produzidos 2 milhões de m³, dos quais 465,5 mil, foram oriundos do estado de Pernambuco (ANP 2019).

Tabela 02. Etanol produzido em milhões de m³ em regiões do Brasil entre os anos de 2010 e 2018. (ANP 2019).

Local	Produção de etanol (milhões m ³)								
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Brasil	28,2	22,89	23,76	27,53	28,22	30,0	28,69	28,59	33,06
Pernambuco	0,40	0,37	0,33	0,25	0,34	0,44	0,35	0,28	0,47
Região									
Norte	0,06	0,17	0,21	0,24	0,24	0,25	0,21	0,24	0,21
Nordeste	1,82	1,94	1,74	1,53	1,84	2,17	1,51	1,42	2,01
Centro-oeste	5,71	5,17	6,15	7,29	7,75	8,84	8,40	9,00	9,52
Sudeste	18,87	14,21	14,35	17,00	16,80	17,27	17,10	16,69	119,70
Sul	1,7	1,40	1,30	1,47	1,58	1,47	1,48	1,29	1,63

Mesmo o Brasil tendo uma produção significativa de etanol, ainda importa esse produto, em sua maior parte dos Estados Unidos, porém os seguintes volumes de importação e exportação, 1,8 e 1,7 milhão de m³, no ano de 2018 foram equivalentes. Quando comparados aos dados ano de 2017, o percentual de importação reduziu (2,8%) e o percentual de exportação aumento significativamente (17,9%). O país responsável pela importação do maior volume de etanol que é produzido e exportado pelo Brasil é os Estados Unidos, tendo importado um total de 933,2 mil m³ em 2018 (ANP 2019).

2.1.3 Produção de etanol a partir do sorgo

A característica morfológica do sorgo de possuir colmos capazes de armazenar grandes quantidades de açúcares, o torna passível de ser utilizado para produzir etanol, a partir da extração e posterior fermentação do caldo presente nos colmos de forma similar a cana-de-açúcar (Tabela 03). Para que seja viável economicamente a produção deste biocombustível a partir do sorgo, o mesmo deve apresentar certos índices de variáveis tecnológicas relacionados com a quantidade e composição do caldo possível de ser extraído. Em diversos estudos realizados com a espécie, já foram obtidos resultados satisfatórios, com índices semelhantes aos obtidos em cana-de-açúcar, cultura usada como referência para produção de etanol (Durães, May e Parrelha 2012).

Tabela 03. Características agronômicas e produtivas entre culturas de sorgo sacarino e a cana-de-açúcar para produção de etanol (Silva 2017).

Parâmetros	Sorgo Sacarino	Cana-de-açúcar
Tipo de plantio	Propagação por sementes	Propagação vegetativa
Tempo de ampliação do plantio	Menor	Maior
Áreas marginais	Cultivada em áreas marginais	Limitada em áreas marginais
Ciclo de crescimento	3 a 4,5 meses	9 a 18 meses
Água utilizada (L de água/Kg de biomassa seca)	300	600
Produção de etanol (mil L há ⁻¹ mês ⁻¹)	0,75 a 0,9	0,58 a 0,62
Produção de biomassa (t há ⁻¹)	60	80 a 85

Segundo May et al. (2012), para que seja justificado o custo industrial envolvido na produção de etanol em contrapartida com o lucro possível de ser obtido, uma das primeiras variáveis tecnológicas a ser investigada, é a porcentagem de açúcar total recuperável contida no caldo extraído nos colmos, que deve apresentar o valor mínimo de 12,5%, em estudos realizados com genótipos de sorgo sacarino a amplitude com que tal variável tecnologia é mensurada vai de 13,0 a 20,0% (Tabela 03).

Tabela 04. Análise comparativa de caldo, colmo e bagaço entre sorgo sacarino e cana-de-açúcar (Durães, May e Parelha 2012).

Análise de caldo	Sorgo Sacarino	Cana-de-açúcar
Quantidade (kg/t de colmo)	370 - 660	600 - 800
Brix	15,0 - 21,0	18,0 - 21,0
Sacarose (%)	8,0 - 17,5	15 - 18,0
ATR (%)	13,0 – 20,0	16,0 – 19,0
Pureza (%)	55 - 80	80 - 90
Relação Sacarose/Redutores	1,0 – 8,5	15,0 – 18,0
Análise do colmo	Sorgo Sacarino	Cana-de-açúcar
Sacarose	4,0 – 13,0	12,0 – 16,0
ATR (%)	11,5 – 16,5	13,0 – 17,0
Fibra (%)	10,0 – 19,0	9,0 – 13,0
Composição do bagaço	Sorgo Sacarino	Cana-de-açúcar
Lignina (%)	11,90	20,50
Pentosanas (%)	26,90	26,35
Celulose	46,57	47,70

Devido ao seu ciclo fenológico curto (entre 3 e 4 meses), possibilidade de ser colhido mecanicamente, alto potencial de produção energética, bem como sua capacidade de tolerar ser cultivado em condições ambientais adversas como baixa disponibilidade hídrica, o sorgo sacarino se faz uma ótima escolha de espécie a ser cultivada na entressafra da cana-de-açúcar, em usinas que em tal período as áreas de cultivo não são utilizadas (Tabela 05). Com isso, é possível obter um maior aproveitamento das instalações industriais voltadas para produção do etanol, bem como aumento do lucro obtido por hectare/ano e ainda é realizada uma rotação de culturas que traz diversas vantagens para o ecossistema de cultivo (Tabela 06) (Durães, May e Parrelha 2012, May et al. 2012, Santos et al. 2015).

Tabela 05. Comparativo entre o sorgo sacarino, cana-de-açúcar e milho para produção de etanol.

Parâmetro	Sorgo Sacarino	Cana-de-açúcar	Milho
Ciclo	4 meses	12 meses	4 meses
Requerimento hídrico	4.000 m ³	36.000 m ³	8.000 m ³
Produção de grãos	2 t/ha	-	3,5 t/ha
Etanol do grão	760 L	-	1.400 L
Produção de colmos	35-40 t/ha	75-80 t/ha	20-30 t/ha
Etanol do colmo	1.400 L	5.600 L	-
Etanol do resíduo	1.000 L/ha	3.325 L/ha	1.816 L/ha
Etanol total	3.160 L/ha	8.925 L/ha	3.216 L/ha
Óleo	-	-	140 L/ha
Vinhaça/ restolho	4 t/ha	13 t/ha	t/ha

Tabela 06. Lucratividade por hectare do sorgo sacarino cultivado no período de entressafra da cana-de-açúcar, em relação ao rendimento de biomassa e etanol.

		Rendimento de biomassa em toneladas por hectare				
		-	Baixo (40)	Médio-baixo (50)	Médio-alto (60)	Alto (80)
Rendimento de etanol em litros por tonelada de biomassa	Alto (40)		R\$ 1426,97	R\$ 3.019,14	R\$ 3.815,23	R\$ 5.009,36
	Médio-alto (60)		R\$ 405,37	R\$ 1.486,74	R\$ 2.027,43	R\$ 2.838,46
	Médio-baixo (70)		-R\$ 105,43 R	R\$ 720,54	R\$ 1.133,53	R\$ 1.753,01
	Baixo (85)		-R\$ 616,23	-R\$ 45,66	R\$ 239,63	R\$ 667,56

Após a colheita dos colmos, é procedido o processamento e transporte deste material vegetal para uma unidade industrial para obtenção do produto final (etanol), para isso, o caldo é extraído, preparado e destilado, tais processos são complexos e englobam diversas etapas (moagem, difusão, análise de POL, retirada de impurezas, clarificação, decantação, preparo do mostro, preparo do inóculo, condução de fermentação, rendimento, controle de contaminações, processo fermentativo, separação do fermento e por fim, a destilação). No que se refere a realização desse processo industrial para produção de etanol a partir de sorgo e cana-de-açúcar, estes

se dão de maneira similar (Figura 3), sendo assim as mesmas instalações industriais podem ser utilizadas para as duas espécies citadas, a única diferença significativa entre os processos está associada a clarificação do caldo, que por vezes quando extraído do sorgo se faz necessária a utilização de uma maior quantidade de agente clarificante (May et al. 2012).

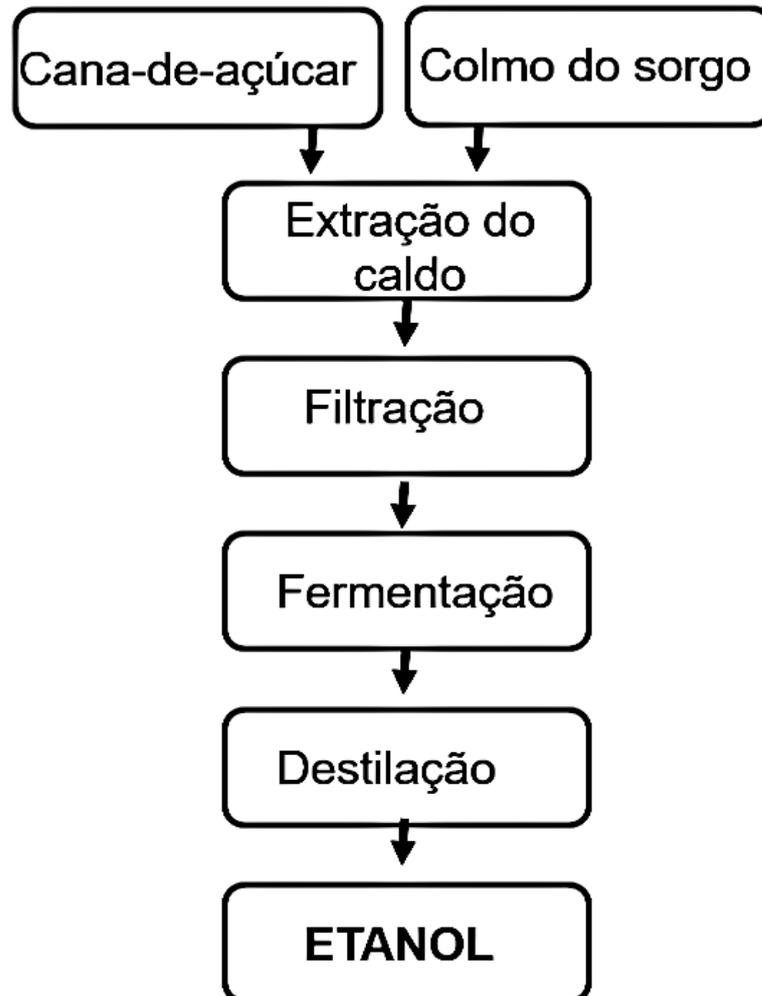


Figura 3. Fluxograma simplificado de etapas de obtenção do etanol a partir de cana-de-açúcar e sorgo (Cunha e Severo Filho 2010).

As pesquisas realizadas com sorgo para finalidade de produção de etanol encontram-se ainda, em número reduzido ou em estágios iniciais, e este fato aliado a grande variabilidade genética presente entre o conjunto de cultivares de sorgo, dá um forte indicativo de que mesmo tal espécie já apresentando uma produção rentável deste biocombustível, tal potencial produtivo ainda pode ser expressivamente elevado com o auxílio do melhoramento genético (Santos et al. 2015).

2.2 Correlações

As diversas características de uma planta podem estar correlacionadas, e apresentarem influência mútua. A natureza destas relações sempre foi alvo de estudos e atualmente considera-se que tais relações são resultado de um somatório de ações de efeito ambiental e causas genéticas como pleiotropia e desequilíbrio de ação gênica. Cada tipo de correlação pode sofrer maior ou menor influência de cada uma das ações citadas anteriormente (Amorin et al. 2008, Entringer et al. 2014).

A correlação entre variáveis mensuráveis de uma planta pode ser estimada e, esta, diz respeito a maneira como os valores atribuídos a dois ou mais caracteres distintos variam conjuntamente, bem como a detecção de algum grau de associação entre eles e também a sua quantificação (Azevedo et al. 2016).

O estudo da forma de como um determinado grupo de variáveis interagem entre si tem grande valor em estudos científicos de diversas áreas do conhecimento (Santos et al. 2008). A possibilidade do entendimento das correlações existentes entre vários caracteres inerentes aos vegetais, sejam eles de natureza biológica, morfológica, química, física, fisiológica, agrônômica ou até mesmo tecnológica, é de grande interesse para pesquisadores que executam trabalhos relacionados com o melhoramento genético de plantas. Os resultados de estudos realizados com o objetivo de investigar essas relações, para descobrir quais caracteres estão correlacionados e em que grau, podem contribuir positivamente para a obtenção de genótipos superiores, visto que, estes tem a capacidade de otimizar algumas etapas necessárias para que ocorra o lançamento de uma nova variedade (Leite et al. 2016, Dalchiavon et al. 2016, Nardinho et al. 2016).

Tais estudos podem auxiliar no entendimento de caracteres quantitativos ou até mesmo, possibilitar a realização de seleção indireta por meio da avaliação de uma característica mais facilmente mensurável que está altamente correlacionada a outro caractere de grande importância para a cultura em questão, porém que é de difícil mensuração, bem como a realização de seleção precoce, mas nesse caso a vantagem é possibilidade de mensuração de uma variável que é expressa em estágios fenológicos iniciais e está correlacionada com a produtividade final da planta (Alvez et al. 2016; Dalchiavon et al. 2016, Silva et al. 2016).

No que se refere a um par de variáveis, a natureza de sua interação pode se dar de 3 formas distintas. Sendo a primeira, a interação nula (não ocorrência de interação), nesse caso quando os dados das duas variáveis são observadas em conjunto, o seu pareamento tem um comportamento aleatório, não sendo possível identificar um direcionamento de interação, sendo assim uma característica não tem correlação significativa com a outra. Quando o pareamento destas variáveis ocorre de maneira lógica, a ponto de ser possível identificar que os maiores valores da variável 1 são pareados com os maiores valores da variável 2, e o mesmo acontece quando se trata dos menores valores, se entende que há uma correlação positiva entre as variáveis 1 e 2. A última forma de interação é a interação negativa, onde o pareamento dos dados das variáveis ocorrem de maneira inversa, ou seja, os menores valores da variável 1 são pareados com os maiores valores da variável 2, e conseqüentemente os maiores valores da variável 1 são pareados com os menores valores da variável 2 (Zimmermann 2014).

