

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Sistemas de
Produção Agrícola Familiar



Tese

Cana-de-açúcar na produção de energia e forragem

Lucas Silva Lemões

Pelotas, 2022.

Lucas Silva Lemões

Cana-de-açúcar na produção de energia e forragem

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador: Sergio Delmar dos Anjos e Silva
Coorientador: Carlos Henrique Silveira Rabelo

Pelotas, 2022.

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

L544c Lemões, Lucas Silva

Cana-de-açúcar na produção de energia e forragem
/Lucas Silva Lemões ; Sérgio Delmar dos Anjos e Silva,
orientador ; Carlos Henrique da Silveira Rabelo,
coorientador. — Pelotas, 2022.

79 f.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação
em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Faculdade
de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de
Pelotas, 2022.

Elaborada por Gabriela Machado Lopes CRB:

10/1842

LUCAS SILVA LEMÕES

Cana-de-açúcar na produção de energia e forragem

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia

Data da defesa: 27 de maio de 2022.

Banca examinadora:

Dr. Sérgio Delmar dos Anjos e Silva (Orientador)
Doutor em Fitotecnia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr. Carlos Eduardo da Silva Pedroso
Doutor em zootecnia pela Universidade Federal de Pelotas

Dr. Ricardo Augusto de Oliveira
Doutor em Agronomia pela Universidade Federal do Paraná

Dr. Jailton da Costa Carneiro
Doutor em Ciência Animal pela Universidade Federal de Minas Gerais

Dr. Adilson Härter
Doutor em Agronomia pela Universidade Federal do Paraná

A minha família e todos que fizeram
parte desta caminhada.

DEDICO

Agradecimentos

Aos meus pais, Jorge e Maria Eulália, pelo amor incondicional e pelo apoio em todas as fases da minha vida.

Aos meus irmãos Davi e Juliana, em especial à Ju por toda a ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

A minha namorada Luize, pelo carinho, compreensão, apoio e dedicação em todos os momentos.

Ao orientador Sérgio Delmar dos Anjos e Silva pela orientação, amizade e incentivo.

Ao professor Carlos Henrique da Silveira Rabelo, pela co-orientação durante a execução deste trabalho.

Aos colegas do Grupo de Agroenergia da Embrapa Clima Temperado pela colaboração na realização deste trabalho e pela amizade.

A Cândida pela amizade, incentivo e colaboração na realização deste trabalho.

À Embrapa Clima Temperado por todo o apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa.

A Lallemand Animal Nutrition pelo fornecimento dos inoculantes.

Ao Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-açúcar da Universidade Federal do Paraná (PMGCA/UFPR/RIDESA), pela cooperação e disponibilidade de materiais para os ensaios.

Ao Laboratório de Bioenergia da Universidade Federal de Pelotas, em especial, à Prof^a Cláudia F. Lemons e Silva e a estagiária Patrícia Schmitt pelo auxílio nas análises de calorimetria.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado!

LEMÕES, Lucas Silva. **Cana-de-açúcar na produção de energia e forragem**. 2022. 79f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2022.

Resumo

A cana-de-açúcar é um dos cultivos de maior destaque mundial, uma vez que apresenta grande importância econômica, social e ambiental. A espécie também se destaca no cenário nacional na produção de açúcar, etanol e energia através da cogeração. No Rio Grande do Sul, a cultura está associada a pequenas propriedades rurais na fabricação de produtos artesanais e produção animal, como forrageira visa suprir a demanda por volumoso para os rebanhos durante os períodos de escassez de pastagens e garantir a estabilidade produtiva. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo, identificar genótipos de cana-de-açúcar com potencial para geração de energia e produção de forragem. Para isso, foram caracterizados 18 genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de primeira soca, na estação experimental da Embrapa Clima Temperado, em Pelotas-RS. Foram avaliadas a composição química, desempenho produtivo, rendimentos de energia (etanol de primeira e segunda geração), cogeração de energia, produção de silagem e o uso de inoculantes bacterianos. Ao final do estudo identificou-se, com base no desempenho produtivo e composição química, que os genótipos PRBIO435, RB106819, PRBIO407, RB106814, RB106822, RB106818, RB867515 e RB966928 são mais promissores para a produção de açúcar e etanol de primeira geração; PRBIO435 e PRBIO407 com maior potencial para produção de etanol de segunda geração e cogeração de energia, enquanto RB106819 e RB106822 são os mais promissores para produção de forragem. Em relação a produção de silagem sem inoculante, os genótipos PRBIO354, PRBIO407 e RB106807 são os mais promissores. Os inoculantes bacterianos utilizados são eficientes em reduzir perdas de matéria seca e aumentar a estabilidade aeróbia das silagens de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: cana energia; desempenho produtivo; composição química; etanol 2G; alimentação animal.

LEMÕES, Lucas Silva. **Sugarcane in energy and forage production**. 2022. 79f. Thesis (Doctoral) - Post-Graduation Program in Agricultural Production Systems Family. Federal University of Pelotas, Pelotas, RS, 2022.

Abstract

Sugarcane is one of the most prominent crops in the world, since it has great economic, social and environmental importance. The species also stands out on the national scene in the production of sugar, ethanol and energy through cogeneration. In Rio Grande do Sul, the culture is associated with small rural properties in the manufacture of artisanal products and cattle raising, as forage it aims to supply the demand for roughage for the herds during periods of scarcity of pastures and guarantee productive stability. In this context, the present study aimed to identify sugarcane genotypes with potential for energy generation and forage production. For this, 18 sugarcane genotypes were characterized in a first ratoon cycle, at the experimental station of Embrapa Clima Temperado, in Pelotas-RS. Chemical composition, productive performance, energy yields (first and second generation ethanol), energy cogeneration, silage production and the use of bacterial inoculants were evaluated. Based on the productive performance and chemical composition, the genotypes PRBIO435, RB106819, PRBIO407, RB106814, RB106822, RB106818, RB867515 and RB966928 are more promising for the production of sugar and first-generation ethanol; PRBIO435 and PRBIO407 with greater potential for second generation ethanol production and energy cogeneration, while RB106819 and RB106822 are the most promising for forage production. Regarding the production of silage without inoculant, the genotypes PRBIO354, PRBIO407 and RB106807 are the most promising. The bacterial inoculants used are efficient in reducing dry matter losses and increasing the aerobic stability of sugarcane silages.

Keywords: energy cane; productive performance; chemical composition; second generation ethanol; animal feed.

Lista de Figuras

Figura 1. Oferta interna de energia no Brasil - 2020 (%).....	17
Figura 2. Produção Brasileira de Etanol.....	18
Figura 3. Fluxograma resumido da metodologia do trabalho.	26

Lista de Tabelas

Tabela 1. Desempenho de genótipos de cana-de-açúcar quanto as produtividades de matéria fresca (TMF), matéria seca (TMS), colmos (TCH) e sólidos solúveis totais (TBH) em ciclo de primeira soca.	31
Tabela 2. Caracterização de genótipos de cana-de-açúcar quanto aos teores de fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), hemicelulose (HEMI), celulose (CEL), Lignina (LIG), Cinzas (CZ) e matéria seca (MS%).	34
Tabela 3. Caracterização da forragem de genótipos de cana-de-açúcar quanto ao teor de matéria seca (MS), pH e capacidade tampão (CT) e caracterização da silagem quanto ao teor de MS e pH em ciclo de primeira soca.....	43
Tabela 4. Perda de matéria seca (MS), estabilidade aeróbia e ADITE de silagens produzidas a partir de diferentes genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de primeira soca.....	45
Tabela 5. Composição química da forragem de genótipos de cana-de-açúcar antes da ensilagem quanto ao teor de matéria seca (MS), cinzas (CZ), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), hemicelulose (HEMI), celulose (CEL), e lignina (LIG).....	46
Tabela 6. Composição química das silagens de cana-de-açúcar com e sem inoculação bacteriana, quanto ao teor de fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), hemicelulose (HEM), celulose (CEL), lignina (LIG), cinzas (CZ) e matéria seca (MS).....	48
Tabela 7. Perdas fermentativas e estabilidade aeróbia de silagens de cana-de-açúcar com e sem inoculação bacteriana	49
Tabela 8. Teores de ácido láctico, ácido acético, ácido propiônico e ácido butírico nas silagens de diferentes genótipos de cana-de-açúcar tratadas com inoculantes bacterianos.....	51
Tabela 9. Desempenho produtivo de genótipos de cana-de-açúcar quanto as produtividades de matéria seca (TMS) e produtividade de brix (TBH), além da caracterização química, quanto aos teores de hemicelulose (HEMI) e celulose (CEL).	54
Tabela 10. Poder calorífico superior (PCS) e rendimentos teóricos de energia (Energia) de genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de primeira soca.....	57

Tabela 11. Rendimentos teóricos de etanol de segunda geração, estimado a partir das frações celulose (ECEL) e hemicelulose (EHEMI), total de segunda geração (2G), rendimentos teóricos de etanol de primeira geração (1G) e rendimento teórico total de etanol (1G+2G) de genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de primeira soca.....58

Sumário

1. Introdução	14
2. Revisão bibliográfica	17
2.1. Produção de energia	17
2.2. Cana-de-açúcar para produção de forragem.....	21
2. Metodologia Geral.....	25
3. Capítulo 1: Desempenho produtivo e composição química de genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de primeira soca com foco na produção de energia e forragem	28
3.1. Introdução.....	28
3.2. Material e métodos	29
3.3. Resultados e discussão	31
3.4. Conclusões.....	37
4. Capítulo 2: Desempenho de genótipos e efeito de inoculantes bacterianos na produção de silagem de cana-de-açúcar.....	38
4.1. Introdução.....	38
4.2. Material e métodos	39
4.2.1. Desempenho de genótipos de cana-de-açúcar na produção de silagem sem uso de inoculantes bacterianos:.....	39
4.2.2. Efeito do uso de inoculantes bacterianos na produção de silagem de cana-de-açúcar	40
4.3. Resultados e discussão	43
4.3.1. Desempenho de genótipos de cana-de-açúcar na produção de silagem sem uso de inoculantes bacterianos:.....	43
4.3.2. Efeito do uso de inoculantes bacterianos na produção de silagem de cana-de-açúcar	45
4.4. Conclusões.....	52
5. Capítulo 3: Desempenho de genótipos de cana-de-açúcar na produção de energia	53
5.1. Introdução.....	53
5.2. Material e métodos	54
5.3. Resultados e discussão	56

5.4. Conclusões.....	60
Considerações finais	61
Referências Bibliográficas	63
ANEXOS	74

1. Introdução

A cana-de-açúcar é um dos cultivos de maior destaque mundial, uma vez que apresenta grande importância econômica, social e ambiental. A espécie também se destaca no cenário nacional e é considerada uma das principais *commodities* agrícolas em termos de produção (DEVOS, 2010). A relevância do cultivo está associada principalmente as diversas formas de utilização, tendo em vista que a cana-de-açúcar pode ser utilizada, tanto para a fabricação de produtos alimentícios como o açúcar e diversos outros, quanto para a produção de energia e alimentação animal.

Diante de um cenário global de preocupação com as mudanças climáticas e com o aumento da demanda de energia, visando a conscientização mundial, internacionalmente estão sendo realizados diversos esforços para estabelecer uma relação mais equilibrada entre população, ambiente e componentes da produção de alimentos e energia (EMBRAPA, 2018). O desenvolvimento, produção e uso de energias renováveis têm sido assunto importante na agenda política e econômica das grandes nações mundiais. Associado a isto, iniciativas que visam a preservação do planeta dependem do uso de energias renováveis para a redução da emissão de gases do efeito estufa (MATOS, 2020).

Considerada um cultivo de elevada produção de biomassa, a espécie fornece matéria-prima de maior potencial energético para a produção de etanol, no entanto a utilização da cana-de-açúcar não se limita apenas a produção deste combustível a partir do caldo. Os subprodutos obtidos a partir do processamento da cana-de-açúcar tornam-se uma alternativa em potencial para a produção de etanol de segunda geração e também cogeração de energia. Dessa forma, o setor sucroalcooleiro cresce em um novo campo em expansão, o energético (TROMBETA; CAIXETA FILHO, 2017). Sendo assim, a utilização de biomassas lignocelulósicas para a produção de etanol de segunda geração, a partir de bagaço e palha pode aumentar em até 50% o volume de etanol produzido sem a necessidade da expansão de áreas agrícolas (CANILHA et al., 2012; SANTOS et al., 2012).

A bioeletricidade gerada a partir da biomassa da cana-de-açúcar é a quarta fonte mais importante da matriz energética brasileira, sendo essa uma fonte renovável sustentável com geração distribuída pelo território nacional. No entanto, apenas 15% do potencial de produção é aproveitado. O aproveitamento pleno da biomassa

permitiria atender mais de 30% do consumo de energia do sistema integrado nacional (UNICA, 2022).

Outro aspecto de relevância do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil, é a utilização na nutrição animal. A espécie é amplamente utilizada como forragem suplementar de inverno no Brasil e em outros países de clima tropical, sendo utilizada também como volumoso principal em algumas fazendas produtoras de leite e em confinamentos de gado de corte (SILVA et al. 2020). As características de interesse da utilização da cana-de-açúcar como fonte de alimento para os animais são a elevada produtividade de nutrientes digestíveis totais por hectare, facilidade de cultivo, custo relativamente baixo de produção, possibilidade de colheita nos períodos de estiagem e oferta de forragem no período de inverno (THIAGO; VIEIRA, 2002; PEDROSO, 2004; FREITAS, 2005; FABRIS, 2009; BORGES et al., 2016; SILVA et al., 2020).

Uma estratégia para utilização da cultura na alimentação animal é a produção da silagem, que apresenta como principais benefícios: armazenamento da forragem para períodos de escassez, evitar a necessidade de corte diário, melhora do manejo agrônômico, uniformização da colheita e prolongamento da vida útil da cultura (DANIEL et al., 2019). Porém, devido aos elevados teores de açúcar e altas populações de leveduras, o processo de armazenamento da cultura na forma de silagem pode resultar em elevadas perdas de matéria seca e baixa estabilidade aeróbia. Para contornar esta situação, o uso de inoculantes bacterianos pode ser uma alternativa viável (MUCK et al., 2018; RABELO et al., 2019; GOMES et al., 2021).