O coeficiente de correlação entre duas variáveis X e Y pode ser estimado por meio seguinte expressão (Santos et al. 2014):

$$r = \frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{Var(X)*Var(Y)}} \quad -1 \leq r \leq 1$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 \right]}}$$

A observação de correlações negativas entre variáveis estudadas, não necessariamente significam um resultado adverso pois, este coeficiente diz respeito a como o aumento do valor atribuído a uma característica implica na diminuição da quantificação de uma outra. Essa relação inversamente proporcional é desejada quando, um dos focos do programa de melhoramento é atenuar algum atributo da planta, a exemplo de obtenção de plantas de menor porte, para que se possa aumentar a quantidade de plantas por hectare, ou para adequação a um sistema de

colheita mecanizado, outros exemplos são ocorrência de sintomas patogênicos, presença de espinhos ou deformidades, quantidade de frutos e flores abortados, visto que estes se correlacionam negativamente com a produtividade final .

Para que ocorra a quantificação correta da correlação entre duas características, e sua posterior interpretação e análise, se faz necessário a aplicação de diversas técnicas, métodos, fórmulas e equações, sendo seu conjunto, denominado análise de regressão, e com isso é esperado que exista uma função f capaz de expressar a influência de certa variável 1 exercida sobre, certa variável 2 (Santos et al. 2008).

Como resultado de estudos de correlação, se tem a obtenção de um coeficiente numérico que diz respeito ao grau de associação, seja ele positivo ou negativo, entre os caracteres avaliados. Sendo assim quanto maior for o valor atribuído ao coeficiente de correlação linear entre um par de variáveis, maior será a intensidade da interdependência das mesmas (Nunes 1998).

Os coeficientes de correlação variam de -1 a 1, os valores extremos deste intervalo, são referentes respectivamente, a maior correlação negativa possível e maior correlação positiva possível entre duas características, e o valor de zero é atribuído a não ocorrência de correlação (Zimmermann 2014).

Callegari-Jacques (2004) classifica a magnitude dos graus de correlações de acordo com o valor modular $|r|$ de seus respectivos coeficientes numéricos nas seguintes seis categorias, nula ($|r| = 0$), fraca ($0 < |r| \leq 0,3$), regular ($0,3 < |r| \leq 0,6$), forte ($0,6 < |r| \leq 0,9$), muito forte ($0,9 < |r| < 1$) e perfeita ($|r| = 1$).

Quando são estimadas as correlações de cada par de características de um determinado grupo, esses resultados são organizados de certa maneira que resulta em uma matriz de correlação (Figura 4). Tal matriz contém os valores de correlação de cada variável da planta, com todas as outras variáveis mensuradas (Santos et al. 2008).

$$C = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{z1} & r_{z2} & \dots & r_{zn} \end{vmatrix}$$

Figura 4. Matriz de correlação do grupo de variáveis (r_1, r_2, \dots, r_n). Em que $r_{zn} = r_{nz}$ (SANTOS et al. 2008).

A mensuração de uma variável biológica é realizada a partir da observação de seu fenótipo, e este, é resultado da contribuição de fatores genéticos, fatores ambientais e da interação genótipo x ambiente, este último é difícil estimar, porém é possível particionar a variação fenotípica de uma característica em variância genotípica e variância ambiental (Azevedo et al. 2016, Silva et al. 2016).

Então a partir das variâncias supracitadas, podem ser formadas, as matrizes de correlações fenotípicas, genotípicas e ambientais, separadamente (Cruz 2006). Com isso, é possível se ter um entendimento mais aprofundado das correlações, e até mesmo, uma maior confiabilidade dos resultados, quando se é possível obter a matriz de correlação genotípica.

Visto a grande importância deste assunto para o fitomelhoramento, vale ressaltar que, com a utilização de metodologias e técnicas adicionais, o estudo das interações entre as diversas características da planta, pode ser ainda mais complexo, podendo ser extraídas, importantes informações adicionais acerca da complexidade destas correlações. Segundo Cruz, Regazzi e Carneiro (2014) uma dessas técnicas é a análise de trilha que pode ser utilizada para estudar a correlação entre diversas características e quantificar o efeito direto e indireto que uma variável x exerce sobre uma variável y , desdobrando a correlação existente entre as mesmas.

2.3 Análise de trilha

De acordo com Kavya et al. (2020) a técnica denominada de *path analysis* ou análise de trilha foi desenvolvida por Wright (1921) e é capaz de particionar os coeficientes de correlações entre efeitos diretos e indiretos, a partir de equações de regressão previamente padronizadas. Tal técnica então pode ser aplicada para que

ocorra uma compreensão mais aprofundada por parte dos pesquisadores, das inter-relações presentes em um grupo que contenha no mínimo três variáveis, sendo uma destas, estudada como dependente, e as restantes como independentes (Moreira et al. 2013, Ceccon, Teodoro e Santos 2017).

Como resultado da referida análise se é obtido a correlação total de cada característica considerada como sendo explicativa com uma variável que é considerada como sendo base, e cada um destes coeficientes é subdividido entre o efeito direto exercido sobre a variável principal e o efeito indireto exercido via cada uma das variáveis explicáveis restantes (Prasad e Sridhar 2019).

De acordo com Beiguelman (2002) para a obtenção dos resultados acima citados, é aplicado o seguinte modelo de regressão múltipla:

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots + b_nX_n$$

Em que:

Y = estimativa da variável principal;

a = interceção múltipla;

X_1 a X_n = variáveis explicativas;

b_1 a b_n = coeficientes de regressão.

Segundo Cruz, Regazzi e Carneiro (2014) considerando uma variável dependente r e conjunto de duas variáveis (i e j), como explicativas, para entender o efeito direto de i sobre r e o efeito indireto de j via i sobre r , o modelo estatístico é o seguinte:

$$r_{oi} = p_i + \sum_{j \neq i}^n p_j r_{ij}$$

em que:

r_{oi} : correlação entre a variável principal e a i -ésima variável explicativa;

p_i : efeito direto da variável i sobre a principal;

$p_j r_{ij}$: efeito indireto da variável i , via variável j , sobre a principal.

Dentre as respostas possíveis de serem obtidas com estudos de análise de trilha, está a possibilidade de formação de diagramas (Figura 5) capazes de ilustrar

os efeitos diretos e indiretos que certo grupo de variáveis explicativas exerce sobre uma variável dependente (Cruz, Regazzi e Carneiro 2014).

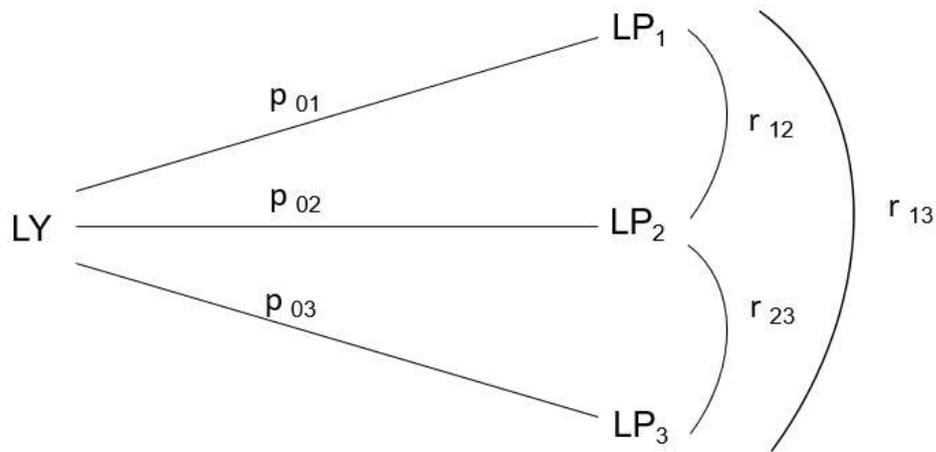


Figura 5 Diagrama causal ilustrativo dos efeitos diretos e indiretos das variáveis LP₁, LP₂ e LP₃ sobre LY (Cruz, Regazzi e Carneiro 2014).

A variável escolhida como principal na realização de uma análise de trilha, além de ser majoritariamente de grande importância para a cultura em estudo, também é geralmente quantitativa e por vezes de difícil mensuração. Sendo esta, a que se pretende ser melhor compreendida, e as variáveis secundárias ou explicativas, consideradas como componentes de produção que são estudados com o intuito de entender em que grau influenciam separada e conjuntamente a variável principal (Cruz, Regazzi e Carneiro 2014).

Segundo Subhashini et al. (2019) a produtividade se enquadra nos critérios citados, sendo extremamente complexa por ser resultado da atuação conjunta de uma expressiva quantidade de características, denominadas de componentes de produção.

Uma parte significativa da realização dos estudos de análise de trilha, tem o objetivo de entender as correlações e efeitos diretos e indiretos, que, as mais variadas características do vegetal, sejam elas, biológicas, morfológicas, agrônômicas, tecnológicas, físicas ou químicas, exercem sobre a produção final da cultura. A depender da espécie e parte da planta que virá a ser considerada como produto final, a produtividade é quantificada a partir dos frutos, grãos, sementes, flores, colmos, raiz, caule, matéria verde total, matéria seca total, etc (Silva et al. 2016, Aye e Htwe 2019,

Sánchez et al. 2019). No caso específico do sorgo os estudos de análises de trilha foram realizados majoritariamente com o intuito de melhor entender a produção de grãos e mais recentemente a produção de etanol (Srivastava et al. 2019, Kavya et al. 2020).

Por meio dos estudos e análises citados, diversos autores em experimentos realizados com as mais variadas culturas de importância econômica, já foram capazes de quantificar a correlação de conjuntos de características considerando a produtividade com sendo a principal. Sendo os seguintes, alguns exemplos recentes, Vian et al. (2016) em experimentos realizados com a cultura do milho, Vesohosk et al. (2011) em trigo, Freitas et al. (2019) em feijão-caupi, Souza et al (2015) em soja, Rezende e Silva (2015) em alho, Rocha et al. (2020) em arroz, Silva et al. (2016) mamão e finalmente na cultura do sorgo, Endalamaw, Adugna e Mohammed (2017), Figueiredo Junior, Schaffert e Parelha (2018), Mengesha et al. (2019) e Singh, Gangwar e Chaudhary (2019).

Uma melhor compreensão de caracteres tecnológicos complexos, que são tangentes a produtividade e qualidade final do produto comercializado, é um objetivo incomum no melhoramento genético de distintas espécies de importância econômica, sendo os estudos de análises de trilha passíveis de serem utilizados como ferramenta para tal finalidade. Os resultados de tais análises são de suma importância para os programas de melhoramento genético, visto que, auxiliam na escolha das variáveis mais importantes de serem mensuradas nas etapas de seleção, bem como na realização de seleção precoce e seleção indireta. Podem ser incluídas neste contexto, determinadas espécies de plantas frutíferas, em que um entendimento mais aprofundado acerca da qualidade organoléptica dos frutos gera significativo interesse por parte dos melhoristas por ter relação com a qualidade final do mesmo, o café onde é buscada uma melhor compressão das variáveis aroma e sabor dos grãos, e no contexto do sorgo, melhor compreensão a respeito da capacidade de produção de etanol por hectare (Viana et al. 2015, Noia 2017, Figueiredo Junior, Schaffert e Parelha, 2018).

Visto a grande riqueza de informações possíveis de serem extraídas dos bancos de dados gerados a partir da realização de análises de trilha, é válido ressaltar sua aplicabilidade prática em programas de melhoramento genético de plantas. Segundo

Simiderle et al. (2019) e Sousa et al. (2019) a identificação de altos valores de coeficientes de correlação positivos entre dois ou mais caracteres de interesse, pode permitir a realização de programas de melhoramento com o objetivo de ganho genético nestas variáveis simultaneamente.

Kurek et al. (2001) e Pedroso et al. (2009) destacam que, no processo vagaroso e trabalhoso de obtenção de novas variedades de plantas, a identificação correta e posterior seleção de genótipos superiores é uma atividade de difícil execução, visto que, geralmente em programas de melhoramento o objetivo é a obtenção de ganho genético em caracteres quantitativos com alta influência ambiental. Segundo Paziani et al. (2019), Meira et al. (2019) e Morello et al. (2020) seleção indireta é uma técnica que visa alcançar estes objetivos, a partir da mensuração de características menos complexas, com alta herdabilidade, sendo possível o conhecimento da natureza e grau da interação entre essas características, um índice de seleção pode ser estimado, em que a aqueles caracteres mais correlacionados positivamente com o objetivo principal, são atribuídos maiores pesos e vice-versa.

A seleção precoce pode ser definida como uma metodologia que visa encurtar o tempo de avaliação em campos experimentais, por meio da avaliação de características observadas em fase de desenvolvimento inicial das plantas. Tal definição é tangente ao conceito de seleção indireta, porém nesse caso a dificuldade se encontra no tempo necessário a ser decorrido para que a variável de interesse seja expressa e possa vir a ser mensurada, a exemplo da produtividade, que em culturas anuais ocorre apenas ao final do ciclo fenológico, e em culturas perenes, somente após um longo período de fase vegetativa (Moreira 2016, Condé 2019).

2.4 Multicolinearidade

Por vezes na decorrência de realização de uma análise de trilha é observado que as características avaliadas são fortemente correlacionadas, este fenômeno é denominado de multicolinearidade, e causa um enviesamento dos dados da análise (Figura 6) (Daouid 2017).