Por muitos anos os programas de Melhoramento genético de cana-de-açúcar contribuíram para o desenvolvimento de variedades com maior produção de colmos e açúcar, logo visando a obtenção de materiais com elevada produtividade, elevado teor de sacarose, bom perfilhamento, resistência a pragas e doenças (SANTOS; BORÉM; CALDAS, 2015; MORAIS et al., 2015).

Na última década, os programas de melhoramento também têm direcionado esforços para o desenvolvimento de genótipos mais fibrosos (CORRER, et al., 2020), por consequência, o investimento em produção de fibra tem resultado na obtenção de plantas mais rústicas, menos exigentes em condições ambientais e nutrientes, logo com maior eficiência energética no cultivo (MATSUOKA et al., 2010; VIOLANTE, 2012).

No Rio Grande do Sul a cultura está associada a atividades desenvolvidas em propriedades agrícolas familiares com o processamento de produtos artesanais como,

melado, açúcar mascavo, rapadura, cachaça entre outros, alimentação de animais e também produção de etanol em pequena escala (SILVA et al., 2016).

Nesse contexto, torna-se evidente a importância do estudo e caracterização da biomassa de novos genótipos de cana-de-açúcar com potencial de utilização para fins energéticos, bem como para a utilização na alimentação animal. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo, identificar genótipos de cana-de-açúcar com potencial para geração de energia e produção de forragem.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Produção de energia

A inserção dos biocombustíveis na matriz energética brasileira ocorreu inicialmente a partir do etanol, com o lançamento do Programa Nacional do Álcool (Proálcool) em 1975, o qual tinha como objetivo inicial reduzir a dependência do país por óleo importado, durante a crise do petróleo (DELGADO; SOUSA; ROITMAN, 2017). O programa foi determinante em apontar a viabilidade da cana-de-açúcar no setor industrial, como uma matéria-prima para a co-produção de energia em larga escala em usinas integradas, e não apenas para o mercado de alimentos (O'HARA; MUNDREE, 2016).

Atualmente, a crescente demanda energética e a grande preocupação com a questão ambiental, têm aumentado o interesse de vários países no desenvolvimento de novas tecnologias e na valorização de fontes alternativas de energia que substituam a utilização de combustíveis fósseis (WILLIAMS; DAHIYA; PORTER, 2020), uma vez que estes contribuem para o aumento de carbono na atmosfera potencializando o efeito estufa (FONSECA, 2020). Neste contexto, a matriz energética brasileira pode ser considerada uma das mais limpas, apresentando grande destaque para as fontes renováveis de energia.

Segundo dados disponibilizados pelo Ministério de Minas e Energia, no ano de 2020, 48,4% da matriz energética brasileira foi formada por fontes renováveis, onde etanol e bagaço de cana-de-açúcar representaram 39,5% das fontes renováveis (figura 1) (MME, 2021).

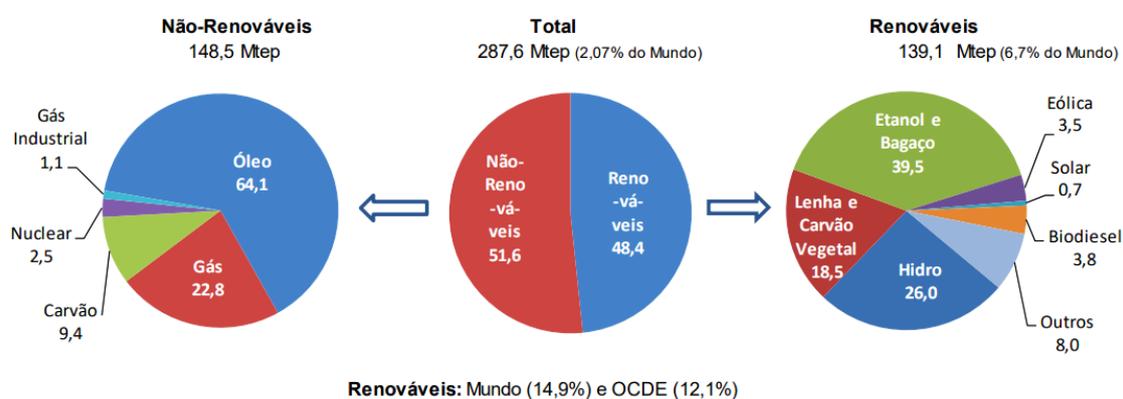


Figura 1. Oferta interna de energia no Brasil - 2020 (%)

Fonte: Ministério de Minas e Energia.

Entre os fatores que colocam o Brasil em vantagem na produção de biocombustíveis, quando comparado a outros países, estão as condições climáticas favoráveis e a grande quantidade de áreas agrícolas disponíveis para o plantio de culturas energéticas, sem competir com a produção de alimentos (SANTOS; BORÉM; CALDAS, 2015; DELGADO; SOUSA; ROITMAN, 2017).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de etanol, ficando atrás apenas dos Estados Unidos, e o maior produtor de etanol a partir de cana-de-açúcar. A área colhida da cultura na safra 2020/21 foi de 8,62 milhões de hectares com produção de 654,8 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (CONAB, 2021). Em relação a produção brasileira de etanol, nos anos de 2018 e 2019, conforme observado na Figura 2, verifica-se aumento crescente na produção de etanol, em um cenário mais favorável a produção deste biocombustível, principalmente associado a queda do preço do açúcar, a produção brasileira atingiu a marca de 36 bilhões de litros de etanol produzidos. Em contrapartida, no ano de 2020 observa-se queda de 10,6% no volume de etanol produzido, esse resultado está atrelado a Pandemia de Covid-19 que restringiu a mobilidade pessoal, resultando na redução do consumo de combustíveis, bem como ao aumento das cotações internacionais de açúcar (EPE 2021a, EPE, 2021b).

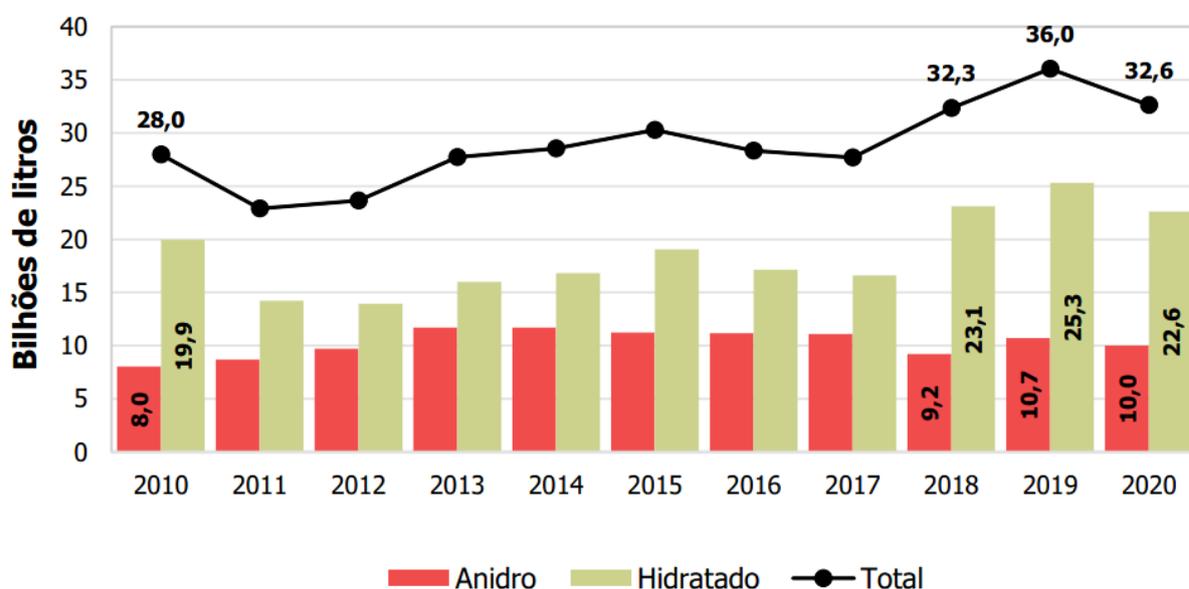


Figura 2. Produção Brasileira de Etanol

Fonte: EPE a partir de (MAPA, 2021).

Nos últimos anos, vem ocorrendo um grande incentivo à produção de biocombustíveis de segunda geração, os quais utilizam matéria prima lignocelulósica, como uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis, visando diminuir os

impactos ambientais. Comparado aos de primeira geração, biocombustíveis de segunda geração apresentam vantagens ambientais e econômicas, como a utilização de matérias-primas que não são destinadas a produção de alimentos, como resíduos agrícolas e agroindustriais (PACHECO, 2011).

Considerando o atual cenário e a supremacia brasileira na produção de etanol a partir de cana-de-açúcar, é evidente a importância do desenvolvimento de estratégias e tecnologias que visam aprimorar o desempenho do setor sucroenergético brasileiro. Nesse sentido, o aumento de produção pode acontecer de duas formas, quando considerado o processamento industrial, sendo elas: I- através do aperfeiçoamento das tecnologias disponíveis para produção de etanol de primeira geração; II- a partir do estímulo de pesquisas e do desenvolvimento científico-tecnológico para a produção de etanol de segunda geração (PACHECO, 2011).

A utilização de biomassas lignocelulósicas para a produção de biocombustível, no caso da cana-de-açúcar, bagaço e palha, pode aumentar em até 50% o volume de etanol produzido sem a necessidade da expansão de áreas agrícolas (CANILHA et al., 2012; SANTOS et al., 2012). Nesse sentido, existe um estímulo para o desenvolvimento de pesquisas voltadas para o aumento de produtividade de etanol produzido a partir de cana-de-açúcar no Brasil, visando a utilização da palha e do bagaço (fontes lignocelulósicas) como matéria-prima.

O etanol de primeira e segunda geração apresentam a mesma composição físico-química. A diferença está associada a matéria-prima e o processo de produção. O etanol produzido a partir do caldo de cana-de-açúcar é classificado como biocombustível de primeira geração, pois utiliza matérias-primas também destinadas à alimentação (JAISWAL; AGARWAL; TRIPATHI, 2021). Biocombustíveis de segunda geração utilizam biomassas lignocelulósicas através de processos significativamente mais complexos do que os processos de primeira geração (DEMIRBAS, 2009; KUMAR; SHARMA, 2017; DEVI et al., 2019; JAISWAL; AGARWAL; TRIPATHI, 2021).

A biomassa lignocelulósica apresenta como principais componentes químicos a celulose, hemicelulose e a lignina, formando uma estrutura complexa, com características de recalcitrância a decomposição (MOOD et al., 2013). Além desses, é constituída por pequena quantidade de cinzas, extrativos, proteínas, amido e outros (SANTOS; COLODETT; QUEIROZ, 2013).

A celulose é o principal constituinte da parede celular vegetal, é o biopolímero mais abundante do mundo, sendo um polímero linear formado apenas por moléculas

de glicose (SANCHEZ, 2009; LIAO et al., 2020; FARIAS et al., 2022). A hemicelulose é um polímero ramificado composto por diferentes açúcares como xilose, glicose, galactose, manose e arabinose, além de ácidos urônicos (Of Energy, 2015; MIELENZ, 2015). Este componente químico interconecta as microfibras de celulose aos demais constituintes da parede celular, o que propicia força estrutural a esta. A lignina é um heteropolímero formado por unidades de fenilpropanóides altamente resistente à degradação, resultando disso o seu papel na manutenção da integridade física da parede celular. Depois da celulose, a lignina é a macromolécula mais abundante dentre as biomassas. A concentração de cada um desses componentes depende de fatores como biomassa, tipo de tecido, idade da planta e condições de crescimento (SANTOS; COLODETT; QUEIROZ, 2013).

As principais etapas para produção de etanol de segunda geração são: 1- pré-tratamento da biomassa, para tornar a celulose e hemicelulose acessíveis as etapas posteriores, que é geralmente realizado através de uma etapa mecânica para reduzir o tamanho de partícula e uma etapa química (ácido diluído, alcalino, extração com solvente, explosão a vapor entre outros); 2- hidrólise ácida ou enzimática visando quebrar polissacarídeos em açúcares simples; 3- fermentação, etapa onde os açúcares (hexoses e pentoses) são fermentados a etanol utilizando microrganismos; 4- separar e concentrar o etanol produzido (SANCHEZ; CARDONA, 2008; MUSSATO, et al., 2010).

Para produção de etanol de segunda geração buscaram-se genótipos com elevada produção de biomassa, bem como elevados teores de celulose e hemicelulose na fração fibrosa, porém com baixos teores de lignina (TEW; COBILL, 2008).

Visando aperfeiçoar a produção de energia, fundamentada na produção de biomassa, vem sendo desenvolvido por programas de melhoramento genético híbridos da espécie *Saccharum* spp., obtendo-se a chamada cana energia, caracterizada por apresentar elevada produtividade, alto conteúdo de fibras, maior rusticidade, tolerância a seca, resistência a pragas e doenças e melhor adaptadas as condições ambientais (MATSUOKA, et al., 2012; SILVA, 2016).

Por apresentar características de maior rusticidade e adaptabilidade, a cana-energia permite a expansão do cultivo em áreas classificadas como marginais, permitindo a produção sustentável sem que se tenha competição com outras culturas, principalmente aquelas destinadas a alimentação humana (VIOLANTE, 2012). Além

disso, a cana energia apresenta maior teor de fibra, em sua composição, característica que pode potencializar o poder calorífico da biomassa e conseqüentemente a cogeração.

A cana-energia possui classificações de acordo com sua composição e finalidade de uso, a cana-energia do tipo 1 caracteriza-se por apresentar teor de fibra acima de 18% e teor de sacarose acima de 15%, sendo indicada para produção de etanol de segunda geração, já a cana-energia do tipo 2 apresenta teor de fibra acima de 28% e teor de sacarose inferior a 6%, visando produzir biomassa para geração de energia (BARBOSA, 2014).

Atualmente a produção de bioeletricidade gerada a partir da biomassa da cana-de-açúcar é a quarta fonte mais importante da matriz energética brasileira, embora atualmente seja aproveitado apenas 15% do potencial de produção, se houvesse o aproveitamento total da biomassa dos canaviais, a energia produzida teria capacidade para atender mais de 30% da demanda nacional por energia no sistema Nacional Integrado (UNICA, 2022).

Segundo Almeida (2018), o bagaço de cana-de-açúcar é a biomassa de maior representatividade na matriz elétrica brasileira, suprimindo integralmente a demanda de energia da unidade de produção de açúcar e etanol, por meio de cogeração.

As mudanças na legislação, a partir da regulamentação das queimadas pré-colheita e proibição do emprego de fogo no canavial pelo Código Florestal, bem como o processo de transição da colheita manual para mecanizada, acarretaram no aumento da quantidade de biomassa residual nas lavouras de cana-de-açúcar. Além disso, o bagaço, resultante do processo de esmagamento para produção de açúcar e etanol, é considerado o principal resíduo da indústria sucroalcooleira, constituindo uma biomassa de grande importância, utilizada como insumo energético (FLAUSINIO, 2015; ALMEIDA, 2018).

2.2. Cana-de-açúcar para produção de forragem

A pecuária no Brasil desempenha grande papel econômico e social. Santos et al. (2015) apontam que frente a realidade mundial, o Brasil destaca-se como um dos principais países com potencial para atender o aumento da demanda de alimentos.

A cana-de-açúcar apresenta-se como uma cultura com elevado potencial para utilização como forrageira, devido a características como elevada capacidade de produção de matéria seca (MS) por área (DEL VALLE et al., 2018; SILVA et al., 2020)

e elevado conteúdo de energia por unidade de MS (SCHMIDT, 2006; DANIEL et al., 2014; SILVA et al., 2014).

Outro diferencial da espécie, é que esta apresenta elevado teor de carboidratos solúveis, acúmulo de sacarose no período de estiagem e baixo custo de produção de MS por unidade de área (SILVA, 2014).

Tais características, principalmente o elevado potencial produtivo e o ciclo de colheita, que coincide com o período de escassez de forragem, tornam a utilização da cana-de-açúcar uma alternativa como recurso forrageiro, contornando o problema de sazonalidade da produção de forragens (DOMINGUES et al., 2011; GIACOMINI et al., 2014; MORAES et al., 2017; CANIZARES et al., 2021). Além disso, é considerada por muitos autores como a opção forrageira de melhor desempenho bioeconômico para a alimentação de ruminantes (NUSSIO et al., 2003; RESENDE et al., 2005; SIQUEIRA et al., 2008; SIQUEIRA et al., 2012).

Como forrageira, a cana-de-açúcar possibilita assegurar melhor padrão alimentar para os animais durante períodos críticos de escassez de forragem, pois ao contrário das demais gramíneas tropicais, mantêm seu valor nutricional praticamente inalterado com a maturidade (FERNANDES et al., 2003).

No Rio Grande do Sul a cultura apresenta grande importância para agricultura familiar, sendo utilizada na alimentação dos animais, principalmente no período de inverno e épocas de estiagem (RUGERI, 2015). De acordo com o Censo Agro 2017, a cultura apresenta produção superior a 446 mil toneladas e está presente em mais de 31 mil estabelecimentos rurais, destes mais de 7 mil estabelecimentos (aproximadamente 24%) utilizam a cultura como forrageira (IBGE, 2017).

O estado do RS possui dois períodos críticos de escassez de forragem, os chamados “vazio forrageiro” de primavera e de outono, estes períodos são caracterizados pelas baixas disponibilidades de forragem devido as transições entre as pastagens de ciclo de inverno e de verão. O chamado vazio forrageiro outonal ocorre nos meses de março a julho, quando as pastagens de verão envelhecem e as pastagens de inverno ainda não estão prontas para o pastejo (EMBRAPA, 2018). Já o vazio forrageiro primaveril, ocorre no final da primavera, quando as pastagens de inverno estão em final de ciclo e as de verão ainda estão indisponíveis (KUHN; CUMBE; BARCELLOS, 2020).

A cana-de-açúcar pode ser utilizada como estratégia importante para suprir volumoso de qualidade para os rebanhos durante os períodos de escassez de

pastagens e garantir a estabilidade produtiva. Para o período de vazio forrageiro primaveril, o cultivo pode ser fornecido aos animais na forma in natura, uma vez que coincide com o período que a cultura apresenta maturação adequada. No entanto, para suprir a demanda de forragem no período do vazio outonal com cana-de-açúcar, é necessário a colheita em estágio de maturação adequado e conservação da cultura na forma de silagem, até o período de fornecimento.

A ensilagem é um método importante de preservação de forragem, permitindo que grandes quantidades de forragem possam ser conservadas rapidamente, minimizando a perda de nutrientes desde a colheita até o armazenamento (GRANT; ADESOGAN, 2018).

Para cana-de-açúcar a produção de silagem pode ser utilizada como uma estratégia pelos produtores, visando melhorar a eficiência de colheita e manejo dos canaviais, além de possibilitar o armazenamento de sobras dos canaviais no final da safra, bem como solucionar problemas emergenciais, como a ocorrência de geadas severas ou incêndios acidentais, sem que ocorra perda total da forragem (PEDROSO, 2004).

O processo de conservação de forragens na forma de silagem baseia-se em dois princípios: o primeiro é proporcionar condições de anaerobiose, visando inibir a atividade de microrganismos aeróbicos, através do rápido preenchimento do silo e posterior vedação. O segundo é inibir a atividade de microrganismos indesejáveis pela redução do pH, controlando a atividade de microrganismos anaeróbicos (MCDONALD et al., 2010). O principal responsável pela redução do pH no silo é o ácido láctico, produzido por bactérias ácido-láticas que utilizam açúcares como substrato na fermentação (LOPES, 2006; BERNADES, 2003).

No entanto, a cana-de-açúcar apresenta elevado teor de açúcares e alta população de leveduras, o que pode levar a intensa fermentação alcoólica, e conseqüentemente causar perda excessiva de matéria seca, perda de açúcar, produção de etanol, baixa estabilidade aeróbia e redução no valor nutritivo da silagem (CARVALHO et al., 2015; DOS SANTOS et al., 2015; PEDROSO et al., 2018). Nesse sentido, diversos estudos apontam a importância do uso de aditivos para controlar as leveduras e reduzir as perdas durante a ensilagem (ALLI et al., 1982; CARVALHO et al., 2014; CARVALHO et al., 2015; CHIZZOTTI et al., 2015; SILVA et al., 2019).

A utilização de inoculantes bacterianos visa melhorar conservação das silagens de cana-de-açúcar, a partir da promoção do crescimento de microrganismos benéficos

e da inibição de microrganismos indesejáveis como leveduras e clostrídios (FERREIRA et al., 2007).

O uso de *Lactobacillus buchneri* em silagens de cana-de-açúcar é uma opção para minimizar perdas durante a fermentação e aumentar a estabilidade aeróbia, uma vez que, o ácido acético produzido pelas bactérias é capaz de inibir o metabolismo de leveduras e fungos filamentosos e, conseqüentemente reduzir a fermentação alcoólica e perdas de matéria seca (RANJIT; KUNG, 2000; SIQUEIRA et al., 2007)

Os inoculantes microbiológicos podem atuar na produção de silagens bem preservadas, promovendo rápida redução no pH da silagem e prevenindo a deterioração aeróbica (DRIEHUIS et al., 2018). Neste contexto, é importante definir a interação entre diferentes genótipos e microrganismos no processo de ensilagem, visando minimizar as perdas e garantir maior valor nutricional do produto final.

As principais características necessárias para o processo de ensilagem são: teor de matéria seca próximo de 30%, teor de carboidratos solúveis acima de 10% e capacidade tampão que permita a redução do pH, através da produção de ácidos orgânicos (BONFÁ, et al., 2018).

Desta forma, é importante a escolha de genótipos de cana-de-açúcar que se adequem as finalidades de uso propostas, bem como aqueles que sejam mais adaptados as condições do local de cultivo. Uma vez que as condições edafoclimáticas, fatores bióticos e abióticos associados ao manejo influenciam a produtividade da cultura (XAVIER et al., 2020).

Alguns dos critérios que são adotados para avaliar variedades de cana-de-açúcar para utilização como forrageira são baseados na produtividade, nos teores de fibra em detergente neutro (FDN) e nos teores de açúcares (Brix) (MAGALHÃES et al., 2018). Assim visando a obtenção de genótipos produtivos, com baixos teores de FDN e elevados teores de açúcares.

...

2. Metodologia Geral

Visando identificar o potencial uso da biomassa de cana-de-açúcar, para produção de energia e forragem, foram avaliados 18 genótipos de cana-de-açúcar, desenvolvidos pela RIDESA (Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético) e disponibilizados pelo Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar (PMGCA) da UFPR. Estes genótipos possuem diferentes características quanto a composição e finalidade de uso, estando divididos em dois grupos, o grupo identificado pela sigla “PRBIO” antecedendo o número de identificação, corresponde a genótipos de cana energia, que são oriundos de cruzamentos e seleções visando à produção de biomassa. Enquanto o grupo identificado pela sigla “RB” antecedendo o número de identificação, tem seleção voltada para produção de açúcar e etanol. Entre os genótipos avaliados oito correspondem ao grupo PRBIO e dez ao grupo “RB”, sendo duas variedades (RB867515 e RB966928) utilizadas como testemunhas de ciclo médio-tardio e precoce respectivamente.

No primeiro capítulo estão apresentados os dados de desempenho produtivo e composição dos genótipos, referentes ao experimento de campo, onde foram avaliadas as variáveis: produtividade de massa fresca (TMF), produtividade de massa seca (TMS), produtividade de colmos (TCH) e produtividade de sólidos solúveis totais (TBH), todos expressos em $t\ ha^{-1}$. Os genótipos também foram avaliados quanto a composição química, onde foram quantificados os teores de fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), celulose (CEL), hemicelulose (HEM) e lignina (LIG), todos expressos em percentual na matéria seca. Este capítulo teve por objetivo associar as variáveis de desempenho produtivo com a composição bromatológica dos genótipos para melhor avaliar o potencial dos mesmos para cada uma das finalidades, produção de energia e produção de silagem.

O segundo capítulo teve o objetivo de avaliar o desempenho de genótipos e o do efeito de inoculantes bacterianos na produção de silagem de cana-de-açúcar. Para isso, foram realizados dois experimentos, o primeiro visou avaliar o desempenho dos genótipos no processo de ensilagem, através das avaliações de perdas de matéria seca e estabilidade aeróbia das silagens.

Com base no desempenho produtivo dos genótipos (TMF) e perdas de MS no primeiro experimento com silagem, foram selecionados seis genótipos, três de cada

grupo (PRBIO e RB) para testar o efeito do uso de inoculantes bacterianos no processo de ensilagem, dando origem ao segundo experimento, onde foi avaliada a composição dos genótipos (FDN, FDA, CEL, HEM e LIG) antes e depois do processo de ensilagem, perdas de matéria seca, estabilidade aeróbia e perfil fermentativo das silagens (ácido láctico, ácido acético, ácido propiônico, ácido butírico).

O terceiro e último capítulo teve por objetivo avaliar o desempenho dos genótipos visando a produção de energia nas formas de etanol de primeira geração (1G), etanol de segunda geração (2G) e cogeração de energia. Para a avaliação dos genótipos para produção de etanol 1G foram calculados os rendimentos teóricos de etanol 1G, para isso foram utilizadas as produtividades de TBH e através de equação específica, foram calculados os rendimentos em litros de etanol 1G por hectare. Para os rendimentos de etanol 2G foi realizado o somatório dos rendimentos teóricos de etanol produzidos a partir de HEM (EHEM) e rendimentos de etanol produzido a partir de CEL (ECEL). Enquanto, os rendimentos teóricos de energia por cogeração foram estimados com base no poder calorífico superior (PCS), da biomassa dos genótipos, associados a produtividade de TMS.

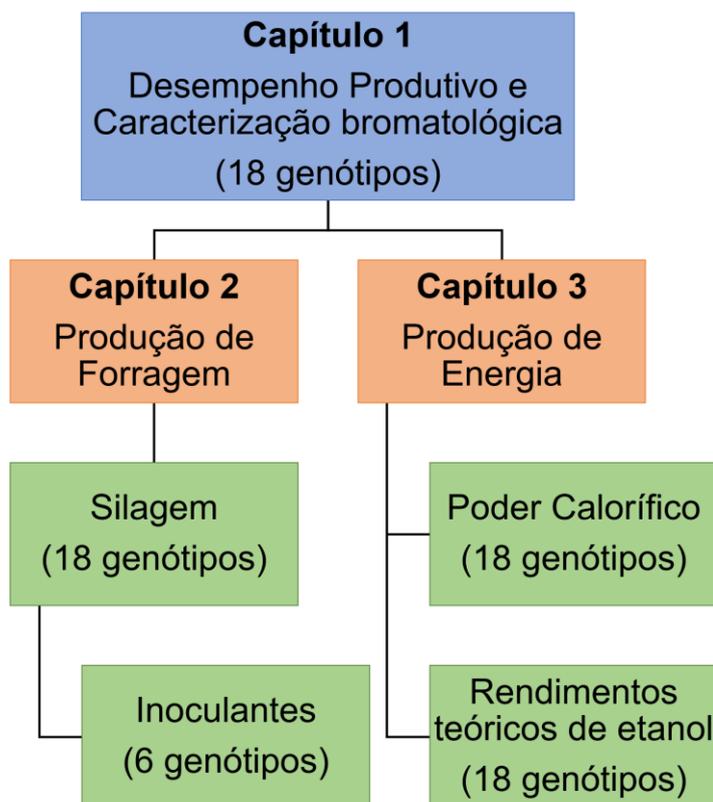


Figura 3. Fluxograma resumido da metodologia do trabalho.