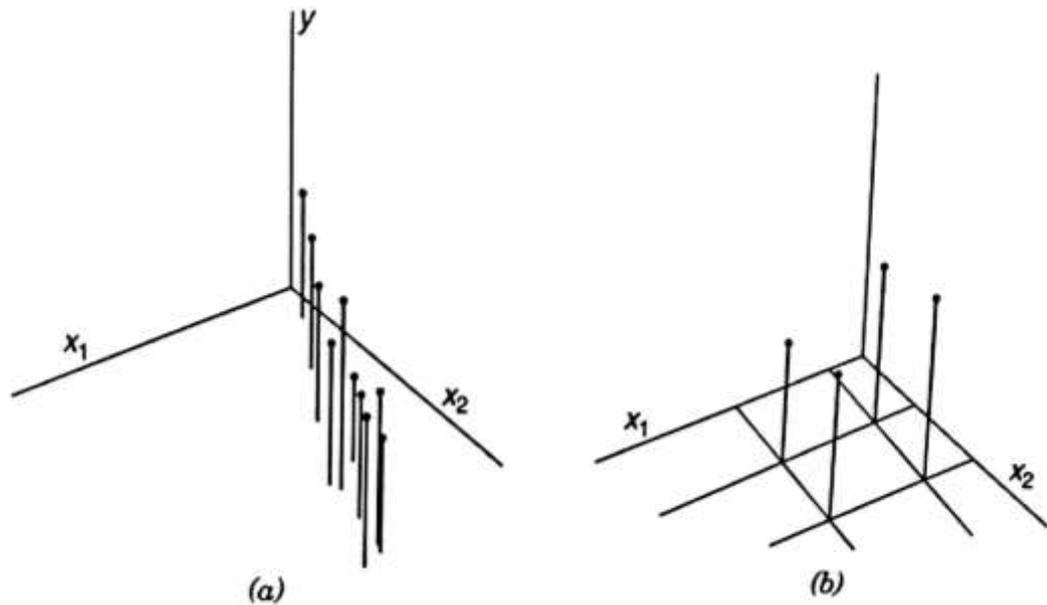


Figura 6. (a) Presença de multicolinearidade; (b) Ausência de multicolinearidade.

Quando a presença de tal efeito é detectada em uma análise, os resultados da mesma irão destoar dos coeficientes de correlação adequados que condizem com as explicações biológicas ligadas as características analisadas. A multicolinearidade pode estar presente em muitos níveis, e quanto maior for o seu grau, menor a confiabilidade que pode ser atribuída aos resultados obtidos (Olivoto et al. 2017).

Dentre as maneiras de detectar e quantificar a multicolinearidade existente em um conjunto de dados analisados, um método denominado de exame do número de condição da matriz de autovalores tem sido bastante empregado em estudos recentes de análise de trilha (Haesbaert 2016, Sari et al. 2018).

Segundo Montgomery e Peck (1981), o número de condição referente a de matriz de correlação $X^T X$, pode ser utilizado para indicar a magnitude da multicolinearidade, conforme a seguinte classificação, presença de multicolinearidade fraca ($NC < 100$), presença de multicolinearidade moderada a forte ($100 < NC < 1000$) e presença de multicolinearidade severa ($NC > 1000$).

Segundo Ray-Mukherjee et al. (2014), a regressão linear múltipla pode ser entendida como um modelo capaz de auxiliar no entendimento da interferência de uma variável independente sobre uma variável considerada dependente, isto é realizado com a extensão de regressões lineares simples. Tal técnica é bastante utilizada para esclarecer a relação vigentes entre distintos caracteres que sofrem interferência de natureza biológica, visto a alta complexidade destes.

A análise de trilha é realizada a partir de preceitos convergentes com os da regressão múltipla, sendo necessário então, estabelecer um modelo que seja adequado para este tipo de regressão. Podem ser realizados testes para identificar qual ou quais características estão gerando a multicolinearidade no modelo. Em alguns casos, é viável para o pesquisador que na análise dos dados, se proceda a eliminação de uma ou até mesmo duas variáveis responsáveis pela geração de forte colinearidade. Então a partir do estabelecimento de um novo modelo de regressão múltipla sem a inclusão dos dados de tais caracteres, o problema da presença de multicolinearidade pode vir a ser resolvido e resultados com maior nível de precisão podem ser obtidos (Carvalho et al. 1999, Olivoto et al. 2017).

Não sendo interessante a exclusão de variáveis causadoras de multicolinearidade, devido a importância de sua inclusão no estudo, a aplicação de um método descrito por Carvalho (1995) a partir da adaptação de uma metodologia denominada Regressão em Cristas ou cumeira proposta por Horel e Kennard (1970), é capaz de atenuar os efeitos de multicolinearidade a partir da adição de uma constante k na diagonal da matriz de correlação $X'X$ das características estudadas.

Azevedo et al. (2016) e Zuffo et al. (2020) realizaram análises de trilha com a aplicação de uma constante K na matriz de correlação, metodologia denominada de análise em crista para contornar amenizar os efeitos de colinearidade entre os dados. Moreira (2013), Salla et al. (2015) e Blind et al. (2018) optaram por reduzir o grau de tal efeito a partir da identificação e posterior exclusão das variáveis mais causadoras de multicolinearidade da análise.

3.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (2019). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2019**. Rio de Janeiro, 2019.
- Akatwijuka R, Rubaihayo PR e Odong TL (2019) Correlations and path analysis of yield traits in sorghum grown in southwestern highlands of uganda. **African Crop Science Journal 27**: 437-444.
- Alvez BM, Cargnelutti Filho A, Burin C e Toebe M. (2016) Correlações canônicas entre caracteres agronômicos e nutricionais proteicos e energéticos em genótipos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo 15**: 171-185.
- Amorin EP, Ramos NP. Ungaro MG e Kihl TAM (2008) CORRELAÇÕES E ANÁLISE DE TRILHA EM GIRASSOL. **Bragantia 67**: 307-316.
- Aye M e Htwe NM (2019) Trait association na path coefficient analysis for yield traits in Myanmar sesame (*Sesamum indicum* L.) **Germplasm. Journal of Experimental Agriculture International 41**: 1-10.
- Azevedo AM, Segus R, Gomes CL, Freitas EM, Canido DM, Silva DJH e Carneiro PCS (2016) Correlações genotípicas e análise de trilha em famílias de meios-irmãos de couve de folhas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira 51**: 35-44.
- Beiguelman B. (2002) **Curso prático de bioestatística**. 5ª ed. FUNPEC, Ribeirão Preto, 274p.
- Blind AD, Valente MSF, Lopes MTG e Resende MDV (2018) Estimativa de parâmetros genéticos, análise de trilha e seleção em bucha vegetal para caracteres agronômicos. **Revista Brasileira de ciências Agrárias 13**: 1-8.
- Callegari-Jacques SM (2003) **Bioestatística: princípios e aplicações**. Artmed, Porto Alegre, 255p.
- Carvalho CGP (1999) Análise de trilha sob multicolinearidade em pimentão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira 34**: 603-613.
- Carvalho CGP, Borsato R, Cruz CD e Viana JMS (2001) Path analysis under multicollinearity in S0 x S0 maize hybrids. **Crop Breeding and Applied Biotechnology 1**: 263-270.
- Carvalho HWL e Aragão WM (1989) **Avaliação de cultivares de sorgo forrageiro no estado de Sergipe**. 1 – comportamento de progênies avançadas em Nossa Senhora da Glória, Caruaru e Própria. Bolletim de pesquisa n°4. Jnairo/1989. EMBRAPA CNPCo, 29p.

Carvalho SP (1995) **Métodos alternativos de estimação de coeficientes de trilha e índices de seleção, sob multicolinearidade**. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Ceccon G, Teodoro PE e Santos A (2017) Contribution of agronomic traits for sugar yield in sweet sorghum genotypes. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo 16**: 3232-2239.

Coelho DS (2017) **Potencial de cultivares de sorgo sacarino irrigadas com águas salinas**. Tese (Doutorado em Agronomia: Ciências do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

Coimbra JLM, Benin G, Vieira EA, Oliveira AC, Carvalho FIF, Guidolin AF e Soares AP (2005) Consequências da multicolinearidade sobre a análise de trilha em canola. **Ciência Rural 35**: 347-352.

Condé AS (2019) **Biomarcadores Fenotípicos para seleção precoce de clones de eucalipto tolerantes à seca de ponteiros associados ao déficit hídrico**. 2019. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
Cruz CD (2006) **Programa GENES: biometria**. UFV, Viçosa, 382p.

Cruz CD, Regazzi AJ e Carneiro PCS (2014) **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3ª ed. UFV, Viçosa, 668p.

Cunha SP e Severo Filho WA (2010) Avanços tecnológicos na obtenção de etanol a partir de sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **TECNO-LÓGICA 14**: 69-75.

Dalchiavon FC, Carvalho CGP, Amabile RF, Godinho VPC, Ramos NP e Anselmo JL (2016) Características Agronômicas e suas correlações em híbridos de girassol adaptados à segunda safra. **Pesquisa Agropecuárias Brasileira 51**: 1806-1812.

Daoud JI (2017) Multicollinearity and Regression Analysis. **Journal of Physics: Conference Series**.

Durães FOM, May A e Parrelha RAC (2012) **Sistema Agroindustrial do Sorgo Sacarino no Brasil e a Participação Público-Privada: Oportunidades, Perspectivas e Desafios**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo.

Dutra ED (2014) **Avaliação da produção de etanol de primeira e de segunda geração a partir da biomassa de sorgo sacarino**. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

Eintringer GC, Santos PHAD, Vettorazzi JCF, Cunha KS e Pereira MG (2014) Correlação e análise de trilha para componentes de produção de milho superdoce. **Revista Ceres 61**: 356-361.

Emygdio BM, Rosa APSA, Oliveira ACB, Parrelha RA, Schaffert RE e May A (2011) **Desempenho de Cultivares de Sorgo Sacarino para a Produção de Etanol sob Diferentes Densidades de Plantas**. EMBRAPA, Pelotas.

Enddalamaw C, Adugna A e Mohammed H. Correlation and Path Analysis of agronomic and quality traits in a bioenergy crop, sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **African Journal of Biotechnology 16**: 2189-2200.

Ferreira OE (2015) **Produção de etanol a partir de sorgo sacarino com tratamento enzimático**. Tese (Doutorado em Microbiologia Agropecuária) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.

Figueiredo Junior JMM, Schaffert RE e Parelha RAC (2018) Análise de trilha para componentes da produção de álcool em híbridos de sorgo sacarino. *In*: Seminário de iniciação científica pibic/bic júnior, 8.

França AED (2015) **Predição de ganho genético com diferentes índices de seleção em sorgo sacarino [*sorghum bicolor* (L.) Moench]**. 2015. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

Freitas TGG Silva PSL, Vale JC, Silva IN e Silva EM (2019) Grain yield and path analysis in the evaluation of cowpea landraces. **Revista Caatinga 32**: 302-311.
Haesbaert FM (2016) **Testes de multicolinearidade em variáveis morfológicas e produtivas de tomateiro**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Horel AE e Kennard RW (1970) Ridge Regression: Estimation for Nonorthogonal Problems. **Technometrics 2**: 55-67.

Kavya P. Rao SV, Vijayalakshimi B, Sreekanth B, Radhakrishna Y e Umar SKN (2020) Correlation and path coefficient analysis in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] for ethanol yield. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry 9**: 2407-2410.

Khadakabhavi S, Girish G e Yashoba Y (2017) Character association and path analysis studies in germplasm lines of rabi sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Journal of Applied and Natural Science 9**: 206-210.

Kraha A, Turner H, Nimon K, Zientek LR e Henson RK (2012) Tools to support interpreting multiple regression in the face of multicollinearity. **Frontiers in Psychology 3**: 1-16.

Kurek AJ, Carvalho FIF, Assmann IC, Marchioro VS e Cruz PJ (2001) Análise de trilha como critério de seleção indireta para rendimento de grãos em feijão. **Rev. Bras. de Agrociência 7**: 29-32.

Landau EC e Martins Netto DA (2015) **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento: Expansão Potencial da Produção de Sorgo Granífero no Brasil no Sistema de Rotação com Soja Considerando o Zoneamento de Risco Climático 2015/16**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo.

Leite WS, Pavan BE, Matos Filho CHA, Alcantara Neto F, Oliveira CB e Feitosa FS (2016) Estimativas de parâmetros genéticos, correlações e índices de seleção para seis caracteres agrônômicos em linhagens F₈ de soja. **Comunicativa Science 7**: 302-310.

Lombardi GMR, Nunes JAR, Parrella RAC, Bruzi AT, Durães NNL e Fagundes TG (2015) Correlações Fenotípicas e Ambientais Entre Caracteres Agroindustriais de Sorgo Sacarino. In: Congresso Brasileiro de Melhoramento de Plantas, 7.

May A, Durães FOM, Pereira Filho IA, Schaffert RE e Parrelha RA (2012) **Sistema Embrapa de Produção Agroindustrial de Sorgo Sacarino para Bioetanol Sistema BRS1G – Tecnologia Qualidade Embrapa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo.

Meira D, Meier C, Olivoto T, Follmann DN, Rigatti A, Lunkes A, Marchioro VS e Souza VQ (2019) Multivariate analysis revealed genetic divergence and promising traits for indirect selection in black oat. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias 14**: 1-7.

Mengesha GH, Hailemariam FM, Mindaye TT, Lakew BL e Verma RPS (2019) Correlation and path analysis of yield, yield contributing and malt quality traits of Ethiopian sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) genotypes. **African Journal of Plant Science 13**: 209-220.

Montgomery DC e Peck EA (1981) Introduction to linear regression analysis. Jon Wiley and Sons, New York .

Moreira SO, Gonçalves LSA, Rodrigues R, Sudré CP, Amaral Júnior AT e Medeiros AM (2013) Correlações e análise de trilha sob multicolinearidade em linhas recombinantes de pimenta (*Capsicum annuum* L.). **Revista Brasileira de Ciências Agrárias 8**: 15-20.

Moreira, GBR (2016) Viabilidade de aplicação da seleção precoce em batata-doce [*Ipomea batatas* (L.) Lam.] e avaliação de caracteres relacionados a produção. Tese (Doutorado em Ciências: Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade de São Paulo. Piracicaba.

Morello OF, Mingotte FLC, Leal FT, Coelho AP, Neto AS e Lemos LB (2020) Agronomic performance, postharvest and indirect selection of *Coffea arabica* L. cultivars for high-temperature regions. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias 1**: 1-9.

Nardinho M, Carvalho IR, Follmann D e Baretta D. (2016) Correlações fenotípica, genotípica e de ambiente entre caracteres de milho Híbrido da Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Biometria 34**: 379-394.

Noia LR (2017) **Discriminação da qualidade de cafés conilon por atributos físico-químicos**. 2017. Dissertação (Mestrado em produção vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre.

Nunes PR (1998) **Métodos para a pesquisa agrônômica**. UFC, Fortaleza, 564p.
Oliveira EJ, Lima DS, Lucena RS, Motta TBN e Dantas JLL (2010) Correlações genéticas e análise de trilha para número de frutos comerciais por planta em mamoeiro. **Pesq. agropec. Bras** **45**: 855-862.