Os experimentos foram conduzidos na Estação Experimental da Embrapa Clima Temperado, em Pelotas-RS, cujas coordenadas são 31° 40' 16" S e 52° 26' 28" O, com altitude de 68 m. O clima da região é classificado como do tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen (KUNINCHTNER; BURIEL, 2001).

As análises do perfil fermentativo das silagens foram realizadas pelo laboratório de multiusuários (LEMU) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) Campus de Tupã -SP.

As análises da composição química das silagens foram realizadas pelo laboratório ESALQLab, do Departamento de Zootecnia na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP.

As determinações de PCS das biomassas de cana-de-açúcar foram realizadas no laboratório de Bioenergia do Centro de Engenharias da Universidade Federal de Pelotas – UFPel.

3. Capítulo 1: Desempenho produtivo e composição química de genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de primeira soca com foco na produção de energia e forragem

3.1. Introdução

A cana-de-açúcar ocupa posição de destaque mundial sendo amplamente plantada em regiões tropicais. O Brasil historicamente lidera o ranking dos maiores produtores mundiais de cana-de-açúcar, atualmente seguido pela Índia e China (FAOSTAT, 2022). O cultivo no país apresenta importância, em virtude da ampla variedade de produtos fabricados a partir do beneficiamento da cultura, principalmente através da produção de açúcar e etanol.

A área colhida da cultura na safra 2020/21 foi de 8,62 milhões de hectares com produção de 654,8 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, 27 bilhões de litros de etanol e 38,9 milhões de toneladas de açúcar (CONAB, 2021). A produção de eletricidade através da cogeração de energia foi de 22,6 mil GWh (UNICA).

No Rio Grande do Sul (RS), a cana-de-açúcar apresenta importância por estar associada a atividades desenvolvidas em pequenas propriedades com o processamento de vários produtos artesanais e também relacionada a criação de gado (SILVA et al., 2016). Segundo dados do último censo agropecuário (IBGE, 2017), no estado do RS, a cultura apresenta produção superior a 446 mil toneladas e está presente em mais de 31 mil estabelecimentos rurais, destes aproximadamente 24% (7.435 estabelecimentos) utilizam a cultura como forrageira.

A produtividade média da cultura para o RS, na safra 2020/21 foi de 45 t ha⁻¹, produtividade baixa quando comparada à média nacional na mesma safra, que foi 76 t ha⁻¹ (CONAB, 2021). Assim, a avaliação e identificação de genótipos de cana-de-açúcar mais produtivos e adaptados para o Rio Grande do Sul, são de extrema importância a expansão da cultura (ANTUNES, et al., 2017).

A escolha de genótipos adaptados as condições de cultivo, é um dos principais fatores que afetam o desempenho produtivo da cana-de-açúcar, bem como a qualidade dos produtos obtidos a partir desta matéria-prima (MASCARENHAS, 2021). Uma vez que as condições edafoclimáticas, fatores bióticos e abióticos associados a manejos influenciam a produtividade da cultura (XAVIER et al., 2020).

A ampla variação na composição química nutricional de genótipos de cana-de-açúcar, permite o desenvolvimento de novas variedades, por programas de

melhoramento genético da cultura, para diversos fins entre estes: produção de forragem, etanol de segunda geração e produtos artesanais (SILVA et al., 2016).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar e caracterizar novos genótipos de cana-de-açúcar visando produção de forragem e produção de energia com base na produtividade e composição química.

3.2. Material e métodos

As avaliações de composição química e desempenho produtivo foram realizadas em 18 genótipos de cana-de-açúcar, sendo oito genótipos do grupo PRBIO (cana energia) e dez genótipos do grupo RB, entre estas duas variedades (RB867515 e RB966928) utilizadas como testemunhas de ciclo médio-tardio e precoce respectivamente.

O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Embrapa Clima Temperado, em Pelotas-RS, cujas coordenadas são 31° 40' 16" S e 52° 26' 28" O, com altitude de 68 m.

A implantação do experimento de campo foi realizada em 12/11/2016, utilizando mudas pré-brotadas com espaçamento de 0,5 metros entre plantas e 1,4 metros entre linhas, as parcelas foram constituídas por quatro linhas de cinco metros de comprimento, totalizando 11 plantas por linha e 44 plantas por parcela. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso com três repetições.

As avaliações de desempenho produtivo dos genótipos de cana-de-açúcar foram realizadas na safra 2017-2018 em ciclo de primeira soca, a partir determinação das produtividades de massa fresca (TMF), produtividade de massa seca (TMS), produtividade de sólidos solúveis totais (TBH) e produtividade de colmos (TCH).

Para determinar as produtividades (TMF e TCH) foram coletadas duas touceiras em sequência, na parte central da linha em umas das linhas centrais da parcela, na sequência as touceiras foram pesadas em sua totalidade (folhas e colmos), e posteriormente foi removida a fração folha para a pesagem dos colmos.

A produtividade de massa fresca por hectare (TMF), expressa em t ha⁻¹ foi calculada através da equação:

$$TMF = PT \div E \times 10$$

Onde:

PT: Massa de duas touceiras inteiras com colmos e folhas (kg)

E: Espaçamento (1,4 m)

Para calcular a produtividade de massa seca (TMS), expressa em t ha⁻¹ foi utilizada a equação descrita abaixo:

$$TMS = TMF \times MS$$

Onde:

TMF: produtividade de massa fresca por hectare (kg ha⁻¹)

MS: Teor de matéria seca na planta

Para produtividade de colmos (TCH), expressa em t ha⁻¹ foi utilizada a equação descrita abaixo:

$$TCH = PC \div E \times 10$$

Onde:

PC: Massa de colmos de duas touceiras (kg)

E: Espaçamento (1,4 m).

Para a obtenção da produtividade de sólidos solúveis totais (TBH), foi associado o teor de Brix médio (BM) do genótipo no momento da colheita, com a produtividade de colmos (TCH), utilizando a equação descrita abaixo:

$$TBH = (BM \times TCH) \div 100.$$

Onde:

BM: Teor de sólidos solúveis totais médio do colmo no momento da colheita (°Brix)

TCH: Produtividade de colmos por hectare

A determinação do teor de sólidos solúveis totais (Brix), foi realizada na parte basal do colmo (terceiro entrenó de baixo para cima) e na parte superior do colmo (terceiro entrenó de cima para baixo) em três colmos por parcela, utilizando refratômetro digital marca HANNA® modelo HI 96801, com compensação automática de temperatura entre 10 e 40 °C e precisão de ± 0,2° Brix. Para esta variável foram apresentados os resultados da média das avaliações de Brix superior e inferior (BM).

O preparo das amostras para análise deu-se a partir da coleta de três colmos inteiros (colmos e folhas) representativos na parcela, posteriormente, as amostras foram trituradas em picador estacionário, e secas em estufa a 55° C até atingirem peso constante. Após a secagem, as mesmas foram moídas em moinho do tipo Willey com peneira de 1 mm.

A determinação do teor de matéria seca (MS) foi realizada em estufa a 105° C (por 12 h) de acordo com o AOAC (1990, método n. 943,01), as variáveis: fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA) e lignina (LIG) foram

determinadas utilizando método de espectroscopia de infravermelho próximo (NIR), equipamento modelo NIRS Flex 500 (Buchi), cuja os dados das curvas de calibração estão apresentadas nos anexos (A1, A2, A3 e A4) os teores de HEM foram obtidos pela diferença entre FDN e FDA, enquanto os teores de CEL foram obtidos pela diferença entre FDA e LIG.

Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias quando significativas foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. O processamento de dados foi realizado com auxílio do software Genes (CRUZ, 2013).

3.3. Resultados e discussão

A maior produtividade TMF foi observada para o genótipo PRBIO435 com média de 195 t ha⁻¹, além desse, outros sete genótipos apresentaram destaque, com produtividades superiores a 120 t ha⁻¹ alcançando até 152,7 t ha⁻¹ (RB867515, RB106819, PRBIO407, RB106814, PRBIO353, RB106822 e PRBIO528), mesmo que não tenham constituído o grupo de maiores médias (Tabela 1).

Tabela 1. Desempenho de genótipos de cana-de-açúcar quanto as produtividades de matéria fresca (TMF), matéria seca (TMS), colmos (TCH) e sólidos solúveis totais (TBH) em ciclo de primeira soca.

Genótipo	TMF	TMS	TCH	TBH
	(t ha ⁻¹)			
PRBIO435	195,0 a	39,0 a	165,3 a	31,2 a
RB867515	152,7 b	28,7 b	138,5 b	24,8 b
RB106819	151,5 b	27,6 b	130,7 c	24,0 b
PRBIO407	142,2 b	32,8 a	120,7 c	23,4 b
RB106814	135,5 b	26,1 b	122,2 c	23,1 b
PRBIO353	131,4 b	21,0 c	110,7 c	17,0 c
RB106822	124,0 b	23,0 c	111,4 c	21,8 b
PRBIO528	123,4 b	20,3 c	107,4 c	16,1 c
RB106818	116,4 c	24,6 b	101,7 d	19,3 b
RB966928	112,1 c	26,5 b	95,7 d	20,1 b
PRBIO537	109,3 c	19,4 c	96,7 d	16,2 c
PRBIO354	101,7 c	18,6 c	86,0 d	14,9 c
PRBIO293	101,1 c	18,2 c	88,5 d	15,4 c
RB006995	96,7 c	24,2 b	86,2 d	18,1 c
PRBIO337	95,0 c	18,7 c	76,0 e	9,9 d
RB106807	83,9 d	14,9 c	67,4 e	12,5 d
RB036153	69,0 d	16,8 c	59,7 e	12,2 d
RB106815	59,5 d	14,6 c	52,1 e	10,3 d
Média	116,7	23,1	100,9	18,4
CV.(%)¹	14,9	17,8	13,9	13,7

^{a-d} Médias seguidas pelas mesmas letras na vertical constituem o mesmo grupo, pelo teste Scott-Knott (p≤0,05). ¹CV: Coeficiente de variação.

A variável TMF apresenta grande importância na avaliação dos genótipos para a alimentação animal, pois permite estimar a quantidade de forragem produzida por unidade de área. Silva et al. (2020), destacam produtividades elevadas para a cultura entre 80 e 120 t de TMF ha⁻¹. Dos 18 genótipos avaliados, a maioria apresentou elevado desempenho produtivo, tendo somente dois genótipos apresentado produtividades inferiores a 80 t ha⁻¹ (RB036153 e RB106815).

As maiores produtividades de TMS foram observadas para os genótipos de cana energia PRBIO435 e PRBIO407, com 39,0 e 32,8 t ha⁻¹, respectivamente. A cana energia é caracterizada por apresentar elevada produtividade, alto conteúdo de fibras, além de melhor se adaptar as condições ambientais (MATSUOKA, et al., 2012; SILVA, 2016), fatores que provavelmente influenciaram o maior desempenho destes genótipos para esta variável. O segundo grupo mais produtivo foi constituído por seis genótipos de cana-de-açúcar pertencentes ao grupo RB: RB867515, RB106819, RB106814, RB106818, RB966928 e RB006995, que apresentaram produtividades de MS entre 24,2 e 28,7 t ha⁻¹, embora inferiores ao primeiro grupo, ainda assim elevadas. Produtividades de matéria seca entre 25 e 40 t ha⁻¹ podem ser consideradas elevadas para a cultura (ÁVILA et al., 2009; GANDRA, et al., 2016; GOMES, et al. 2021).

O genótipo de cana energia PRBIO435 foi o mais produtivo para a variável TCH, com produtividade superior a 165 t ha⁻¹, seguido pela variedade RB867515 com produtividade de 138,5 t ha⁻¹, outros seis genótipos constituíram o grupo com produtividades entre 107,4 a 130,7 t ha⁻¹, que podem ser consideradas elevadas para cultura. Enquanto o quarto grupo também foi formado por seis genótipos (RB106818, RB966928, PRBIO537, PRBIO354, PRBIO293 e RB006995) embora não tenha apresentado produtividades tão expressivas quanto os anteriores, com médias entre 86,0 e 101,7 t ha⁻¹, estes apresentam produtividades que superam a produtividade média nacional de 76 t ha⁻¹ na safra 2020/21 (CONAB, 2021), resultados que indicam o bom desempenho produtivo destes genótipos. Os demais genótipos constituíram o quinto grupo com médias inferiores a 76 t ha⁻¹.

Assim como para TCH, a maior produtividade de TBH foi observada para o genótipo PRBIO435 com média de 31,2 t ha⁻¹, que foi seguido dos genótipos RB867515, RB106819, PRBIO407, RB106814, RB106822, RB106818 e RB966928 que apresentaram médias entre 19,3 e 24,8 t ha⁻¹. Os genótipos RB006995, PRBIO353, PRBIO537, PRBIO528, PRBIO293 e PRBIO354 apresentaram

produtividades entre 14,9 e 18,1 t ha⁻¹, enquanto os demais apresentaram médias inferiores a 12,5 t ha⁻¹. As produtividades dos genótipos que constituíram o terceiro e quarto grupo (inferiores a 18,1 t ha⁻¹), podem ser consideradas baixas, quando comparadas as obtidas por Antunes et al. (2017) que ao avaliar o desempenho produtivo de genótipos precoces de cana-de-açúcar no RS, obteve produtividade média geral de TBH de 22,2 t ha⁻¹ chegando a 24,8 t ha⁻¹.

A produção de etanol de primeira geração (1G) é obtida a partir da fermentação dos açúcares presentes no caldo (PACHECO, 2011; SANTOS et al., 2012; JAISWAL; AGARWAL; TRIPATHI, 2021). Dessa forma, entre as variáveis avaliadas neste estudo, a que melhor permite avaliar o potencial de genótipos visando a produção de etanol 1G, é TBH, considerando que esta variável é o resultado da associação da produtividade de colmos com o teor de sólidos solúveis totais.

Portanto os novos genótipos demonstram elevado potencial, com base no desempenho produtivo, principalmente aqueles que apresentaram produtividades semelhantes as variedades RB867515 e RB966928, tendo em vista a importância comprovada destas em nível nacional. A variedade RB867515 é a mais cultivada no Brasil, ocupando a primeira posição há mais de dez safras consecutivas e atualmente é cultivada em aproximadamente um quarto da área plantada com cana-de-açúcar. Enquanto, a variedade RB966928 é a segunda mais cultivada do país com participação de mais de 10% da área de cana-de-açúcar na safra 2018/19, além de apresentar aumento em áreas de renovação, principalmente no estado de São Paulo, tendo em vista que apresenta características favoráveis a colheita mecanizada (BRAGA JUNIOR et al., 2021).

Ainda que, os genótipos tenham apresentado bom desempenho produtivo, a combinação destes resultados com a composição química da biomassa é importante para indicar o potencial de utilização destes, conforme a finalidade de uso pretendida. Sendo assim, os resultados de caracterização química dos genótipos, quanto aos teores de FDN, FDA, HEMI, CEL, LIG, CZ e MS estão apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização de genótipos de cana-de-açúcar quanto aos teores de fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), hemicelulose (HEMI), celulose (CEL), Lignina (LIG), Cinzas (CZ) e matéria seca (MS%).

Genótipo	FDN	FDA	HEMI	CEL	LIG	CZ	MS	BM
	% na MS							
PRBIO354	68,9 a	42,9 A	26,0 a	36,4 b	6,5 a	4,6 b	18,6 b	17,6 b
PRBIO528	68,6 a	44,1 A	24,5 a	38,0 a	6,2 a	5,7 a	16,6 b	15,0 c
PRBIO353	68,4 a	41,8 B	26,6 a	35,0 b	6,8 a	5,3 a	16,1 b	15,2 c
RB106818	68,4 a	47,0 A	21,5 b	40,5 a	6,5 a	4,5 b	20,0 b	19,0 b
PRBIO337	68,2 a	43,3 A	24,9 a	35,9 b	7,4 a	5,9 a	20,0 b	13,3 d
RB106807	67,8 a	44,2 A	23,7 b	37,7 a	6,5 a	5,5 a	17,8 b	18,6 b
PRBIO407	67,5 a	42,6 A	25,0 a	36,0 b	6,6 a	4,0 c	23,0 a	19,4 a
RB106815	67,2 a	45,6 A	21,6 b	39,6 a	6,0 a	4,7 b	24,6 a	20,0 a
PRBIO537	66,6 a	41,1 B	25,5 a	35,1 b	6,0 a	4,9 b	17,7 b	16,7 c
RB106814	66,5 a	44,2 A	22,3 b	38,5 a	5,7 a	5,5 a	19,2 b	18,9 b
RB867515	65,5 a	42,4 A	23,2 b	36,4 b	6,0 a	4,8 b	18,8 b	17,9 b
PRBIO435	65,2 a	40,8 B	24,5 a	34,6 b	6,2 a	5,2 a	19,8 b	18,8 b
PRBIO293	64,6 b	41,5 B	23,1 b	35,0 b	6,5 a	5,5 a	17,8 b	17,5 b
RB006995	64,2 b	40,2 B	24,0 a	33,8 b	6,4 a	3,7 c	24,8 a	21,0 a
RB106819	63,4 b	40,4 B	23,0 b	34,6 b	5,8 a	5,4 a	18,5 b	18,5 b
RB966928	62,9 b	39,4 b	23,5 b	33,2 b	6,1 a	4,7 b	23,5 a	21,0 a
RB106822	60,4 b	40,0 b	20,4 b	33,9 b	6,1 a	4,7 b	18,5 b	19,6 a
RB036153	59,5 b	37,3 b	22,2 b	31,1 b	6,2 a	3,6 c	24,6 a	20,4 a
Média	65,8	42,1	23,6	35,8	6,3	4,9	20,0	18,2
CV.(%)¹	4,3	6,3	8,0	6,9	6,7	11,4	9,6	5,7

^{a-c} Médias seguidas pelas mesmas letras na vertical constituem o mesmo grupo, pelo teste Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

¹CV: Coeficiente de variação.

Em relação a variável FDN os valores variaram entre 59,5 e 68,9, dando origem a dois grupos de genótipos. O grupo formado pelos genótipos PRBIO293, RB006995, RB106819, RB966928, RB106822 e RB036153, apresentou os menores teores de FDN entre os genótipos avaliados, variando de 59,5 a 64,6% na MS, enquanto os demais genótipos apresentaram médias acima de 65%. Selecionar genótipos com menor teor de FDN pode ser uma boa estratégia visando a utilização na alimentação animal, tendo em vista que este pode ser considerado um bom preditor da digestibilidade da MS (DANIEL et al., 2014; DANIEL et al., 2016). Assim, os genótipos que constituíram o grupo de menor teor para esta variável, apresentam maior potencial como forragem. Por outro lado, genótipos com teores de FDN acima de 65% e elevado desempenho produtivo, podem ser utilizados para outros fins, como produção de etanol de segunda geração e cogeração de energia, onde altos teores de fibra são desejados.

Para FDA observa-se variação de 37,3 a 47,0% e formação de dois grupos. O grupo que apresentou maior teor de FDA, foi formado por nove genótipos que obtiveram valores superiores à média (42,1%), os demais genótipos apresentaram teor de FDA menor que a média.

Daniel et al. (2014) avaliando o potencial de digestão de fibras de cana-de-açúcar ao longo da janela de colheita, utilizando espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) para determinar FDN e FDA, obtiveram teor de FDN médio de 52,5 variando entre 39,3 e 67,8% na MS, e teores de FDA entre 22,3 e 39,6% com média de 31,3% na MS. A maior parte dos resultados de FDN obtidos no presente estudo estão dentro da faixa de variação citada, indicando que são resultados esperados para a cultura, no entanto para FDA os resultados foram em geral superiores, fato que pode estar associado a maturação da cultura e teor de MS.

Quanto a variável HEMI, de maneira geral, foram obtidos maiores teores para os genótipos “PRBIO” e menores teores para genótipos “RB” como pode ser observado na formação dos grupos, onde dentre os oito genótipos que compõem o grupo de maiores teores (24,0 a 26,6%), sete são genótipos “PRBIO” e apenas um “RB” (RB006995), assim como para o grupo de menores médias (20,4 a 23,7%) que foi constituído por dez genótipos, onde nove são “RB” e apenas um “PRBIO” (PRBIO293). Assim como citado anteriormente, este comportamento pode estar associado a característica da cana energia de apresentar maior teor de fibra em sua constituição.

Os teores de CEL variaram entre 31,1 e 40,5% e os genótipos foram divididos em dois grupos, cinco genótipos apresentaram teores maiores que 37% (RB106818, RB106815, RB106814, PRBIO528, RB106807), o restante apresentou teor de CEL menor que 36,5%.

Para lignina, não foi observada a formação de grupos de genótipos, no entanto os teores variaram de 5,7 a 7,4% com teor médio entre os genótipos de 6,3%. Visando a produção de etanol de segunda geração buscam-se genótipos com elevada produção de biomassa, bem como elevados teores de celulose e hemicelulose na fração fibrosa, porém com baixos teores de lignina (TEW; COBILL, 2008). Tendo em vista que, não foi possível diferenciar os genótipos através do teste de médias para o teor de lignina, e que celulose e hemicelulose são as principais matérias-primas para a produção de etanol de segunda geração, a seleção de genótipos para esta finalidade, neste caso, pode ser realizada com base nos teores de FDN associados

as produtividades de TMS, ou seja, maiores produtividades de fibra, o que indica maior quantidade de matéria-prima para produção deste biocombustível.

Já os teores de CZ foram divididos em três grupos de genótipos, onde oito genótipos (PRBIO337, PRBIO528, RB106814, RB106807, PRBIO293, RB106819, PRBIO353 e PRBIO435), apresentaram as maiores médias (5,2 a 5,9%), sete genótipos apresentaram médias entre 4,5 e 4,9%, e três genótipos (PRBIO407, RB006995 e RB036153) médias entre 3,6 e 4,0%.

Quanto aos teores de MS, cinco genótipos (RB006995, RB036153, RB106815, RB966928 e PRBIO407) apresentaram médias entre 23,0 e 24,8%, os demais genótipos apresentaram médias entre 16,1 e 20,0%. De maneira geral, os teores de MS foram baixos, no entanto, dentro da faixa de variação esperada para a cultura, como indica Landell et al. (2002), que obtiveram variação no teor de MS entre 17 e 30%.

Os baixos teores obtidos, podem estar associados ao atraso na colheita dos genótipos na safra anterior (cana planta), acarretando em um menor período de crescimento e conseqüentemente menor acúmulo de açúcar na planta, levando a maiores proporções de fibra na MS. Diversos autores observaram aumento no teor de MS e redução no teor de FDN com o avanço da idade da planta e maturação (LANDELL et al., 2002; CAPUTO et al., 2006; MURARO et al., 2009; CARVALHO et al., 2010). Esse fato provavelmente resultou em maiores teores para as demais variáveis (FDN, FDA, CEL, HEMI e LIG), que são expressas em percentual na matéria seca.

Os valores de BM variaram de 13,3° a 21,0°, com formação de quatro grupos, os genótipos que constituíram o grupo de maiores valores foram: RB006995, RB966928, RB036153, RB106815, RB106822 e PRBIO407 com valores superiores a 19,4°, o segundo grupo foi constituído por oito genótipos com valores entre 17,5 e 19,0°, os demais genótipos apresentaram valores menores que 17,0°.

Entretanto, todos resultados obtidos para a composição química dos genótipos neste estudo, estão dentro dos intervalos de variação obtidos por Silva et al. (2016), que ao avaliarem a composição química de 187 genótipos de cana-de-açúcar coletados no sul do país, observaram teores de FDN variando de 55,4 a 77,8%, FDA de 32,9 a 49,0%, HEMI de 18,9 a 32,7, CEL de 27,0 a 41,2%, LIG de 3,8 a 8,8%, CZ de 2,6 a 7,1% e MS entre 10,8 e 27,8%.

A partir dos resultados de desempenho produtivo (Tabela 1), associados a composição química (Tabela 2), foi possível identificar entre os genótipos avaliados os que mais se adequam para cada finalidade, produção de energia e forragem.

Neste sentido, com o objetivo de produção de energia a partir da biomassa, etanol 2G e cogeração de energia, destacam-se os genótipos PRBIO435 e PRBIO407, por apresentarem as maiores produtividades de TMS, superando todos os genótipos avaliados, além de possuírem também elevados teores de fibra (FDN).

Embora os resultados obtidos indiquem no geral elevados teores de FDN para todos os genótipos avaliados, os genótipos RB106819 e RB106822 foram os únicos que constituíram, simultaneamente, os grupos de maiores produtividades de TMF e menores teores de FDN, apresentando ainda produtividades intermediárias de TBH, sendo estes, os mais recomendados para produção de forragem.

Visando a produção de etanol de primeira geração destacam-se os genótipos PRBIO435, RB867515, RB106819, PRBIO407, RB106814, RB106822, RB106818 e RB966928 por possuírem elevadas produtividades de TBH por hectare.

3.4. Conclusões

Há variabilidade para composição química e produtividade nos genótipos avaliados;

Os genótipos PRBIO435, RB106819, PRBIO407, RB106814, RB106822, RB106818, RB867515 e RB966928 são promissores para a produção de açúcar e etanol de primeira geração;

Os genótipos PRBIO435 e PRBIO407 são promissores para produção de etanol de segunda geração

Para produção de forragem RB106819 e RB106822 são os mais promissores.

4. Capítulo 2: Desempenho de genótipos e efeito de inoculantes bacterianos na produção de silagem de cana-de-açúcar

4.1. Introdução

A cana-de-açúcar é caracterizada por apresentar elevada produtividade, podendo atingir mais de 80 t ha⁻¹ de forragem (SILVA et al., 2020), com alta produtividade de matéria seca, além de elevado valor energético na maturidade (DANIEL et al., 2014).

No Rio Grande do Sul, os meses de março a julho compõem o período chamado de vazio forrageiro outonal, período mais crítico para a produção pecuária, quando as pastagens de verão envelhecem e as pastagens de inverno ainda não estão prontas para o pastejo (EMBRAPA, 2018). Outro período crítico, é no final da primavera, quando as pastagens de inverno estão em final de ciclo e as de verão ainda estão indisponíveis (KUHN; CUMBE; BARCELLOS, 2020). Neste sentido, a conservação de forragem na forma de silagem é uma estratégia importante para suprir volumoso de qualidade para os rebanhos durante os períodos de escassez de pastagens e garantir a estabilidade produtiva (FONTANELI et al., 2021).

A ensilagem de cana-de-açúcar tem sido utilizada visando uniformizar a colheita, melhorar o manejo agrônômico, prolongar a vida útil da cultura e evitar a necessidade de colheita diária (DANIEL et al., 2019). Além de possibilitar o armazenamento de forragem para períodos de escassez.

No entanto, quando conservada por fermentação natural, tende a apresentar elevadas perdas de matéria seca durante o processo de ensilagem, devido a produção de etanol e CO₂, através do metabolismo das leveduras (KUNG; STANLEY, 1982; PEDROSO et al., 2005; ÁVILA et al., 2010; RABELO et al., 2019; GOMES et al., 2021). As altas populações de leveduras contribuem também para a deterioração aeróbia das silagens, após a abertura dos silos, na fase de alimentação, com aumento das perdas totais de nutrientes (ÁVILA et al., 2010; GOMES et al., 2021). Neste sentido, o uso de inoculantes bacterianos pode inibir o crescimento de microrganismos aeróbios e anaeróbios indesejáveis, promover rápida redução do pH, reduzir as perdas de matéria seca e aumentar a estabilidade aeróbia.

Embora vários estudos estejam sendo realizados com inoculantes no processo de ensilagem para a cultura, poucos esforços têm sido direcionados para investigar quais genótipos de cana-de-açúcar são mais adequados para a produção de silagem.

Assim, os objetivos deste estudo foram investigar o desempenho de novos genótipos de cana-de-açúcar para produção de silagem e determinar o efeito do uso de inoculantes bacterianos no processo de ensilagem.