Oliveira TC (2015) **Divergência genética e correlação entre caracteres de genótipos de sorgo sacarino na região de Cáceres – MT**. 2015. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade do Estado de Mato Grosso, Cáceres.

Olivoto T, Nardininho M, Carvalho IR e Souza VQ (2017) Multicollinearity in Path Analysis: A Simple Method to Reduce Its Effects. **Agronomy Journal** **109**: 131-142.
Pacheco TF (2011) **Circular Técnica 04**: Produção de Etanol: Primeira ou Segunda Geração? Brasília: Embrapa.

Paziani SF, Duarte AP, Nussio LG, Freitas RS, Gallo PB e Mateus GP (2019) Correlações entre variáveis quantitativas e qualitativas de milho e de sorgo para silagem. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo** **18**: 408-416.

Pedroso CA, Benites FRG, Barbosa MHP e Silva FL (2009) Eficiência de índices de seleção utilizando a metodologia REML/BLUP no melhoramento da cana-de-açúcar. **Scientia Agraria** **10**: 31-36.

Prasad BVV e Sridhar V (2019) Assessment of variability, correlation and path analysis for yield related traits in yellow pericarp sorghum germplasm lines (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry** **9**: 870-873.

Ramos P e Pelegrin RAM (2019) A trajetória da Agroindústria canavieira paulista: do Proálcool à crise na década de 1990. *In*: Congresso Brasileiro de História econômica, 8.

Ray-Mukherjee J, Nimon K, Mukherjee, Morris DW, Slotow R e Hamer M. (2014) Using commonality analysis in multiple regressions: a tool to decompose regression effects in the face of multicollinearity. **Methods in Ecology and Evolution** **5**:320-328.

Rezende BR e SILVA AR (2015) Análise de trilha da produtividade de alho com inclusão de variável multicategórica. **Multi-Science Journal** **1**: 13-16.

Rios AS, Borém A, Guimarães PEO e Paes MC (2012) Análise de trilha para carotenoides em milho. **Revista Ceres** **59**: 368-373.

Rocha G, Lima RHP e Menezes BRS (2020) Características morfoagronômicas na colheita e na soca e análise de trilha em tipos especiais de arroz. **Revista de Ciências Agrônômicas** **29**: 38-49.

Salla VP, Danner MA, Citadin I, Sasso SAZ, Donazzolo J e Gil BV (2015) Análise de trilha em caracteres de frutos de jabuticabeira. **Pesquisa Agropecuárias Brasileira** **50**: 218-223.

Salvian TV (2016) **Multicolinearidade**. In: LCE 5801 - Regressão e Covariância – 2016/02, Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba.

Sanchez FB, Ribeiro LP, Rodrigues EV, Bhering LP e Teodoro PE (2019) Correlations and path analysis in cherry tomato genotypes. **Funtional Plant Breeding Journal 1**: 1-7.

Santos CV, Parrella RAC, Schaffert RE, Souza VF, Silva RA, Oliveira PC, Silva KJ e Bernardinho KC (2014) Avaliação de correlações genotípicas de cultivares de sorgo sacarino, em ensaio de valor de cultivo e uso. In: congresso internacional de bioenergia, 9, São Paulo.

Santos FG, Casela CR e Waquil JW (2005) Melhoramento de sorgo. In: BORÉM, A. **Melhoramento de Espécies cultivadas**. UFV, Viçosa, 969 p.

Santos JW, Almeida FAC, Beltrão NEM e Cavalcanti FB (2008) **Estatística experimental aplicada**. 2^a ed. Embrapa algodão, Campina Grande, 461p.

Santos RF, Placido HFP, Garcia EB, Cantu C, Albrecht AJPA, Albhecht LP e Frigo KDA (2015) Sorgo sacarino na produção de agroenergia1. **Revista Brasileira de Energias Renováveis 4**: 1- 12.

Sari BG, Lúcio AD, Krysczub DK, Tischer AL e Drebes L (2018) Interference of sample size on multicollinearity diagnosis in path analysis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira 53**: 769-773.

Silva AS, Carvalho FIF, Nedel JL, Cruz PJ, Silva JAG, Caetano VR, Hartwig I e Sousa CS (2005) Análise de trilha para os componentes de rendimento de grãos em trigo. **Bragantia 64**: 191-196.

Silva CA, Schimdt ER, Schimdt O, Alexandre RS, Cattaneo LF, Ferreira JP e Nascimento AL (2016) Correlações fenotípicas e análise de trilha em caracteres morfoagronômicos de mamoeiro. **Revista Agroambiente 10**: 217-227.

Silva FSG, Migot BC e Silva FC (2019) A importância do bioetanol dentro do contexto brasileiro, comparação de sua síntese e a partir de cana-de-açúcar e milho e bioetanol de segunda geração. In: Jornada Científica e Tecnológica da Fatec de Botucatu, São Paulo, 8.

Silva MJV (2017) **Avaliação no potencial de diferentes cultivares de sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) para produção de etanol de 1^a e 2^a geração**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grand, Campina Grande.

Silva T, Santos DMM, Moro G e Moro FV (2016) Correlation and path analysis of agronomic and morphological traits in maize. **Revista Ciência Agronômica 47**: 351-357.

- Singh SK, Gabgwar LK e Chaudhary M (2019) Studies on character association and path analysis in forage sorghum. **International Journal of Chemical Studies 7**: 2939-2942.
- Smiderle EC, Furtn V, Silva CSC, Botelho FBS, Resende MPM, Botelho RTC, Colombari Filho JM, Castro AP e utumi MM (2019) Index selection for multiple traits in upland rice progênies. **Revista de Ciências Agrárias 4**: 4-12.
- Solano CS (2016) **Avaliação agroeconômica de quatro cultivares de sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) para produção de etanol em campos dos Goytacazes – RJ**. Tese (Doutorado em Producao Vegetal) Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes.
- Souza TJF, Rocha, MM, Silva KJD, Bertini CHCM, Silveira LM, Sousa RR e Souza JL (2019) Simultaneous selection for yeld, adaptability, and genotypic stability in immature cowpea sing REML/BLUP. **Pesquisa Agropecuárias Brasileira 4**: 1-9.
- Souza VQ, Ferrari M, Bellé R e Pelegrin (2015) Componentes de rendimento em combinações de fungicidas e inseticidas e análise de trilha em soja. **Gl. Sci Technol 8**: 167–176.
- Srivastava M, Singh SK, Chand P, Kumar M, Kumar M, Gangwar HK e Dev A (2019) Studies on path analysis in forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Journal os Pharmacognosy and Phytochemistry 8**: 993-996.
- Subalakhshimi VK, Kavithamani D, Selvi B, e Vadivel N (2019) Relationship among yield and its componen traits in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) germplasm accessions. **Eletronic Journal of Plant Breeding 10**: 446-450.
- Subalakhshimi VK, Kavithamani D, Selvi B, e Vadivel N (2019) Variability and path analysis studies in F₂ population of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Electronic Journal of Plant breending 11**: 411-415.
- Tabosa JN (2020) **Cadernos do Semiárido riquezas e oportuidades**. UFRPE, v. 15, n. 2.
- Tabosa JN, Barros AHC, Silva FGB. Brito ARM, Simões AL, Mesquita FLT, Nascimento MMA, Silva Filho JG, França JGE, Silva AB, Ferras I, Carvalho EX, Cordeiro AL e Simplíci JB (2019) Importância do melhoramento genético de diferentes tipos de sorgo para as mesorregiões do agreste, Sertão e afins do semiárido brasileiro. In: Ximenes LF, Silva MSL e Brito LTL (eds) **Tecnologias de convivência com o semiárido**. Banco do Nordeste d Brasil, Fortaleza, p. 504-558.
- Tabosa JN, Reis OV, Nascimento MM, Lima JMP, Silva FG, Silva Filho JG, Brito ARMB e Rodrigues JAS (2010) O sorgo sacarino no semiárido brasileiro: elevada produção de biomassa e rendimento de caldo. *in*: Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 28, Goiana.

Vesohoski F, Marchioro VS, Franco FA e Cantelle A (2011) Componentes do rendimento de grãos em trigo e seus efeitos diretos e indiretos na produtividade. **Rev. Ceres 58**: 337-341.

Vian AL, Santil AL, Amado TJC, Cherubin MR, Simon DH, Damian JM e Bredemeier C (2016) Variabilidade espacial da produtividade de milho irrigado e sua correlação com variáveis explicativas de planta. **Ciência Rural 46**: 464-471.

Viana ES, Reis RC e Silva SCS, Neves TT e Jesus JL (2015) Avaliação físico-química e sensorial de frutos de genótipos melhorados de mamoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical 45**: 297-303.

Wright S (1921) Correlation and casuation. **Journal Agricultural Research 20**: 557-585.

Zimmermann FJP (2014) **Estatística aplicada a pesquisa agrícola**. 2ª ed. Embrapa, Brasília , 582p.

Zuffo AM, Aguilera JG, Ratke RF, Steiner F, Oliveira AM e Fonseca WL (2020) Análise de trilha em soja submetida a fontes e doses de nitrogênio inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* em solos com diferentes níveis de fertilidade. **Research, Society na Development 9**: 1-7.

CAPÍTULO II

**ANÁLISES DE TRILHA PARA COMPONENTES DE PRODUÇÃO DE ETANOL E
COLMOS EM SORGO SACARINO.**

Análises de trilha para componentes de produção de etanol e colmos em sorgo sacarino.

RESUMO

Neste trabalho foram utilizados dados de um experimento realizado com 80 genótipos de Sorgo Sacarino para produção de etanol na Zona da Mata em Pernambuco, conduzido em um esquema de blocos casualizados com 3 repetições, no município de Vitória de Santo Antão – PE, no ano agrícola de 2013. O objetivo deste trabalho foi quantificar os efeitos diretos e indiretos exercidos por variáveis tecnológicas (produção de matéria seca total, produção de colmo, porcentagem de BRIX na colheita e eficiência de extração de caldo) sobre a produção de etanol e quantificar os efeitos diretos e indiretos exercidos por variáveis agronômicas (altura média das plantas, floração, produção de matéria verde total e porcentagem de colmo na PMV) sobre a produção de colmos por hectare, a partir da realização de estudos de análise de trilha. Previamente a realização da análise foi realizado um teste de diagnóstico de colinearidade, que indicou a presença de tal efeito nas duas análises. Na análise para produção de etanol, a abordagem utilizada para contorno deste efeito foi a exclusão de uma variável causadora de alto grau de multicolinearidade (%MST). Na análise realizada com as variáveis agronômicas, para contornar os possíveis efeitos adversos causados pela presença da multicolinearidade detectada no teste diagnóstico, foi realizada uma análise em crista com adição de constante $k = 0,09$ na matriz de correlação $X'X$. A variável BRIX apresentou respectivamente, maior efeito total (0,8844) e maior efeito direto (0,5969) sobre a produção teórica de etanol, indicando grande dependência da variável principal pela explicativa. O maior efeito indireto foi via PCL (0,2820). As quatro variáveis consideradas como dependentes apresentaram valores positivos de efeito total sobre PCL. O maior efeito direto (0,8010), foi exercido pela PMV.

Palavras-chave: análise de trilha, análise em crista, multicolinearidade, Sorgo sacarino.

Path analysis for ethanol production components and stems in sweet sorghum.

Abstract

This work used data from an experiment carried out with 80 sorghum genotypes for ethanol production in the Zona da Mata in Pernambuco, conducted in a randomized block scheme with 3 replications, in the municipality of Vitória de Santo Antão - PE, in agricultural year 2013. The objective of this work was to quantify the direct and indirect effects of technological variables (total dry matter production, stalk production, BRIX percentage at harvest and juice extraction efficiency) on ethanol production and quantify the direct and indirect effects exerted by agronomic variables (average plant height, flowering, total green matter production and percentage of stalk in the PMV) on stalk production per hectare, based on the analysis of trail. Prior to the analysis, a collinearity diagnostic test was performed, which indicated the presence of such an effect in both analyzes. In the analysis of ethanol production, an approach applied to circumvent this effect was to exclude a variable causing a high degree of multicollinearity (%MST). In the analysis performed with the agronomic variables, to circumvent the possible adverse effects caused by the presence of multicollinearity detected in the diagnostic test, a crest analysis was performed with addition of constant $k = 0.09$ in the $X'X$ correlation matrix. The BRIX variable showed, respectively, the greatest total effect (0.8844) and the greatest direct effect (0.5969) on the theoretical production of ethanol, indicating great dependence on the main variable for the explanatory one. The greatest indirect effect was via PCL (0.2820). The four dependent variables as dependent on the total effect on PCL. The greatest direct effect (0.8010) was exerted by the PMV.

Key words: Path analysis, crest analysis, multicollinearity, sweet sorghum.

1.0 INTRODUÇÃO

Biocombustíveis são classificados como combustíveis derivados de biomassa renovável, e são uma opção de fonte de energia menos impactante a natureza em relação aos combustíveis fósseis (Grando, Oliveira e Antunes 2015). A utilização de tais combustíveis está em ascensão mundialmente e vai de encontro com a preocupação em relação a escassez eminente dos combustíveis fósseis bem como os seus impactos ambientais.

O Brasil se destaca atualmente na produção de etanol, no ano de 2018 foram produzidos 30,1 milhões m³ do biocombustível (ANP 2019). A quase totalidade de tal volume produzido é advinda da cana-de-açúcar, porém estudos recentes tem destacado o sorgo sacarino como potencial espécie a ser cultivada na entressafra da cana-de-açúcar para produção de biocombustível. (Masson et al. 2015, Kavya et al. 2020).

O sorgo sacarino é uma cultura que combina alta produção de biomassa e alto teor de açúcares fermentáveis, seu ciclo é curto, é totalmente mecanizável, apresenta boa performance quando cultivada sob as condições de áreas de cultivo no estado de Pernambuco entre outras regiões nordestinas, visto que apresenta certo grau de tolerância a altas temperaturas e à baixa disponibilidade hídrica, porém além de tal rusticidade quanto a condições ambientais adversas a cultura se mostra responsiva a tratamentos culturais, classificando tal cultura como potencial produtora de biocombustíveis (Aguila et al. 2020, Kavya et al. 2020).

Além das características supracitadas que classificam o sorgo sacarino como cultura potencial para produção de etanol, a sua similaridade com a cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) quanto a forma de armazenamento de açúcares simples nos colmos, torna seus respectivos processos de extração de caldo análogos, permitindo assim, a utilização das mesmas instalações industriais presentes nas usinas, para ambas as espécies (Biondo et al. 2019). Tal conjunto de fatores inerentes ao sorgo sacarino o torna um ótima alternativa para produção de etanol no período de entressafra da cana-de-açúcar.

O sorgo é cultivado a nível mundial e nacional de maneira majoritária para produção de grãos destinados a alimentação humana e animal, em que são utilizadas

variedades do tipo granífero (Prasad e Sridhar 2020). Com isso, os boletins de produtividade da cultura disponibilizados anualmente pelo IBGE, ANP e Conab são relativos a produtividade de grãos.

Os dados referentes ao quantitativo de sorgo plantado para fins de produção de etanol são escassos, devido a baixa utilização da espécie para tal finalidade. Segundo Coelho (2017) na safra 2011/2012 (novembro-dezembro/março-abril) o total de área plantada no Brasil com Sorgo do tipo sacarino foi de aproximadamente 20.000 hectares.

Em áreas plantadas com o objetivo de produzir etanol, a produtividade final é calculada a partir do volume de biocombustível produzido, porém se tratando do sorgo, este é advindo do caldo presente nos colmos. Neste contexto o volume total de etanol se mostra altamente relacionado com a produção de colmos por hectare, e sendo esta última, uma variável quantitativa, ou seja, influenciada por diversos caracteres agrônômicos, as análises de trilha que considerarem tal variável como sendo principal, se fazem de grande valia para o melhoramento da cultura com finalidade de produção de energia (Martins et al. 2017, Solano et al. 2017, Kavya et al. 2020).

Distintas variáveis denominadas como sendo agroindustriais, que são inerentes a produção de colmos, produção de matéria seca, composição do caldo, teor de açúcares, bem como a facilidade de extração do caldo, influenciam na produtividade de etanol por hectare, se fazendo necessário a quantificação de seus efeitos diretos e indiretos sobre o etanol a ser produzido (Moreira, Caraschi e Viana 2018, Kavya et al. 2020).

Análise de trilha é uma metodologia que foi proposta por Wright (1921) capaz de analisar conjuntamente um grupo de variáveis em que uma é considerada como sendo principal e as demais como sendo explicativas, sendo o resultado da análise a quantificação dos efeitos diretos e indiretos desta últimas sobre a principal, a estimação desses efeitos ocorre a partir do desdobramento dos coeficientes de correlações estimados entre cada par de caracteres do grupo analisado (Mengesha et al. 2019). A aplicação de tal metodologia se faz relevante nas etapas iniciais de melhoramento genético de uma cultura a ser explorada para novas finalidades, visto que os resultados obtidos a partir de tal método podem elucidar a respeito de quais

são os caracteres de maior importância da cultura e como estes interagem entre si e influenciam a produtividade final.

A multicolinearidade pode ser entendida como um efeito adverso que ocorre quando as variáveis são intimamente correlacionadas e pode gerar resultados errôneos em análises de trilha (Haesbaert 2016). Cada análise de trilha possui uma matriz de correlação $X'X$ e segundo Montgomery e Peck (1981), número de condição (NC) associado a tal matriz diz respeito a magnitude de multicolinearidade presente no conjunto de dados.

Em casos em que a presença de multicolinearidade tem grande magnitude, o pesquisador deve considerar a exclusão das variáveis que mais contribuem com a ocorrência de tal fenômeno. Uma metodologia denominada análise em crista, pode ser aplicada para atenuar os efeitos da multicolinearidade, quando esta é de baixa magnitude, tornando os resultados da análise mais confiáveis a partir da adição de uma constante k na diagonal da matriz de correlação $X'X$ (Azevedo et al. 2016, Zuffo et al. 2020).

Este trabalho teve como objetivo estimar as magnitudes dos efeitos diretos e indiretos exercidos sobre a produção de etanol em sorgo Sacarino, via as principais variáveis tecnológicas e agronômicas da cultura, por meio de realização de estudos de análise de trilha.

2.0 METODOLOGIA

2.1 Coleta de dados

2.2 Local e data de execução do experimento

Para realização do presente trabalho foram utilizados dados de um experimento realizado no ano de 2014, para a avaliação de genótipos de Sorgo Sacarino para produção de etanol. O local de condução foi o campo experimental do Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA, localizado no município de Vitória de Santo Antão, na mesorregião Mata Sul e na microrregião Vitória de Santo Antão do estado de Pernambuco. Os limites ao Norte do município são Chã de Alegria e Glória do Goitá, ao Sul, Escada e Primavera, a Leste, Cabo, Moreno e São Lourenço da Mata, e finalmente ao Oeste, Pombos. O município está localizado a uma altitude de 156 metros e apresenta latitude 08°07'05`` S e longitude 35°17'29`` W.

A caracterização química do solo e a média dos dados meteorológicos durante o período de realização do experimento são demonstrados, respectivamente nas tabelas 7 e 8.

Tabela 07 - Análise de solo realizada na área 1 (Bloco 1) e na área 2 (blocos 2 e 3).

Área	P mg/dm ³	pH (H ₂ O)	-----Cmolc/dm ³ -----						-Cmolc/dm ³ -		(%)	
			Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Al ⁺³	H ⁺	S	CTC	V	M
1	80	7,20	2,55	1,45	1,00	0,42	0,00	0,74	5,4	6,2	88	0
2	26	6,50	2,55	1,05	0,14	0,27	0,00	1,56	3,7	5,3	70	0

Tabela 08 - Média dos dados meteorológicos da estação experimental do IPA, em Vitória do Santo Antão – PE, observadas no período de Fevereiro à Junho de 2014.

	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Total
Precipitação (mm)	88,4	84,2	78,6	110,2	120,6	482,20
T Máxima (C)	37,3	33,9	35,4	32,1	31,1	---
T Mínima (C)	21,7	22,3	22,6	22,2	21,1	---
Umidade Relativa do Ar (%)	72	72	70	75	71	---

2.3 Tratamentos

No referido experimento, foi realizado um ciclo da cultura (Fevereiro a Junho de 2014) e foram utilizados como tratamentos 65 progênies F₆ (Anexo I) provenientes do cruzamento das variedades IPA 467-4-2 (parental masculino) e IPA 2502 (parental feminino), tais variedades foram obtidas em Vitória de Santo Antão – PE em 2010, testadas primeiramente em Caruaru – PE (2011) e testadas novamente em Vitória de Santo Antão (2013) e 15 variedades já comercializadas na região de estudo, incluindo os parentais (Anexo II), para serem avaliadas como testemunhas, totalizando 80 genótipos.

2.4 implantação e condução do experimento

O experimento foi conduzido em blocos casualizados com três repetições (80 x 3), totalizando 240 parcelas experimentais. O cultivo foi organizado em fileiras com densidade de 12 plantas por metro linear. Cada parcela possuía 4,80 m² de área total (6,0 x 0,8m), para avaliação das plantas as duas fileiras laterais foram consideradas como bordadura, sendo incluídas apenas as plantas presentes nas 4 fileiras centrais, totalizando 3,20 m² (4 x 0,80 m) de área útil por parcela.

O plantio foi realizado por sementes (20 a 30 por metro linear) fornecidas pelo Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA. Foi realizado o desbaste as plantas 15 dias após o plantio, permanecendo ao final de desse processo 12 plantas/m. O experimento foi irrigado com sistema de irrigação do tipo microaspersão.

Foi realizada a análise do solo (Tabela 07) e as adubações foram procedidas de acordo com as necessidades da área. Como prevenção do ataque de pragas foram aplicados os seguintes inseticidas, Decis (10mL diluído em 20 L de água) 40 dias após o plantio e formicida MIREX-S, 15 dias antes e 15 dias após o plantio.

2.5 Variáveis tecnológicas avaliadas

Produção de matéria seca total (folha, colmo e panícula): pesado em balança digital uma amostra de cinco plantas da área útil de cada parcela, separando cada parte (colmo, folha e panícula), colocando os mesmos em sacos de papel, procedendo

o peso verde dos colmos, peso das folhas e peso das panículas , logo após colocou-se este material para secar em estufa de circulação forçada a 65° C por 72 horas até atingir peso constante (Boaretto et al. 1999), desse modo foi obtido o peso seco e foi estimado o peso em toneladas por hectare, referente a produção de biomassa total de cada parcela.

Porcentagem de matéria seca total: O teor de matéria seca (folha colmo e panícula) foi determinado através da fórmula para cada parcela:

$$\% \text{ M.S.} = [\text{peso da amostra seca (g)} / \text{peso da amostra verde (g)}] \times 100$$

Teor de Brix – Determinado com refratômetro portátil da marca ATAGO N-1EB ~ 32%, foi realizada a retirada de 3 amostras aleatórias de cada parcela, utilizando o terço médio de cada planta, ao final fazendo uma média dos resultados aferidos.

Eficiência de extração de caldo: Pesado em balança digital, uma amostra de 5 colmos da área útil por parcela, foi procedida a extração do caldo, passou-se no mínimo três vezes em uma moenda elétrica (modelo utilizado na extração de caldo de cana de açúcar), realizou-se a pesagem do caldo em balança digital. A eficiência foi encontrada fazendo a relação dos pesos dos cinco colmos e o peso do caldo obtido, achando o valor em porcentagem.

Etanol teórico (l.ha⁻¹): Para avaliar a produtividade teórica de etanol por hectare utilizou-se a equação adaptada de (Vasilakoglou et al. 2011).

$$\text{Etanol (l.ha}^{-1}\text{)} = \text{ART (\%)} \times \text{massa de colmo verde (t.ha}^{-1}\text{)} \times 6,5 \times 0,85 \times (1,0/0,79)$$

Em que:

ART = Conteúdo total de açúcares em porcentagem (%);

6,5 = fator de conversão do etanol a partir do açúcar;

0,85 = eficiência no processo de fermentação;

(1,0/0,79) = gravidade específica do álcool

Obs.: Concentração de Açúcares Redutores Totais (% ATR): Que de acordo com (Almodares e Hadi, 2009, Zhao et al. 2009, Guigou et al. 2011, Dutra et al. 2013), ocorre uma relação linear entre o Brix e o % ATR.

2.6 Variáveis agronômicas avaliadas

Altura da planta na colheita (cm): Distância em centímetros da base rente ao solo até a extremidades das panículas, em três plantas escolhidas aleatoriamente na parcela útil.

Número de dias até 50% da floração: Contagem do número de dias do plantio até que a parcela apresente 50% de suas plantas na fase de floração, sendo classificado em: superprecoce, precoce, intermediário, tardio, muito tardio.

Produção de biomassa total: Pesando em campo todas as plantas da área útil de cada parcela, extrapolando para $t.ha^{-1}$.

Produção de colmo por hectare: Pesou-se em balança digital, uma amostra de 5 plantas da área útil de cada parcela, após separação e pesou-se cada parte (colmo, folha e panícula), estipulando a porcentagem de cada parte em relação a amostra colhida. Partindo da porcentagem do peso verde dos colmos encontrados nesta amostra, estima-se o peso de toneladas por hectare de colmos, referente à produção de biomassa total de cada parcela.

Relação (%) Peso dos colmos ($t.ha^{-1}$) / Produção total de biomassa ($t.ha^{-1}$): Após a estimativa de produção dos colmos por hectare e de toda a biomassa produzida por hectare, calcula-se a relação entre estas pela seguinte equação:

$$\% \text{ Relação} = (PC/PTB) \times 100$$

Em que:

PC = Produção de colmos ($t.ha^{-1}$)

PTB = Produção total de biomassa ($t.ha^{-1}$)

2.7 Análises estatísticas

Para realização do presente estudo, foram utilizados os resultados do referido experimento onde foram obtidos os coeficientes de correlação entre as seguintes variáveis tecnológicas e variáveis agronômicas avaliadas.

2.8 Análise de trilha para produção de etanol por hectare

Os coeficientes de correlações genotípicas obtidos foram utilizados para realização de do estudo de análise de trilha, metodologia proposta por Wright (1921), que é capaz de particionar os valores dos coeficientes em efeitos diretos e indiretos e exercidos sobre uma variável base.

Como o objetivo de desdobramento do grau de correlação que a as variáveis tecnológicas exercem sobre o etanol teórico (ET), foi realizada uma análise de trilha considerando este como variável independente, e como variáveis dependentes, as seguintes, produção de matéria seca total (PMS), produção de colmo (PCL), porcentagem de BRIX na colheita (BRIX) e eficiência de extração de caldo (EEC).

A variável porcentagem de matéria seca (%MST) foi excluída da análise pois foi detectado pelo teste de análise de autovalores da matriz ($X'X$), que estima o grau aproximado com que as variáveis explicativas se relacionam linearmente, que tal variável foi responsável por alto grau de multicolinearidade entre o conjunto de dados analisados (Carvalho et al. 2002). As análises de trilha, bem como os testes de presença de multicolinearidade foram realizados com o auxílio do programa computacional GENES (2001).

2.9 Análise de trilha para produção de colmos por hectare sob multicolinearidade

Para desdobramento das correlações existentes entre as variáveis agrônômicas avaliadas, foi realizada uma análise de trilha (Wright 1921), considerando como variável principal produção de colmo (PCL) e como variáveis dependes, as seguintes, altura média das plantas (AMP), floração (FL), produção de matéria verde total (PMV) e porcentagem de colmo na PMV (CL).

O teste de análise de autovalores da matriz ($X'X$), que estima o grau aproximado com que as variáveis explicativas se relacionam linearmente, foi realizado para detectar a presença de colinearidade entre as mesmas (Carvalho et al. 2002). As análises de trilha, bem como os testes de presença de multicolinearidade foram realizados com o auxílio do programa computacional GENES (2001).

Visto a natureza fraca da multicolinearidade, não foi necessária a exclusão de nenhuma variável da análise. Para atenuar os efeitos adversos da presença multicolinearidade foi aplicada metodologia denominada análise em crista, em que uma constante k é adicionada na diagonal da matriz de correlação $X'X$, estabilizando a maior parte da análise (Carvalho 1995).

3.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise de trilha para produção de etanol por hectare

Estão expressos na figura 7, os coeficientes de correlações genótípicas entre os caracteres produção de matéria seca total (PMS), Brix na colheita (BRIX), eficiência na extração de caldo (EEC), produção de colmo (PCL), e o etanol teórico (ET)

Foi realizado um estudo de análise de trilha com as variáveis tecnológicas avaliadas (tabela 9), considerando como variável dependente, etanol teórico (ET).