4.2. Material e métodos

Foram realizados dois experimentos, com o objetivo de avaliar o desempenho de genótipos e o efeito de inoculantes bacterianos na produção de silagem de cana-de-açúcar. O estudo foi conduzido no campo experimental e laboratórios da Embrapa Clima Temperado, em Pelotas, RS. O primeiro experimento avaliou 18 genótipos de cana-de-açúcar no processo de ensilagem em condição natural, sem inoculação bacteriana. Os seis genótipos que apresentaram maiores produção de silagem por hectare (PS), além de produtividades de TMF superiores a 100 t ha⁻¹ e perdas de MS inferiores a 20%, foram selecionados para avaliar o efeito do uso de inoculantes bacterianos na produção de silagem.

$$PS = (TMF \times (100 - PMS))$$

Onde:

PS: Produção de silagem (t ha⁻¹)

TMF: Produtividade de matéria fresca (t ha⁻¹)

PMS: Perdas de matéria seca no processo de ensilagem (%)

4.2.1. Desempenho de genótipos de cana-de-açúcar na produção de silagem sem uso de inoculantes bacterianos:

Para este experimento foram utilizadas plantas inteiras dos 18 genótipos de cana-de-açúcar, conduzidos no campo experimental da Embrapa Clima Temperado. As plantas foram cortadas com facão ao nível do solo e na sequência foram trituradas com picador estacionário em partículas de 20 a 30 mm aproximadamente. Imediatamente após a trituração a forragem foi ensilado em mini-silos (tubos de PVC) com capacidade para 4 L, sendo utilizados dois mini-silos por parcela, visando obter volume de silagem suficiente para medição da estabilidade aeróbia. Antes do fechamento dos silos, foi retirada uma amostra de forragem para avaliação do teor de MS% e composição química dos genótipos de cana-de açúcar. O experimento (período de armazenamento) teve duração de 120 dias e a temperatura ambiente média durante o período foi de 21,2 °C, com desvio padrão de 4,96° C.

Após a abertura dos silos, uma porção homogeneizada de silagem com aproximadamente 2,28 kg ($\pm 0,23$ kg) foi colocada em bacias plásticas, e exposta a temperatura ambiente para determinar a estabilidade aeróbia das silagens. As temperaturas (ambiente e de amostras), foram registradas a cada 15 min com datalogger durante 10 dias, sendo a temperatura ambiente média durante o período de exposição aeróbia de 25,3°C, com desvio padrão de 2,97° C. A estabilidade aeróbia foi definida como o número de horas em que a temperatura da silagem permaneceu estável, antes de aumentar mais do que 3°C acima da temperatura ambiente, as perdas de MS durante o período de exposição aeróbia foram calculadas através da diferença de peso de MS entre início e o final do período (10 dias), em relação ao peso de MS inicial do período de exposição. Também, foram calculados os somatórios de temperaturas das silagens, durante os cinco primeiros dias de exposição aeróbia (ADITE 5) e durante todos os dez dias avaliação (ADITE 10).

As amostras de forragem e silagem foram secas em estufa a 55 °C por 72 horas e após este período foram processadas em um moinho de faca tipo Willey, com peneira de 1 mm. A determinação do teor de MS a 105 ° C (por 12 h) foi realizada de acordo com a AOAC (1990, métodos n. 943,01).

Para determinação do pH das amostras de forragem, antes da ensilagem, e após este processo, foi adotado o procedimento descrito por Silva e Queiroz (2002), baseado na diluição das amostras em água destilada e leitura do pH após 30 minutos de repouso. Para determinar a capacidade tampão da forragem foi adotada a metodologia descrita por Playne & McDonald (1966).

Os dados foram analisados usando o procedimento MIXED do SAS (v. 9.4), e as diferenças entre as médias foram determinadas usando a opção PDIFF do LSMEANS ajustada por Tukey em $P \leq 0,05$. Nesta análise, foi considerado o delineamento de blocos casualizados sob arranjo: fatorial 6 (seis genótipos de cana-de-açúcar) \times 3 (tratamentos de silagem: controle, LB e MIX). Outliers foram identificados e excluídos se os valores absolutos dos resíduos excederam ± 3 .

4.2.2. Efeito do uso de inoculantes bacterianos na produção de silagem de cana-de-açúcar

Para esta avaliação foram utilizados os seis genótipos de cana-de-açúcar com melhor desempenho no experimento anterior, sendo três genótipos de cana energia

(PRBIO353, PRBIO407 e PRBIO435); e três genótipos convencionais (RB106818, RB106819 e RB106822).

O processo de colheita, trituração da forragem, ensilagem e coletas de amostras seguiu a mesma metodologia do experimento anterior. Sendo que nesta avaliação, os mini-silos permaneceram armazenados em temperatura ambiente ($18,8 \pm 3,7^\circ \text{C}$) em blocos durante os seguintes tempos: Bloco I: 348 dias; Bloco II: 361 dias; Bloco III: 371 dias; Bloco IV: 388 dias (em função da disponibilidade de equipamentos para avaliação de estabilidade aeróbia).

Foram avaliados três tratamentos visando a avaliação do efeito do inoculantes, sendo estes: forragem de cana-de-açúcar tratada individualmente com água destilada (**controle**); *Lactobacillus buchneri* (**LB**) com taxa de inoculação de 1×10^4 ufc/g de forragem fresca. (Lalsil Cana[®], Lallemand Animal Nutrition, Goiânia, GO, Brasil); mistura desconhecida de bactérias ácido lácticas (BAL) heterofermentativas (**MIX**) com a taxa de inoculação média foi de 3×10^5 ufc/g de forragem fresca, (Lallemand Animal Nutrition, Goiânia, GO, Brasil). Os inoculantes foram dissolvidos em água destilada (1L/t) e pulverizados na forragem fresca antes do enchimento do silo, os mini-silos foram pesados antes e após a ensilagem para determinar a perda de MS, a forragem também foi analisada quanto ao teor de MS.

Depois do silo aberto, uma porção homogênea de silagem de 1,28 kg ($\pm 0,24$ kg) foi retirada dos silos e colocada em bacias plásticas em temperatura ambiente ($20,7 \pm 2,0^\circ \text{C}$) para determinar a estabilidade aeróbia das silagens. A temperatura ambiente foi registrada a cada 15 min por datalogger, durante o período de 10 dias.

As amostras de forragem e silagem foram secas em estufa a 55°C por 72 horas e processadas em um moinho de facas tipo Willey, equipado com peneira de 1 mm, sendo utilizadas para as análises bromatológicas. Os tores de fibra em detergente neutro (FDN) e fibra de detergente ácido (FDA) foram determinados sequencialmente seguindo os procedimentos descritos na AOAC (1990, método no. 973.18). A Lignina (LIG) foi determinada após hidrólise da FDA, conforme Van Soest e Robertson, (1985). A hemicelulose foi obtida através da diferença entre FDN e FDA e a Celulose, pela diferença entre FDA e Lignina.

O perfil fermentativo (ácido láctico, ácido acético, ácido propiônico e ácido butírico) foi determinado através da análise do caldo da silagem por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), realizada em equipamento marca SHIMADZU, modelo LC-20AT, coluna Aminex HPX-87H com dimensões de 300 x 7,8 mm e

diâmetro de partícula de 9 μm , a 30°C. A fase móvel foi composta por H_2SO_4 5 mM em modo isocrático durante 37 minutos.

Os dados foram analisados usando o mesmo procedimento do experimento anterior.

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Desempenho de genótipos de cana-de-açúcar na produção de silagem sem uso de inoculantes bacterianos:

Os resultados de caracterização da forragem dos genótipos de cana-de-açúcar antes do processo de ensilagem e após a abertura dos silos, estão apresentados na tabela 3.

A MS da forragem variou de 16,1 e 24,8% e nas silagens variou entre 15,2 e 23,3%, com efeito significativo entre os genótipos. De modo geral os teores de MS da forragem foram baixos, sendo o ideal para produção de silagem de cana-de-açúcar, teores acima de 28% (ÁVILA et al., 2010). Baixos teores de MS podem favorecer o desenvolvimento de enterobactérias e bactérias do gênero *Clostridium*, que normalmente estão associados a silagens com elevados teores de umidade, levando a perdas por gases e efluentes (ZANINE et al., 2006).

Tabela 3. Caracterização da forragem de genótipos de cana-de-açúcar quanto ao teor de matéria seca (MS), pH e capacidade tampão (CT) e caracterização da silagem quanto ao teor de MS e pH em ciclo de primeira soca

Genótipo	Forragem					Silagem	
	MS%	pH		CT		MS%	pH
RB006995	24,8 a	5,9 ± 0,07		9,4 ± 0,00		23,3 a	3,7 a
RB106815	24,6 a	5,9 ± 0,03		12,1 ± 0,44		22,9 ab	3,8 a
RB036153	24,6 ab	6,1 ± 0,05		6,9 ± 0,40		19,5 abcde	3,6 a
RB966928	23,5 abc	5,9 ± 0,03		9,1 ± 0,10		22,1 abc	3,6 a
PRBIO407	23,0 abc	5,9 ± 0,03		8,3 ± 0,00		23,0 ab	3,6 a
PRBIO337	20,0 abcd	5,7 ± 0,07		13,0 ± 0,14		19,7 abcde	3,5 a
RB106818	20,0 abcd	6,0 ± 0,01		12,9 ± 1,50		21,1 abcd	3,7 a
PRBIO435	19,8 abcd	5,8 ± 0,03		14,0 ± 0,00		18,0 cde	3,6 a
RB106814	19,1 abcd	6,0 ± 0,03		7,9 ± 0,45		17,1 de	3,5 a
RB867515	18,8 bcd	6,0 ± 0,02		11,0 ± 0,11		18,4 bcde	3,7 a
RB106819	18,7 cd	5,9 ± 0,02		15,6 ± 0,04		18,0 cde	3,6 a
PRBIO354	18,6 cd	5,9 ± 0,02		11,2 ± 1,66		19,6 abcde	3,6 a
RB106822	18,5 cd	6,0 ± 0,01		11,2 ± 0,39		16,7 de	3,6 a
PRBIO293	17,9 cd	5,8 ± 0,04		15,9 ± 0,51		15,2 e	3,5 a
PRBIO537	17,8 cd	6,0 ± 0,03		12,2 ± 1,47		16,1 e	3,6 a
RB106807	17,8 cd	5,9 ± 0,03		14,0 ± 0,58		18,7 abcde	3,7 a
PRBIO528	16,5 d	5,9 ± 0,02		17,5 ± 0,31		15,8 e	3,7 a
PRBIO353	16,1 d	5,8 ± 0,06		12,4 ± 0,07		16,0 e	3,5 a
Média	20,0	5,9	-	11,9	-	19,0	3,6
CV(%)¹	9,50	-	-	-	-	8,20	2,5

^{a-d} Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem significativamente ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey. ¹CV: Coeficiente de variação. CT: Capacidade tampão (mg HCl 100 g MS⁻¹)

O pH médio da forragem antes do processo de ensilagem foi de $5,9 \pm 0,2$ e a capacidade tampão (CT) variou de 6,9 a 17,5 mg HCl 100g MS⁻¹. A capacidade tampão representa a resistência em alterar o pH, sendo assim, é desejável que a forragem apresente baixos valores para esta variável, facilitando a redução do pH (SIQUEIRA et al., 2007). Valores de CT de 7 a 10 mg HCl 100g MS⁻¹ são relatados para cana-de-açúcar *in natura*, antes do processo de ensilagem (BERNARDES et al., 2007; SANTOS et al., 2008; SIQUEIRA et al., 2010).

Embora alguns genótipos tenham apresentado valores de CT acima dos valores citados, o pH da silagem apresentou valores (3,5 a 3,8), adequados para inibir microrganismos indesejáveis como enterobactérias e bactérias dos gêneros *Clostridium* e *Listeria* (ÁVILA et al., 2009; MCDONALD et al., 1991). No entanto, valores de pH isoladamente não indicam uma boa fermentação da cana-de-açúcar, uma vez que, leveduras predominam o processo, e estas não são inibidas com a redução do pH (ÁVILA et al., 2012; BERNARDES et al., 2007).

Os resultados de perdas de MS, estabilidade aeróbia e ADITE estão apresentados na tabela 4, onde observa-se efeito significativo de genótipos para as perdas de MS durante a fermentação e estabilidade aeróbia.

As perdas de MS durante a fermentação foram menores nos genótipos PRBIO354, PRBIO407 e RB106807 em relação ao genótipo PRBIO293 (Tabela 4). Este resultado é provavelmente atribuído a fermentação alcoólica no PRBIO293, que representa a principal via de perda de MS na silagem de cana-de-açúcar (MCDONALD et al., 1991).

O genótipo RB106822 apresentou maior estabilidade aeróbia em relação aos genótipos PRBIO528 e RB106818, com ganhos de 32,8 e 28,5 horas respectivamente. Sabe-se que o aumento da estabilidade aeróbia está associado aos produtos finais da fermentação, sendo que o ácido acético desempenha o papel principal no controle de microrganismos deteriorantes (ÁVILA et al., 2009; DANNER et al., 2003). Os ADITE 5 e 10 não foram afetados pelos tratamentos ($P \geq 0,57$).

Tabela 4. Perda de matéria seca (MS), estabilidade aeróbia e ADITE de silagens produzidas a partir de diferentes genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de primeira soca.

Genótipo	Perdas de MS, %		Estabilidade aeróbia, h	ADITE, °C	
	Fermentação	Período aeróbico		5 d	10 d
PRBIO293	30,0 a	48,8	51,5 ab	2380	3155
PRBIO337	8,6 ab	39,6	53,3 ab	1727	2213
PRBIO353	10,0 ab	39,2	57,1 ab	2050	2980
PRBIO354	5,0 b	35,1	58,9 ab	2092	2926
PRBIO407	6,8 b	17,8	56,9 ab	1881	2520
PRBIO435	16,4 ab	35,0	57,8 ab	1992	3049
PRBIO528	11,8 ab	37,2	42,8 b	1771	2248
PRBIO537	17,5 ab	35,5	52,3 ab	1865	2380
RB006995	12,1 ab	22,0	52,4 ab	2427	3454
RB036153	28,9 ab	30,9	50,4 ab	1960	2652
RB106807	6,4 b	39,3	51,6 ab	2571	4033
RB106814	27,0 ab	26,2	56,8 ab	1939	2947
RB106815	13,3 ab	21,2	50,3 ab	2244	3252
RB106818	10,1 ab	30,8	47,1 b	2150	3190
RB106819	12,8 ab	46,0	50,4 ab	2078	3184
RB106822	14,3 ab	32,3	75,6 a	794	2099
RB867515	15,7 ab	30,3	64,1 ab	1991	3474
RB966928	16,6 ab	33,6	60,4 ab	1843	3318
EPM	4,1	6,0	6,6	308	546
P-valor	0,013	0,08	0,025	0,57	0,71

^{a-b} Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem significativamente ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey. EPM: Erro padrão da média.