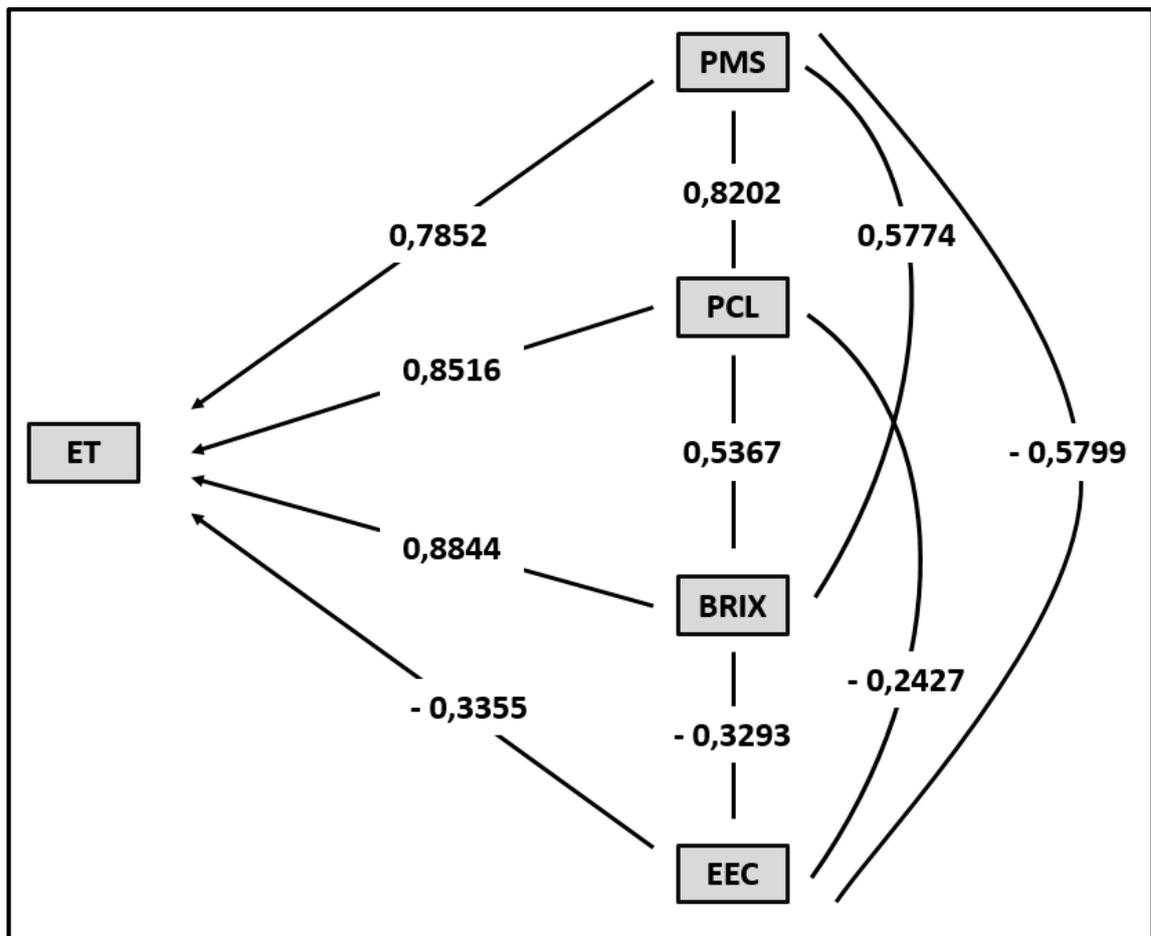


Figura 7. Diagrama dos coeficientes de correlação genotípica entre os caracteres produção de matéria seca total (PMS), Brix na colheita (BRIX), eficiência na extração de caldo (EEC), produção de colmo (PCL), e o etanol teórico (ET).

No teste de diagnóstico de colinearidade realizado entre as cinco variáveis consideradas explicativas do etanol teórico, (PMS, PCL, BRIX, EEC e % MST), o número de condição (NC) encontrado foi > 100 (NC = 130,31). Indicando grau de

colinearidade considerado significativo entre essas características. Montgomery e Peck (1981) propuseram a seguinte classificação de efeito da multicolinearidade em relação ao NC, presença de multicolinearidade fraca ($NC < 100$), presença de multicolinearidade moderada a forte ($100 < NC < 1000$) e presença de multicolinearidade severa ($NC > 1000$).

Análises de trilha realizadas sobre alto grau de multicolinearidade, sem aplicação de nenhum método capaz de reduzir seus efeitos, pode resultar em estimações de efeitos que não condizem com as explicações biológicas referentes as variáveis analisadas (Olivoto et al.2017).

Caso fossem consideradas todas as seis variáveis tecnológicas como explicativas de ET em uma análise de trilha, seria necessário a aplicação de valor um alto de constante k na diagonal da matriz de correlação $X'X$, para estabilizar os dados (figura 8) (Carvaho 1995).

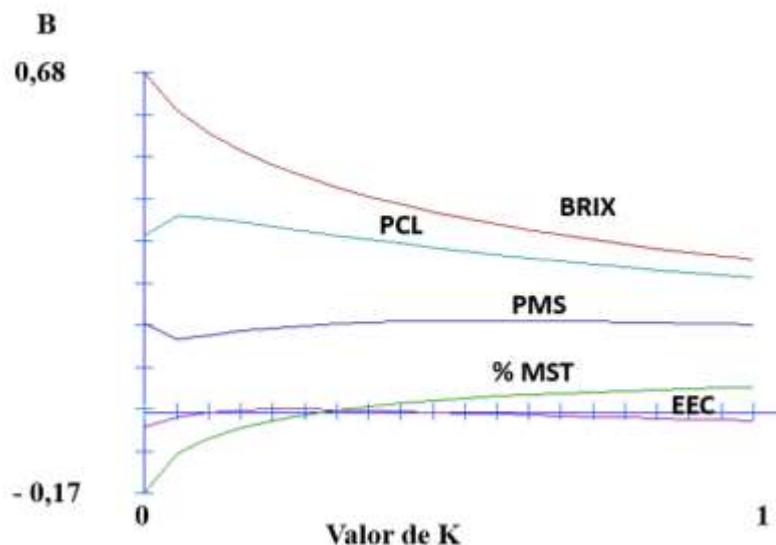


Figura 8. Estimativas dos coeficientes de trilha (B) em função dos valores de k e obtidos da análise utilizando-se como variável básica, o logaritmo de etanol teórico e como variáveis explicativas, produção de matéria seca total (PMS), Brix na colheita (BRIX), eficiência na extração de caldo (EEC), % de matéria seca na matéria verde total (% MST) e produção de colmo (PCL).

Salla et al. (2015) mencionam a identificação e posterior retirada de variáveis causadoras de alto grau de viesamento da análise como sendo uma alternativa de minimizar ou evitar os efeitos gerados pela multicolinearidade.

Para atenuar esses problemas de estimação resultantes da colinearidade foram realizadas simulações excluindo uma variável por vez da análise, para identificar a escolha mais plausível a ser tomada. O melhor cenário encontrado foi decorrente da exclusão da variável porcentagem de matéria seca (% MST) (Figura 7). O grau de multicolinearidade detectado entre as quatro variáveis restantes (PMS, PCL, BRIX e EEC), foi de magnitude fraca, em que se encontrou um valor de $NC < 100$ ($NC = 26,12$). Efeitos de colinearidade a este nível, não constituem problemas sérios para análise (Montgomery e Peck 1981).

Foi realizada uma análise de trilha para estimar os efeitos diretos e indiretos das variáveis, produção de matéria seca total (PMS), Brix na colheita (BRIX), eficiência na extração de caldo (EEC), e produção de colmo (PCL) sobre etanol teórico (Tabela 9). Tal análise não necessitou de aplicação de constante k (Figura 9) na diagonal da matriz de correlação $X'X = 0,1061$, para adequação dos dados.

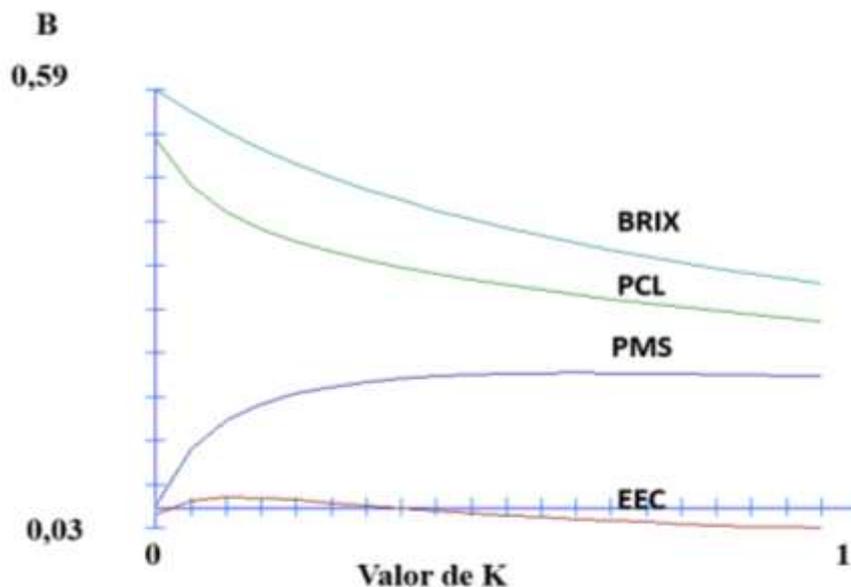


Figura 9. Estimativas dos coeficientes de trilha (B) em função dos valores de k e obtidos da análise utilizando-se como variável básica, o logaritmo de etanol teórico e como variáveis explicativas, produção de matéria seca total (PMS), Brix na colheita (BRIX), eficiência na extração de caldo (EEC), e produção de colmo (PCL).

Tabela 09. Efeitos diretos e indiretos das variáveis primárias, produção de matéria seca total (PMS), Brix na colheita (BRIX), eficiência na extração de caldo (EEC), produção de colmo (PCL) sobre a variável básica, etanol teórico (ET).

Variáveis	Estimativas	Total
Produção de matéria seca total		
Efeito direto sobre etanol teórico	0,0045	
Efeito indireto via produção de colmo	0,4310	0,7852
Efeito indireto via BRIX na colheita	0,3447	
Efeito indireto via eficiência na extração de caldo	0,0051	
Produção de colmo		
Efeito direto sobre etanol teórico	0,5254	
Efeito indireto via produção de matéria seca total	0,0037	0,8516
Efeito indireto via BRIX na colheita	0,3204	
Efeito indireto via eficiência na extração de caldo	0,0051	
BRIX na colheita		
Efeito direto sobre etanol teórico	0,5969	
Efeito indireto via produção de matéria seca total	0,0026	0,8844
Efeito indireto via produção de colmo	0,2820	
Efeito indireto via eficiência na extração de caldo	0,0029	
Eficiência na extração de caldo		
Efeito direto sobre etanol teórico	- 0,0088	
Efeito indireto via produção de matéria seca total	- 0,0026	- 0,3355
Efeito indireto via produção de colmo	- 0,1275	
Efeito indireto via BRIX na colheita	- 0,1966	
Coeficiente de determinação	0,9818	
Efeito da variável residual	0,1347	

Considerando o efeito total das características explicativas sobre o ET, as variáveis PMS, PCL E BRIX apresentaram coeficientes de correlação positivos e foi encontrado um valor negativo apenas no efeito total da EEC.

A variável BRIX apresentou respectivamente, maior efeito total (0,8844) e maior efeito direto (0,5969) sobre o etanol teórico, indicando grande dependência da variável principal pela explicativa. O maior efeito indireto foi via PCL (0,2820). Em estudos anteriores, realizados com a cultura, foram obtidos os seguintes resultados, Figueiredo Júnior, Schaffert e Parella (2018) obtiveram um coeficiente de correlação genotípica $r = 0,5798$ entre BRIX e produção de etanol por hectare, França et al. (2014) obtiveram uma estimativa de $r = 0,87$ para tal coeficiente, Souza et al. (2012) encontraram tal coeficiente no valor de $r = 0,78$ e Lombardi et al. (2015) estimaram $r = 0,86$, referente a relação fenotípica entre tais caracteres.

Características que possuem alta herdabilidade e alta correlação com uma característica quantitativa, são passíveis de serem utilizadas na seleção indireta da mesma. Oliveira (2015) e França et al. (2016) estimaram valores $H^2 > 0,7$ de BRIX em estudos de parâmetros genéticos na cultura do sorgo.

Sendo assim, a mensuração de BRIX pode ser considerada como de grande importância para estudos com a temática de produção de biocombustível, sendo esta passível de ser utilizada em seleção indireta para produção de etanol, possuindo ainda a vantagem adicional da possibilidade de ser facilmente aferida.

Os efeitos totais e diretos exercidos pela PCL apresentaram valores similares aos efeitos exercidos pelo BRIX, porém ocuparam o segundo lugar no ranking de magnitude, apresentado 0,8516 de efeito total e 0,5254 de efeito direto sobre ET. A quase totalidade do efeito indireto de tal variável é devido ao BRIX (0,3204).

A grande magnitude de efeitos diretos e indiretos exercidos sobre ET, via BRIX e PCL, indica a possibilidade de realização de seleção simultânea deste par de características, quando se deseja o aumento de produção de etanol em l/ha.

A estimação da PCL é de extrema importância, visto da sua alta correlação com ET via direta e indireta, e também por esta representar a parte morfológica a ser utilizada para extração do produto que virá a ser comercializado, quando o cultivo é direcionado para produção de álcool. Em áreas de cultivo destinadas a silagem e

alimentação humana, tal importância é atribuída a produtividade de grãos por hectare. A PCL foi mais detalhadamente estudada a partir da realização de uma análise de trilha, sendo esta considerada como variável principal, e as seguintes variáveis agrônomicas, AMP, FL, PMV e CL como dependentes (Tabela 5).

O efeito total de PMS sobre ET obtido foi satisfatório (0,7852) porém este foi devido basicamente aos efeitos indiretos via PCL (0,4310) e via BRIX (0,3447), sendo seu efeito direto praticamente nulo (0,0045).

Oliveira (2015) obteve coeficientes de correlações de natureza genotípica positivos entre PMS e BRIX, e entre PMS e número médio de colmos por hectare (NCH), com os respectivos valores, $r = 0,43$ e $r = 0,65$. Tais resultados evidenciam mais uma vez, a alta influência que as variáveis PCL e BRIX, exercem sobre ET.

Foi obtida uma correlação total negativa de EEC com ET, e sua partição em efeitos diretos e indiretos também resultou na estimação de apenas valores negativos. A EEC exerceu valores indiretos positivos via as demais características tecnológicas, porém não significativos, sendo todos menores que 0,01.

Santos (2014) em estudos com a cultura do sorgo, estimou as correlações genotípicas entre 10 variáveis, e valores negativos de r foram atribuídos a correlação da EEC com a quase tonalidade de características estudadas, com exceção apenas da estimativa de açúcares redutores (AR) com a qual se correlacionou positivamente. Lombardi et al. (2015) obteve um coeficiente de correlação fenotípica negativo, no valor de $r = - 0,17$ entre EEC e produção de etanol por hectare.

A EEC é uma característica quantitativa, influenciada por diversos fatores, que vão além dos relacionados a planta, incluindo também, os referentes ao processo industrial de extração do caldo. Os resultados deste estudo, bem como os citados anteriormente, indicam que tal variável possui efeito negativo sobre a produção de etanol, não sendo indicado para ser utilizado na seleção indireta para objetivos de ganhos genéticos em tal caráter.

3.2 Análise de trilha para produção de colmos por hectare sob multicolinearidade

Rodrigues et al. (2010) destaca o valor das estimações de coeficientes de correlação entre caracteres de interesse econômico, principalmente para utilização na seleção indireta, em casos em que estes possuem baixa herdabilidade, porém tais coeficientes são restritos a um par de características e não indicam os efeitos diretos e indiretos que tal caractere exerce sobre um outro, visto que a metodologia de análise de trilha proposta por Wright (1921) é capaz de estimar tais efeitos, esta é utilizada para uma melhor compreensão de variáveis complexas, por meio de sua correlação com variáveis ditas como explicativas .

Foi realizado um estudo de análise de trilha com as variáveis agronômicas mensuradas (Tabela 10), considerando como variável dependente produção de colmo (PCL).

A PCL apresentou efeito total de grande magnitude sobre etanol teórico (0,8516), bem como alto grau de efeito via direta (0,5254) sobre esta variável (Tabela 9). A PCL é considerada uma variável quantitativa, tendo caracteres agrônômicos como componentes de produção, para melhor compreensão destas relações foi realizada uma análise de trilha em que, produção total de colmo (PCL) foi considerada como variável independente, e como variáveis dependentes, as seguintes, altura média das plantas (AMP), floração (FL), % de colmo na PMV (CL) e produção de matéria verde total (PMV) (tabela 10) a partir do desdobramentos dos coeficientes de correlação estimados entre tais variáveis (Figura 10).

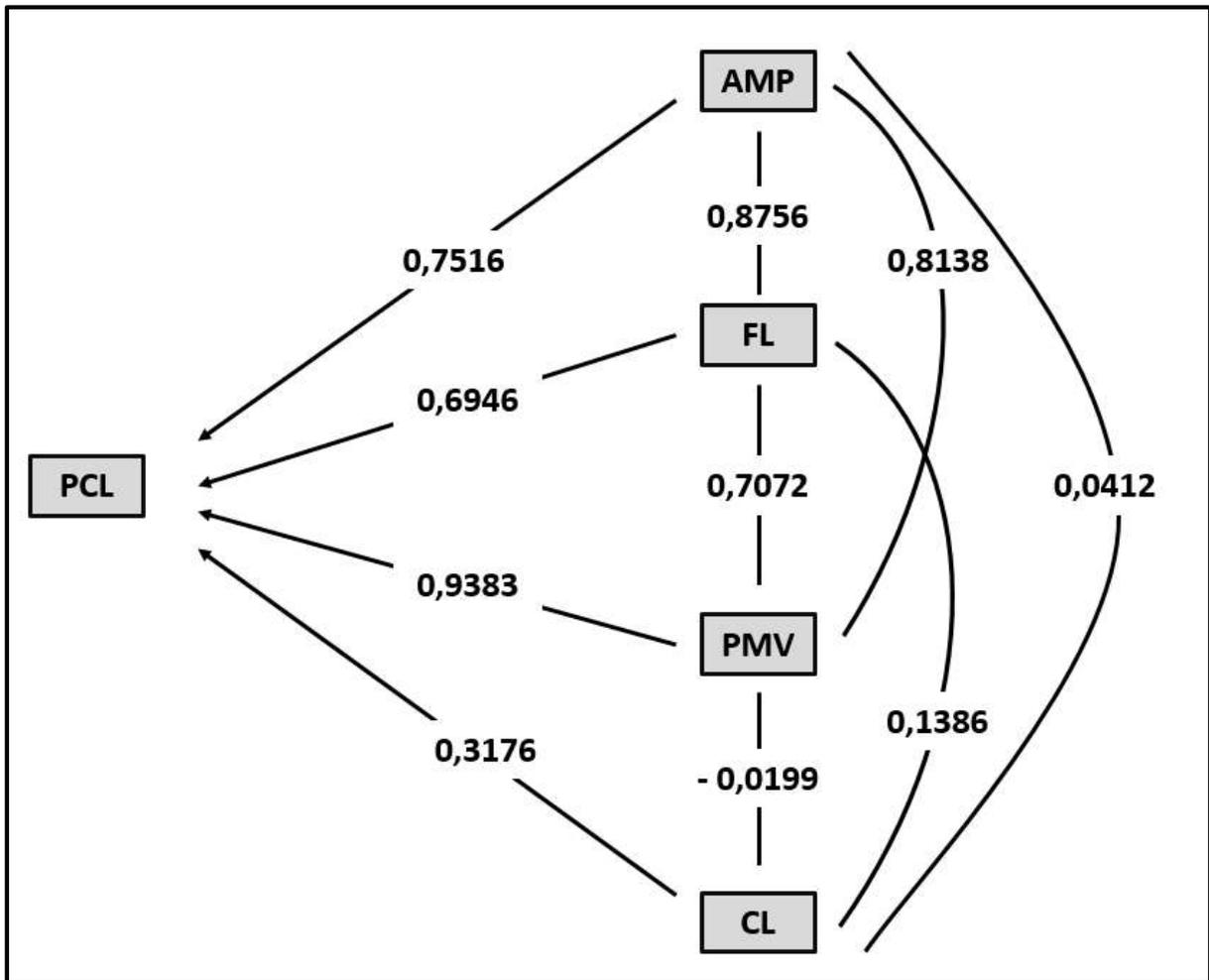


Figura 10. Diagrama dos coeficientes de correlação genotípica entre os caracteres altura média das plantas (AMP), floração (FL), % de colmo na PMV (CL), produção de matéria verde total (PMV) e a produção de colmo (PCL).

Foi observada a presença de multicolinearidade, porém de magnitude classificada como fraca, não resultando em problemas sérios de estimação, sendo obtido um valor de número de condição menor que 100 ($NC = 26,12$) entre tais variáveis explicativas (Montgomery e Peck 1981).

Segundo Montgomery e Peck (1981), a classificação do grau de multicolinearidade em relação ao NC, e dada conforme a seguinte classificação, presença de multicolinearidade fraca ($NC < 100$), presença de multicolinearidade moderada a forte ($100 < NC < 1000$) e presença de multicolinearidade severa ($NC > 1000$).

Não foi considerada a exclusão de nenhuma variável explicativa da análise para contornar os efeitos da multicolinearidade, visto seu pouco efeito de enviesamento.

Para atenuar tais efeitos foi aplicada metodologia denominada análise em crista, em que uma constante k dentro do intervalo $0 < k < 1$ é adicionada na diagonal da matriz de correlação $X'X$, sendo selecionado o menor valor de k possível com a capacidade de estabilizar a maioria dos coeficientes da análise (Carvalho 1995). Na referida análise foi realizada a adição da constante $k = 0,09$ na matriz de correlação $X'X = 2192$.

Em análises em crista é importante assegurar que a constante k aplicada, manteve os valores de VIF (fator de inflação de variância), os menores possíveis, visto que tal fator também é um indicador grau de colinearidade dos dados, quando este apresenta valores inferiores a 10, é considerado que há uma confiabilidade de resultados. Na análise realizada o maior valor de VIF foi de 4.35 (Donazzolo et al. 2017, Olivoto et al. 2017).

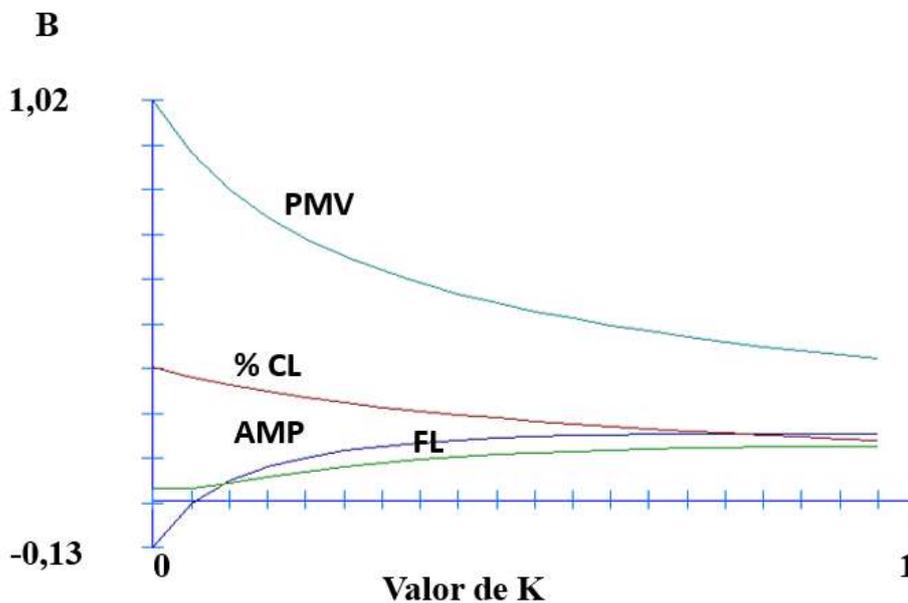


Figura 11. Estimativas dos coeficientes de trilha (B) em função dos valores de k e obtidos da análise utilizando-se como variável básica, o logaritmo de produção de colmo e variáveis explicativas altura média das plantas (AMP), floração (FL), % de colmo na PMV (CL) e produção de matéria verde total (PMV).

Tabela 10. Efeitos diretos e indiretos das variáveis primárias, altura média das plantas (AMP), floração (FL), % de colmo na PMV (CL) e produção de matéria verde total (PMV) sobre a variável básica, produção de colmo (PCL).

Variáveis	Estimativas	VIF ⁽¹⁾	Total
Altura média de plantas			
Efeito direto sobre produção de colmo	0,0453	4.35	
Efeito indireto via floração	0,0378	2.04	0,7516
Efeito indireto via produção de matéria verde	0,6518	1.39	
Efeito indireto via % de colmo na PMV	0,0123	0.00	
Floração			
Efeito direto sobre produção de colmo	0,0431	3.18	
Efeito indireto via altura média de plantas	0,0397	2.58	0,6946
Efeito indireto via produção de matéria verde	0,5665	1.05	
Efeito indireto via % de colmo na PMV	0,0412	0.02	
Produção de matéria verde			
Efeito direto sobre produção de colmo	0,8010	2.51	
Efeito indireto via altura média de plantas	0,0369	2.23	0,9383
Efeito indireto via floração	0,0305	1.33	
Efeito indireto via % de colmo na PMV	- 0,0060	0.00	
% de colmo na PMV			
Efeito direto sobre produção de colmo	0,2975	1.13	
Efeito indireto via altura média de plantas	0,0019	0.00	0,3176
Efeito indireto via floração	0,0060	0.05	
Efeito indireto via produção de matéria verde	- 0,0159	0.00	
Coeficiente de determinação	0,9101		
Valor de k utilizado	0,0945		
Efeito da varável residual	0,2999		
Determinante da matriz de correlação	0,2192		

(1) VIF – Fator de inflação de variância

As quatro variáveis consideradas como dependentes (AMP, FL, CL e PMV) apresentaram valores positivos de efeito total sobre PCL. Três destas características (PMV, AMP e FL) apresentaram valores de efeito total superiores a 0,69, sendo estes considerados de grande magnitude sobre a variável principal, indicando que estas podem ser classificadas como componentes da produção de colmo por hectare.

O maior coeficiente de correlação total obtido foi o da PMV (0,9383), sendo o efeito direto exercido sobre PCL por esta variável (0,8010), maior que os efeitos totais exercidos por cada uma das variáveis restantes. Tal correlação de tão alta magnitude, indica a PMV como sendo a principal característica responsável pela multicolinearidade presente na amostra, mesmo esta, sendo de natureza fraca ($NC < 100$) (Montgomery e Peck 1981).

A PMV apresenta maior facilidade de estimação que a PCL, e sendo este par de caracteres, tão correlacionados positivamente, a seleção para ganhos genéticos em PCL podem ser realizados via PMV.

Os efeitos totais das variáveis AMP e FL sobre PCL, foram considerados altos com os respectivos valores de 0,7516 e 0,6946, porém ambas apresentaram efeitos diretos não significativos, inferiores a 0,05. Tal efeito sobre a variável principal foi basicamente devido aos efeitos indiretos via PMV, sendo este responsável por 87,53% do efeito de AMP e 81,54% do efeito de FL.

Em estudos realizados com a cultura Cunha e Lima (2014) estimaram as seguintes herdabilidades para as variáveis, altura de planta, floração e peso de matéria verde, respectivamente, 97,05%, 58,21% e 74,76%. Tais resultados reforçam indicativo de possibilidade de seleção indireta via estes caracteres, visto que estes possuem alta herdabilidade.

Dentre tais variáveis a agronômicas a AP, merece ser destacada como componente de produção por apresentar valores de herdabilidade próximos a 1. Em estudos realizados por Araújo et al. (2014) a estimação de tal valor foi de 97,96%.