Considerando as perdas de matéria seca, os genótipos PRBIO354, PRBIO407 e RB106807 são mais adequados para o processo de ensilagem, assim como o RB106822 por apresentar maior estabilidade aeróbia com perda intermediária de MS, o que o torna também uma boa opção para ensilagem.

4.3.2. Efeito do uso de inoculantes bacterianos na produção de silagem de cana-de-açúcar

Antes da ensilagem, a composição química da cana-de-açúcar foi influenciada pelos genótipos avaliados, exceto para variável HEMI (Tabela 5). Houve interação entre genótipos de cana-de-açúcar e tratamentos de silagem para o teor de MS. No entanto, só foi possível observar diferenças significativas entre os tratamentos para um mesmo genótipo, no PRBIO435. Tal fato pode estar associado ao procedimento de amostragem, tendo em vista a dificuldade de higienização das amostras em função dos diferentes tamanhos de partícula das frações (colmo e folhas), ou até mesmo

erros inerentes ao processo de determinação de MS. Uma vez que, é esperado efeito de inoculantes bacterianos somente durante o processo de ensilagem.

O teor de FDN na forragem apresentou efeito significativo de genótipo, sendo que RB106822 apresentou menor teor, com 51,6%, seguido por RB106819 e RB106818 com teores de 55,7% e 57,9% respectivamente. Enquanto os genótipos do grupo PRBIO apresentaram teores superiores a 60%.

Assim como para FDN, os menores teores de FDA na forragem foram observados para os genótipos RB106822 e RB106819 com teores de 34,2% e 35,6% respectivamente, os demais genótipos apresentaram teor de FDA maior que 40% (Anexo B1).

Tabela 5. Composição química da forragem de genótipos de cana-de-açúcar antes da ensilagem quanto ao teor de matéria seca (MS), cinzas (CZ), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), hemicelulose (HEMI), celulose (CEL), e lignina (LIG).

Genótipo	Inoculante	FDN	FDA	HEMI	CEL	LIG	CZ	MS	
PRBIO353	Controle	62,0	53,6	8,4	46,5	6,9	5,1	21,5	hi
PRBIO353	LB	62,4	42,8	19,6	36,8	6,0	5,3	20,5	i
PRBIO353	MIX	62,4	42,0	20,4	36,9	5,1	5,3	21,9	ghi
PRBIO407	Controle	61,7	44,5	17,2	38,9	5,6	3,2	28,1	a
PRBIO407	LB	64,0	43,2	20,9	37,8	5,4	3,6	26,7	ab
PRBIO407	MIX	59,0	40,1	18,9	35,4	4,7	3,1	27,9	a
PRBIO435	Controle	61,6	40,5	21,2	36,0	4,7	4,7	24,6	cde
PRBIO435	LB	60,1	42,5	17,7	37,5	5,0	4,7	23,0	efgh
PRBIO435	MIX	60,2	46,8	13,4	41,7	5,0	4,5	22,6	fgh
RB106818	Controle	59,5	40,9	18,7	35,5	5,4	3,8	25,2	bcd
RB106818	LB	56,4	42,3	14,1	37,2	5,1	3,6	25,6	bc
RB106818	MIX	57,8	40,2	17,6	34,6	5,6	3,3	26,1	bc
RB106819	Controle	56,8	36,0	20,8	32,0	4,0	4,0	24,2	cdef
RB106819	LB	55,8	34,5	21,3	30,3	4,2	3,9	22,9	efgh
RB106819	MIX	54,5	36,3	17,9	31,2	4,9	3,9	23,7	def
RB106822	Controle	52,1	35,9	16,2	31,2	4,7	5,0	23,4	efg
RB106822	LB	51,8	34,8	16,9	30,1	3,9	4,7	24,3	cdef
RB106822	MIX	50,8	31,9	18,9	27,8	4,1	4,7	23,1	efgh
EPM		1,32	2,07	2,51	1,77	0,55	0,15	0,65	
P-valor	G*	<0,001	<0,001	0,42	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	
	T	0,11	0,18	0,57	0,15	0,5	0,13	0,007	
	G x T	0,44	0,07	0,07	0,06	0,48	0,28	<0,001	

^{a-i} Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem significativamente ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey. *G = genótipos de cana-de-açúcar; T = tratamento da silagem; G x T = interação entre genótipos de cana-de-açúcar e tratamentos de silagem; EPM: Erro padrão da média.

Para o teor de hemicelulose (HEMI) não houve diferença significativa entre os tratamentos avaliados. Já para celulose (CEL), os maiores teores foram observados para os genótipos do grupo PRBIO (353, 435 e 407) com médias de tratamentos

variando de 37,3% a 40,1%, enquanto os menores teores foram observados para RB106819 e RB106822 com respectivos teores de 31,2% a 29,7%.

Para variável LIG, RB106822 e RB106819 apresentaram os menores teores 4,2 e 4,3% respectivamente, quando comparados a PRBIO353, com teor de 6,0% na MS. Quanto aos valores de CZ os maiores teores foram observados para PRBIO353 com médias de 5,22%, enquanto RB106822 apresentou os menores teores com média de 4,82%.

Os resultados para a composição química da forragem estão dentro da faixa de variação esperada para cultura conforme citam diversos autores (LANDEL et al., 2002; DANIEL et al., 2014; SILVA et al., 2016). Entre os genótipos avaliados, destacam-se RB106822 e RB106819, que apresentaram os menores teores de FDN, FDA e LIG, características desejáveis para utilização da cultura como forrageira.

Após a abertura dos silos, os teores de MS, CZ e FDN foram alterados pela interação entre genótipos e tratamentos de silagem ($P < 0,01$; Tabela 6). A inoculação com MIX resultou em maior teor de MS quando comparado ao controle, para os genótipos RB106818, RB106819, RB106822 e PRBIO407. Enquanto, para LB este comportamento só foi observado para os genótipos RB106819 e RB106818. Para os mesmos genótipos (RB106818, RB106819, RB106822 e PRBIO407), foi observado maior teor de FDN nas silagens sem inoculação bacteriana (controle). Estes resultados estão possivelmente associados a menores perdas de matéria seca com a inoculação bacteriana, ou seja, menor intensidade de redução de MS para as silagens inoculadas, principalmente de carboidratos solúveis. A conversão de carboidratos solúveis em etanol, CO_2 e água, leva a excessivas perdas de MS e conseqüentemente aumento da concentração de componentes da fração fibrosa na MS (FREITAS et al., 2006; PEDROSO et al., 2003).

Quanto ao teor de CZ, comportamento semelhante foi observado, para o genótipo RB106822 em que a silagem sem inoculação apresentou maior teor de CZ que as silagens com inoculação bacteriana, provavelmente devido a mesma explicação de aumento do teor, em função da redução de MS.

Tabela 6. Composição química das silagens de cana-de-açúcar com e sem inoculação bacteriana, quanto ao teor de fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), hemicelulose (HEM), celulose (CEL), lignina (LIG), cinzas (CZ) e matéria seca (MS)

Genótipo	Inoculante	FDN	FDA	HEM	CEL	LIG	CZ	MS
PRBIO353	Controle	64,9 bc	43,5	21,4	38,3	5,1	5,6 b	19,5 i
PRBIO353	LB	64,2 bc	44,2	20,0	38,5	5,7	5,4 b	21,0 efgi
PRBIO353	MIX	63,6 bcd	43,2	20,4	38,0	5,2	5,4 b	20,2 fgi
PRBIO407	Controle	71,0 a	46,9	24,1	41,7	5,2	4,0 de	24,3 bcd
PRBIO407	LB	65,3 bc	42,6	22,7	37,9	4,7	3,7 e	26,5 ab
PRBIO407	MIX	64,2 bc	42,1	22,1	37,4	4,7	4,2 cde	27,5 a
PRBIO435	Controle	64,7 bc	45,5	19,2	40,8	4,7	5,1 b	21,0 efgi
PRBIO435	LB	61,3 cde	42,1	19,2	37,9	4,3	4,9 bc	22,6 def
PRBIO435	MIX	63,3 bcd	44,0	19,3	39,8	4,2	5,0 bc	20,8 efgi
RB106818	Controle	66,8 ab	48,7	18,0	43,1	5,6	4,2 cde	22,1 defg
RB106818	LB	56,0 fgh	41,5	14,5	37,0	4,5	3,8 e	24,6 bcd
RB106818	MIX	58,5 def	42,5	16,0	37,7	4,8	3,6 e	25,4 abc
RB106819	Controle	67,0 ab	43,6	23,5	38,1	5,6	4,8 bcd	20,5 fgi
RB106819	LB	57,5 efg	38,5	19,0	33,9	4,6	4,1 cde	23,1 cde
RB106819	MIX	58,0 ef	39,4	18,6	34,3	5,1	4,2 cde	23,9 cd
RB106822	Controle	65,7 bc	42,9	22,8	38,0	4,9	6,9 a	19,8 gi
RB106822	LB	53,6 gh	37,3	16,3	32,2	5,0	5,1 b	23,9 cd
RB106822	MIX	52,6 h	35,7	16,9	31,3	4,4	4,9 bc	23,3 cde
EPM		0,8	1,700	1,500	1,100	0,400	0,200	0,500
P-valor	G*	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,1	<0,001	<0,001
	T	<0,001	<0,001	0,000	<0,001	0,2	<0,001	<0,001
	G x T	<0,001	0,300	0,500	0,200	0,700	<0,001	0,000

^{a-i} Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem significativamente ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey.

*G = genótipos de cana-de-açúcar; T = tratamento da silagem; G x T = interação entre genótipos de cana-de-açúcar e tratamentos de silagem; EPM: Erro padrão da média.

Corroborando com os estes resultados, constata-se que a inoculação bacteriana foi eficaz em diminuir as perdas de MS da silagem de cana-de-açúcar, em comparação ao controle. Tanto a inoculação com MIX, quanto LB diminuíram as perdas de MS em 34,3% e 48,7%, respectivamente, sendo o tratamento com LB mais eficaz para reduzir as perdas de MS (Tabela 7). Este resultado, está provavelmente associado a maior concentração de ácido acético, nas silagens com inoculação bacteriana, uma vez que, este possui efeito na redução de atividade de leveduras (RABELO et al.,2018). Segundo McDonald et al, (1991) a fermentação alcoólica é principal via de perda de matéria seca em silagens.

A inoculação bacteriana foi eficiente em reduzir as perdas gasosas nas silagens avaliadas, e não foram observadas diferenças significativas entre os inoculantes LB e MIX. Já, a produção de efluente das silagens aumentou com à inoculação do MIX em comparação com o controle. As respostas de desempenho dos inoculantes para estas variáveis ajudam a explicar a maior eficiência de LB na redução de perdas de MS, mesmo que, não seja possível observar diferenças significativas entre os inoculantes, o inoculante LB apresentou médias menores que MIX, o que pode ter resultado nas diferenças perdas de MS total.

Tabela 7. Perdas fermentativas e estabilidade aeróbia de silagens de cana-de-açúcar com e sem inoculação bacteriana

Item	Efluente kg t MF ⁻¹	Perdas Gás	Perdas MS	Estabilidade aeróbia, h
Genótipo				
PRBIO353	61,5	11,0	15,5	192
RB106818	63,3	13,0	18,7	154
PRBIO435	56,0	12,5	17,5	158
PRBIO407	62,3	10,0	15,8	170
RB106822	59,5	12,6	16,7	154
RB106819	61,5	9,43	15,4	155
Inoculante				
Controle	58,3 b	17,9 a	23,0 a	124 B
LB	58,8 ab	7,35 b	11,8 c	174 A
MIX	64,9 a	9,03 b	15,1 b	186 A
P-valor				
G*	0,4400	0,4000	0,4300	0,9100
T	0,0	<0,001	<0,001	0,0320
G x T	0,2700	0,2500	0,0700	0,0800

^{a-b} Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem significativamente ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey.

*G = genótipos de cana-de-açúcar; T = tratamento da silagem; G x T = interação entre genótipos de cana-de-açúcar e tratamentos de silagem.

A estabilidade aeróbia da silagem aumentou após a inoculação bacteriana em 50 h para LB e em 62 h para MIX, quando comparada ao controle (Tabela 7). Este resultado se justifica no maior teor de ácido acético nas silagens tratadas com inoculantes bacterianos (Tabela 8), uma vez que o ácido acético possui efeito na redução da população de leveduras e de microrganismos deteriorantes e conseqüentemente aumenta a estabilidade aeróbica das silagens (ÁVILA et al., 2009; DANNER et al., 2003).

Para o genótipo RB106818 a inoculação com LB resultou em maiores teores de ácido láctico. Para ácido propiônico, o genótipo RB106819 quando inoculado com MIX resultou em maiores teores quando comparado a LB e controle, enquanto, para o RB106822 as silagens tratadas com LB apresentaram maiores teores que MIX e controle.

Os teores de ácido butírico das silagens foram influenciados pelos tratamentos com inoculantes bacterianos. As silagens inoculadas com MIX apresentaram menores teores de ácido butírico que o tratamento controle, no entanto não apresentaram diferença quando comparadas ao LB. Embora, diferenças tenham sido encontradas para os teores de ácido butírico, este foi detectado em todos os tratamentos. Segundo Kung et al. (2018), ácido butírico não deve ser detectado em silagens bem conservadas, uma vez que, a presença deste ácido indica a atividade de *Clostridium*. De acordo com McDonald et al. (1991) o ácido butírico, é o indicador mais confiável da atividade clostridial. Porém, o aumento de teor de ácido butírico pode estar associado também a atividade de leveduras (RABELO et al., 2018).