A CL demonstrou o menor valor de efeito total sobre PCL (0,3176), sendo este praticamente devido ao efeito direto da variável. Indicando correlação positiva com a variável independente, porém de baixa magnitude em relação as outras variáveis estimadas.

A maior parte dos estudos já publicados, de análise de trilha em sorgo, foram realizados para estudar a interferência de variáveis explicativas, na produção de grãos, tendo em vista o histórico de utilização da cultura para alimentação humana e produção de ração animal.

Em virtude do recente interesse de cultivo de sorgo para produção de etanol, estudos de análise de trilha considerando esta como sendo a variável principal, podem constituir uma importante ferramenta na realização de programas de melhoramento genético com tal interesse.

4.0 CONCLUSÕES

A exclusão de variáveis geradoras de multicolinearidade apresenta-se um método eficiente para redução do enviesamento dos dados em análises de trilha.

O Método denominado análise em crista, demonstrou ser eficiente para realização de análises de trilha sob efeito de multicolinearidade.

As variáveis BRIX na colheita (BRIX) e produção de colmo (PCL) são caracteres potenciais a serem utilizados na seleção indireta para incremento de volume de etanol produzido por hectare.

A variável eficiência de extração do caldo (EEC) apresentou efeitos negativos, sobre variável produção de etanol teórico, tanto diretamente quanto indiretamente via as demais variáveis analisadas. Indicando que a seleção de plantas para maior EEC implicará em uma redução na produção de etanol.

As variáveis altura média de plantas (AMP), floração (FL), e produção de matéria verde total (PMV) são potenciais caracteres a serem utilizados na seleção indireta da produção de colmo (PCL).

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (2019). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2019**. Rio de Janeiro, 2019.
- Aguila LSH, Cehling RK, Caputo TFM e Aguila JSD (2020) Melhor arranjo de plantas para os genótipos de sorgo sacarino BR 506 e BR 511 visando a produção de etanol. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research 3**; 648-653.
- Almodoares A e Hadi MR (2009) Production of bioetanol from sweet sorghum: a review. **African Journal of Agricultural Research 4**: 772-780.
- Araújo BL, Arnhold E, Oliveira Junior EA e Lima CF (2014) Parâmetros genéticos em cultivares de sorgo granífero avaliados em safrinha. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas 9**: 51-59.
- Azevedo AM, Segus R, Gomes CL, Freitas EM, Canido DM, Silva DJH e Carneiro PCS (2016) Correlações genotípicas e análise de trilha em famílias de meios-irmãos de couve de folhas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira 51**: 35-44.
- Biondo JC, Medeiros SLP, Nunes SCP, Sagoni PR, Bandeira AH e Silva NG (2019) Atributos qualitativos e maturação de genótipos de sorgo sacarino. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias 14**: 1-8.
- Boaretto AE (1999) **Amostragem, acondicionamento e preparação das amostras de plantas para análise química**. In: SILVA, F. C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa.
- Carvalho CGP, Arias CAA, Toledo JFF, Oliveira MF e Vello NA (2002) Correlações e análise de trilha em linhagens de soja semeadas em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuárias Brasileira 37**: 311-320.
- Carvalho SP (1995) **Métodos alternativos de estimação de coeficientes de trilha e índices de seleção, sob multicolinearidade**. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Coelho DS (2017) **Potencial de cultivares de sorgo sacarino irrigadas com águas salinas**. Tese (Doutorado em Agronomia: Ciências do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- Cruz CD (2001) Programa GENES - versão windows. Aplicativo computacional em Genética e Estatística. 1ª ed. UFV, Viçosa, 648p.
- Cunha, EE e Lima JMP (2010) Caracterização de genótipos e estimativa de parâmetros genéticos de características produtivas de sorgo forrageiro. **Revista Brasileira de Zootecnia 39**: 701-706.

Donazollo J, Salla VP, Sasso SAZ, Danner, Citadin I e Nodari RO (2017) Path analysisi for selection of feijoa with greater pulp weight. **Ciência Rural** **47**: 1-7.

Dutra ED, Barbosa Neto AG, Souza RB, Moraes Junior MA, Tabosa JN e Menezes RSC (2013) Ethanol Production from the Stem Juice of Different Sweet. **Society for Sugar Research & Promotion** **15**: 316-321.

Figueiredo Junior JMM, Schaffert RE e Parelha RAC (2018) Análise de trilha para componentes da produção de álcool em híbridos de sorgo sacarino. *In*: Seminário de iniciação científica pibic/bic júnior, 8.

França AED (2016) Seleção simultânea em progênies de sorgo-sacarino por meio de índices de seleção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** **51**: 1737-1743.

França AED, Parrella RAC, Silva MJ, VF Souza, Oliveira PC, Rabelo MM, Schaffert RE e Bastos GQ (2014) Correlações genotípicas e análise de trilha em sorgo Sacarino visando à produção de etanol. *In*: congresso internacional de bioenergia, 9, São Paulo.

Grando RL, Oliveira CBJF e Antunes AM (2015) Panorama do etanol utilizando prospecção tecnológica. **Geintec** **5**: 2604-2618.

Guigou M, Lareo C, Pérez LV, Luuberas ME, Vazquez D e Ferrari MD (2011) Bioetanol production from three sweet sorghum varieties: evaluatin of post-harvest treatment on sugar extraction and fermentation. **Biomass na Bioenergy** **35**: 3058-3062.

Haesbaert FM (2016) **Testes de multicolinearidade em variáveis morfológicas e produtivas de tomateiro**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Horel AE e Kennard RW (1970) Ride Regression: Estimation for Nonorthogonal Problems. **Technometrics** **2**: 55-67.

Kavya P. Rao SV, Vijayalakshimi B, Sreekanth B, Radhakrishna Y e Umar SKN (2020) Correlation and path cefficient analysis in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] for etanol yield. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry** **9**: 2407-2410.

Lombardi GMR, Nunes JAR, Parrella RAC, Tecixeira DHL, Bruzi AT, Durães NNL e Fagundes TG (2015) Path analysis of agro-industrial traits in sweet sorghum. **Genetics and Molecular Research** **14**: 16392-16402.

Martins AM, Parrella AC, Lopez DC, Schaffert RE, Parrella NNLD, Neves WSN e Silva APCM (2017) Período de utilização industrial de cultivares de sorgo sacarino visando a produção de etanol. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo** **16**: 217-231.

Masson IS, Costa GHG, Roviero JP, Freita LA, Mutton MA e Mutton MJR (2015) Produção de bioetanol a partir da fermentação de caldo de sorgo sacarino e cana-de-açúcar. **Ciencia Rural** **45**: 1695-1700.

Mengesha GH, Hailemariam FM, Mindaye TT, Lakew BL e Verma RPS (2019) Correlation and path analysis of yield, yield contributing and malt quality traits of Ethiopian sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) genotypes. **African Journal of Plant Science** **13**: 209-220.

Montgomery DC e Peck EA (1981) Introduction to linear regression analysis. John Wiley and Sons, New York.

Moreira BR, Caraschi JC e Viana RS (2018) Bagaço de sorgo sacarino [*sorghum bicolor* (L.) Moench] submetidos a métodos de pré-tratamentos aplicados a produção de etanol celulósico. **Revista Brasileira de Energias Renováveis** **7**: 214-230.

Oliveira TC (2015) **Divergência genética e correlação entre caracteres de genótipos de sorgo sacarino na região de Cáceres – MT**. 2015. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade do Estado de Mato Grosso, Cáceres.

Olivoto T, Nardininho M, Carvalho IR e Souza VQ (2017) Multicollinearity in Path Analysis: A Simple Method to Reduce Its Effects. **Agronomy Journal** **109**: 131-142.

Prasad BVV e Sridhar V (2020) Assessment of variability, correlation and path analysis for yield related traits in yellow pericarp sorghum germplasm lines (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry** **9**: 870-873.

Rodrigues GB, Martin BG, Silva DJH, MAP e Almeida VS (2010) Análise de trilha de componentes de produção primários e secundários em tomateiro do grupo Salada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** **45**: 155-162.

Salla VP, Danner MA, Citadin I, Sasso SAZ, Donazzolo J e Gil BV (2015) Análise de trilha em caracteres de frutos de jaboticabeira. **Pesquisa Agropecuárias Brasileira** **50**: 218-223.

Santos CV, Parrella RAC, Schaffert RE, Souza VF, Silva RA, Oliveira PC, Silva KJ e Bernardinho KC (2014) Avaliação de correlações genotípicas de cultivares de sorgo sacarino, em ensaio de valor de cultivo e uso. *In*: congresso internacional de bioenergia, 9, São Paulo.

Solano CS, Ponciano NJ, Daher RF, Costa RA, Souza PM e Rocha JPMS (2017) Qualidade do caldo para produção de etanol em cultivares de sorgo sacarino sob adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo** **16**: 388-400.

Souza VF, Hatt S, Parrelha RAC, Tardin FD e Schaffert (2012) Estimativas de Correlações Fenotípicas e Genotípicas entre Parâmetros Agroindustriais do Sorgo Sacarino. *In*: Congresso nacional de milho e sorgo, 29, Águas de Lindóia.

Vasilakoglou I, Gatsis T, Dhima K, e Karagiannids N (2011) Sweet sorghum productivity for biofuels under increased soil salinity and reduced irrigation. **Field Crops Research** **120**: 38-46.

Wright S (1921) Correlation and casuation. **Journal Agricultural Research 20**: 557-585.

Zhao YL, Devlet A, Stenberger Y e Wang X (2009) Biomass yeld and changes in chemical composition pf sweet sorghum cultivars grow for biofuel. **Field Crops Research 111**: 55-64.

Zuffo AM, Aguilera JG, Ratke RF, Steiner F, Oliveira AM e Fonseca WL (2020) Análise de trilha em soja submetida a fontes e doses de nitrogênio inoculadas com *Bradyhizobium japonicum* em solos com diferentes níveis de fertilidade. **Research, Society na Development 9**: 1-7.

ANEXOS

ANEXO I – Lista de progênies utilizadas no experimento.

Tratamentos	Progênie
1	15 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
2	15 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
3	15 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013
4	15 Vit2010 – Ca2011 – 04 Vit2013
5	15 Vit2010 – Ca2011 – 05 Vit2013
6	19 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
7	19 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
8	19 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013
9	19 Vit2010 – Ca2011 – 04 Vit2013
10	20 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
11	20 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
12	20 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013
13	20 Vit2010 – Ca2011 – 04 Vit2013
14	40 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
15	40 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
16	40 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013
17	40 Vit2010 – Ca2011 – 04 Vit2013
18	46 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
19	46 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
20	46 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013
21	46 Vit2010 – Ca2011 – 04 Vit2013
22	68 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
23	68 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
24	79 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
25	79 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
26	79 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013
27	79 Vit2010 – Ca2011 – 04 Vit2013
28	96 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
29	96 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
30	99 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
31	99 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
32	99 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013
33	138 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
34	138 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
35	144 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
36	144 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
37	144 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013
38	144 Vit2010 – Ca2011 – 04 Vit2013
39	183 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
40	183 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
41	183 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013

42	183 Vit2010 – Ca2011 – 04 Vit2013
43	183 Vit2010 – Ca2011 – 05 Vit2013
44	199 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
45	199 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
46	226 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
47	226 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
48	226 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013
49	252 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
50	252 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
51	252 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013
52	258 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
53	258 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
54	258 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013
55	260 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
56	260 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
57	260 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013
58	260 Vit2010 – Ca2011 – 04 Vit2013
59	292 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
60	292 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
61	292 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013
62	292 Vit2010 – Ca2011 – 04 Vit2013
63	298 Vit2010 – Ca2011 – 01 Vit2013
64	298 Vit2010 – Ca2011 – 02 Vit2013
65	298 Vit2010 – Ca2011 – 03 Vit2013

ANEXO II – Lista de variedades utilizadas como testemunhas no experimento

Tratamento	Variedade (Testemunha)
66	IPA 467-4-2
67	IPA 2502
68	SF 15
69	BR 506
70	WRAY
71	WIRLEY
72	TALE
73	BR 501
74	EP 19 – TRATAMENTO 19 DO EPSF
75	EP 17 – TRATAMENTO 17 DO EPSF
76	EP 14 – TRATAMENTO 14 DO EPSF
77	P 222
78	P 134
79	P 288
80	P 15

ANEXO III - Resumo da análise de variância para produção de matéria seca total (PMS), em t.ha⁻¹; porcentagem de matéria seca total (%MST), em porcentagem; produção de colmo (PCL), em t.ha⁻¹; Brix na colheita (BRIX), em graus Brix; eficiência na extração de caldo (EEC) em porcentagem e etanol teórico (ET), em l.ha⁻¹, obtidas da avaliação de 80 genótipos de sorgo sacarino, avaliadas em vitória de Santo Antônio – PE, 2014.

FV	GL	QM					
		PMS (t.ha ⁻¹)	%MST	PCL (t.ha ⁻¹)	BRIX	EEC (%)	ET (l.ha ⁻¹)
Blocos	2	---	---	---	---	---	---
Tratamentos	79	132,16**	46,54**	254,09**	30,81**	177,40**	4284195,78**
Resíduo	158	33,54	7,79	75,02	3,81	38,58	884314,42
CV (%)		26,9	8,2	25,7	16,8	20,1	33,4
Média		21,4	33,6	33,6	11,5	30,7	2812,03

*,** Significativo, pelo teste F, a 1% de probabilidade.

ANEXO IV - Resumo da análise de variância para altura média das plantas (AMP), em centímetros; floração (FL), em números de dias; produção de matéria verde total (PVM), em t.ha⁻¹; produção de colmo (PCL), em t.ha⁻¹ e porcentagem de colmo na PMV (CL), em porcentagem, obtidas da avaliação de 80 genótipos de sorgo sacarino, avaliados em vitória de santo Antônio – PE, 2014.

FV	GL	QM				
		AMP (cm)	FL (N DIAS)	PMV (t.ha ⁻¹)	PCL (t.ha ⁻¹)	CL (%)
Blocos	2	---	---	---	---	---
Tratamentos	79	5546,71**	512,59**	809,50**	2014,09**	97,45**
Resíduo	158	518,05	17,74	215,54	75,02	37,24
CV(%)		67	5,2	23,2	25,7	11,38
Média		336,3	79,8	63,1	33,6	53,6

*,** Significativo, pelo teste F, a 1% de probabilidade, respectivamente;