Kung et al (2018) indica que altas concentrações de ácido propiônico, acima de 0,3%, são mais comumente encontradas em fermentações clostridiais, assim como concentrações de ácido acético acima do normal.

Os baixos teores de MS observados para forragem antes do processo de ensilagem (média de 24,2%), podem ter favorecido a ocorrência de *Clostridium* nas silagens. Segundo Zanine et al. (2006) o desenvolvimento de *Clostridium* está associado a silagens com elevado teor de umidade. Esses microrganismos, geralmente são inativos em silagem com mais de 28% de MS (TOMICH et al., 2003).

Outra possível causa para o crescimento de microrganismos como *Clostridium*, é a lenta redução do pH no processo de ensilagem, embora esta variável não tenha sido avaliada neste experimento, é possível, com base nos dados da literatura, inferir sobre esse comportamento. Segundo Rabelo et al. (2018), silagens tratadas com BAL

heterofermentativas, apresentam maiores teores de ácido acético, quando comparadas as silagens sem inoculante, conforme foi observado neste estudo. Ávila et al. (2009) sugere que maiores teores de ácido acético podem resultar em redução mais lenta do pH das silagens. Neste sentido, quando a redução do pH não é suficiente para inibir o desenvolvimento de *Clostridium*, ocorre fermentação secundária com produção de ácido butírico a partir da glicose e do ácido láctico (BERNARDES et al., 2007; MCDONALD et al., 1991).

Tabela 8. Teores de ácido láctico, ácido acético, ácido propiônico e ácido butírico nas silagens de diferentes genótipos de cana-de-açúcar tratadas com inoculantes bacterianos.

Genótipo	Inoculante	Ácido (% na MS)			
		Lático	Acético	Propiônico	Butírico
PRBIO353	Controle	3,16 bcd	1,86	0,09 d	0,46
PRBIO353	LB	4,34 ab	1,83	0,22 d	0,56
PRBIO353	MIX	2,22 cd	2,40	0,09 d	0,21
PRBIO407	Controle	1,46 d	1,38	0,51 bcd	0,40
PRBIO407	LB	2,17 cd	0,86	1,06 ab	0,45
PRBIO407	MIX	1,45 d	1,39	0,17 d	0,33
PRBIO435	Controle	2,58 bcd	2,98	0,10 d	0,25
PRBIO435	LB	3,39 abcd	1,48	0,33 d	0,54
PRBIO435	MIX	3,31 abcd	2,00	0,13 d	0,29
RB106818	Controle	2,63 bcd	1,93	0,34 cd	0,58
RB106818	LB	5,69 a	1,29	0,45 bcd	0,72
RB106818	MIX	2,48 bcd	2,1	0,25 d	0,37
RB106819	Controle	3,48 abc	1,41	1,24 a	0,64
RB106819	LB	3,36 abcd	1,69	1,06 ab	0,52
RB106819	MIX	3,26 abcd	2,25	0,36 cd	0,33
RB106822	Controle	2,53 bcd	2,23	0,20 d	0,35
RB106822	LB	4,47 ab	1,24	0,94 abc	0,45
RB106822	MIX	3,35 abcd	1,84	0,27 d	0,40
EPM		0,4140	0,1909	0,1210	0,0537
P-valor	Gen	<0,0001	0,0129	<,0001	0,1963
	Trat	<0,0001	0,0003	0,0041	0,0012
	Gen x Trat	0,0067	0,5254	<,0001	0,6580

^{a-d} Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem significativamente ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey; EPM: Erro padrão da média.

Rabelo et al. (2018) relatam teores de ácido butírico para silagens cana-de-açúcar tratadas com *Lactobacillus buchneri* entre 0,003 a 1,2% na MS. De forma semelhante, Kung et al. (2018) indicam percentuais de ácido butírico menores que 0,5-1,0% para silagens de gramíneas com teor de MS entre 25 e 35%. Corroborando com estes dados, os resultados obtidos neste estudo variaram de 0,21 a 0,72% de

ácido butírico na MS. Entretanto, estes ácidos quando em níveis superiores a 0,5% na MS causam redução na ingestão de silagem (MUCK et al., 2010).

Os inoculantes bacterianos testados neste estudo, mostraram-se eficientes em reduzir perdas de matéria seca e aumentar a estabilidade aeróbia da silagem de cana-de-açúcar, preservando a composição química da forragem durante o processo de ensilagem. No entanto, com base nas concentrações de ácido butírico, não inibiram o desenvolvimento de *Clostridium*, fato que provavelmente pode ser contornado com a ensilagem da cultura com maiores teores de MS.

Com base na composição química da forragem, os genótipos RB106819 e RB106822 apresentaram maior potencial visando a utilização da cultura como forrageira.

4.4. Conclusões

Os genótipos PRBIO354, PRBIO407 e RB106807 são os mais promissores para a produção de silagem sem inoculante e os inoculantes bacterianos testados são eficientes em reduzir perdas de matéria seca e aumentar a estabilidade aeróbia de silagem de cana-de-açúcar.

5. Capítulo 3: Desempenho de genótipos de cana-de-açúcar na produção de energia

5.1. Introdução

O desenvolvimento, produção e uso de energias renováveis têm sido assunto importante na agenda política e econômica das grandes nações mundiais. Associado a isto, iniciativas que visam a preservação do planeta dependem do uso de energias renováveis para a redução da emissão de gases do efeito estufa (MATOS, 2020), o que tem incentivado o setor de biocombustíveis no desenvolvimento de novas tecnologias (MORINI et al., 2017).

Em um contexto onde a bioenergia é a principal fonte de energia renovável do mundo, e tendo em vista que o Brasil é o quinto maior produtor de biomassa e o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo (FAOSTAT, 2022), a importância econômica da cultura está associada não somente como matéria-prima para a produção de açúcar, mas também como uma biomassa eficiente com elevado potencial para a produção de biocombustíveis e geração de energia.

A Matriz Energética Brasileira é considerada a mais renovável do mundo (MME, 2020), dentre as fontes de energia renováveis utilizadas no Brasil, destaca-se principalmente a biomassa de cana-de-açúcar, que atualmente representa 18% das fontes renováveis (SILVA et al., 2021).

Devido a importância do cultivo, por muitos anos os programas de Melhoramento genético de cana-de-açúcar contribuíram para o desenvolvimento de variedades com maior produção de colmos e açúcar, logo visando a obtenção de variedades com elevada produtividade, elevado teor de sacarose, bom perfilhamento, resistência a pragas e doenças (SANTOS; BORÉM; CALDAS, 2015; MORAIS et al., 2015)

Na última década, os programas de melhoramento também têm direcionado esforços para o desenvolvimento de genótipos mais fibrosos (CORRER, et al., 2020), o investimento em produção de fibra tem por objetivo a obtenção de plantas mais rústicas, menos exigentes em condições ambientais e nutrientes, logo com maior eficiência energética no cultivo (MATSUOKA et al., 2010; VIOLANTE, 2012).

Desta forma, percebe-se a importância da identificação e seleção de novos genótipos de cana-de-açúcar com características vantajosas a produção de energia nas formas de etanol de primeira e segunda geração, bem como para cogeração de

energia. Sendo assim, os objetivos deste estudo foram identificar genótipos para produção de etanol de segunda geração e identificar genótipos com potencial para cogeração de energia com base no poder calorífico.

5.2. Material e métodos

Os rendimentos teóricos de etanol e energia dos genótipos de cana-de-açúcar apresentados neste capítulo, foram calculados utilizando os resultados de desempenho produtivo (TMS, TCH e TBH) e caracterização química (HEMI, CEL, MS) avaliados no Capítulo I, conforme tabela 9.

Para estimar a produção de energia dos genótipos foi utilizada a produtividade de matéria seca TMS (Tabela 9), associado aos valores de poder calorífico

Tabela 9. Desempenho produtivo de genótipos de cana-de-açúcar quanto as produtividades de matéria seca (TMS) e produtividade de brix (TBH), além da caracterização química, quanto aos teores de hemicelulose (HEMI) e celulose (CEL).

Genótipo	TMS*	TBH	HEMI	CEL
	t ha ⁻¹		% na MS	
PRBIO293	18,2	15,4	23,1	35,0
PRBIO337	18,7	9,9	24,9	35,9
PRBIO353	21,0	17,0	26,6	35,0
PRBIO354	18,6	14,9	26,0	36,4
PRBIO407	32,8	23,4	25,0	36,0
PRBIO435	39,0	31,2	24,5	34,6
PRBIO528	20,3	16,1	24,5	38,0
PRBIO537	19,4	16,2	25,5	35,1
RB006995	24,2	18,1	24,0	33,8
RB036153	16,8	12,2	22,2	31,1
RB106807	14,9	12,5	23,7	37,7
RB106814	26,1	23,1	22,3	38,5
RB106815	14,6	10,3	21,6	39,6
RB106818	24,6	19,3	21,5	40,5
RB106819	27,6	24,0	23,0	34,6
RB106822	23,0	21,8	20,4	33,9
RB867515	28,7	24,8	23,2	36,4
RB966928	26,5	20,1	23,5	33,2
Média	23,1	18,4	23,6	35,8

*TMS e TBH: valores obtidos com base na tabela 1, HEMI e CEL: teores obtidos com base na tabela 2.

Os rendimentos teóricos de etanol de segunda geração foram estimados separadamente a partir das frações celulose (ECEL) e hemicelulose (EHEMI). Rendimento total de etanol de segunda geração (2G) foi obtido a partir das somas das duas frações, enquanto etanol de primeira geração (1G) foi estimado a partir das

produtividades de TBH, e o total de etanol por hectare foi obtido através da soma de 1G e 2G.

Os cálculos de rendimento teórico de etanol de segunda geração foram realizados conforme descrito por Santos et al. (2012), considerando 100% de eficiência na hidrólise e fermentação.

Para o cálculo de rendimento de etanol de segunda geração a partir de celulose (ECEL) foi utilizada a equação descrita abaixo:

$$ECEL = ((MS \times (CEL \div 100) \times RTCG \times RTGE) \times 1000) \div DE$$

Onde:

ECEL: Volume de etanol de celulose por hectare (L)

MS: Produtividade de matéria seca (t ha⁻¹)

CEL: Teor de celulose na amostra em %

RTCG: Rendimento teórico de conversão de celulose em glicose (1,11 g g⁻¹)

RTGE: Rendimento teórico de conversão de glicose em etanol (0,511 g g⁻¹)

DE: Densidade do etanol (0,789 g l⁻¹)

Para o cálculo de rendimento de etanol de segunda geração a partir de hemicelulose (EHEMI) foi utilizada a equação descrita abaixo:

$$EHEMI = ((MS \times (HEMI \div 100) \times RTHX \times RTXE) \times 1000) \div DE$$

Onde:

EHEMI: Volume de etanol de hemicelulose por hectare (L)

MS: Produtividade de matéria seca (t ha⁻¹)

HEMI: Teor de hemicelulose na amostra em %

RTHX: Rendimento teórico de conversão de hemicelulose em xilose (1,057 g g⁻¹)

RTXE: Rendimento teórico de conversão de xilose em etanol (0,511 g g⁻¹)

DE: Densidade do etanol 0,789 (g l⁻¹)

Para obtenção do rendimento teórico de etanol total de segunda geração (2G) foi efetuada a soma do ECEL e EHEMI

$$2G = ECEL + EHEMI$$

Para o cálculo de rendimento teórico de etanol de primeira geração (1G) foi utilizada a equação descrita a baixo:

$$1G = ((TCH \times RTC) \times (BM \div 100) \times PC \times RTGE) \times 1000 \div DE$$

Onde:

1G: Volume de etanol de primeira geração por hectare (L)

TCH: Toneladas de colmo por hectare

BM: Teor de sólidos solúveis totais no colmo em %

RTC: Rendimento teórico de caldo no colmo ($0,75 \text{ g g}^{-1}$)

PC: Pureza teórica do caldo $0,95 \text{ (g g}^{-1}\text{)}$

RTGE: Rendimento teórico de conversão de glicose em etanol ($0,511 \text{ g g}^{-1}$)

DE: Densidade do etanol ($0,789 \text{ g l}^{-1}$)

O preparo das amostras para análise deu-se a partir da coleta de plantas inteiras (colmos e folhas), representativas na parcela, cortadas rente ao solo. Posteriormente, as amostras foram trituradas em picador estacionário, e secas em estufa a 55° C até atingirem peso constante. Após a secagem, as mesmas foram moídas em moinho do tipo Willey com peneira de 1 mm, para posterior análise calorimétrica.

A energia contida na biomassa da cultura foi avaliada por meio do poder calorífico, que é a quantidade de calor liberado pela combustão de uma unidade de massa (DOAT, 1977). As determinações de poder calorífico superior (PCS) foram realizadas utilizando bomba calorimétrica PARR com base nas normas ASTM D5865 e DIN 51900.

Os resultados de PCS dos genótipos foram associados aos resultados de produtividade de matéria seca (Tabela 9) para obter a quantidade de energia produzida por unidade de área cultivada através da equação:

$$E = ((\text{TMS} \times 1000) \times (\text{PCI} \times 0.004187)) \times 0,001$$

Onde:

E: Energia (GJ ha^{-1})

TMS: Produtividade de matéria seca (t ha^{-1})

PCI: Poder calorífico inferior (Cal g^{-1})

5.3. Resultados e discussão

Os resultados de poder calorífico superior e rendimento teórico de energia, foram significativos para os 18 genótipos de cana-de-açúcar avaliados (Tabela 10). O PCS variou de $3767,5 \text{ cal g}^{-1}$ a $4050,2 \text{ cal g}^{-1}$, dentro deste intervalo, os genótipos foram divididos em dois grupos, 14 genótipos formaram o grupo de maiores valores ($3922,2$ a $4050,2 \text{ cal g}^{-1}$), enquanto que o segundo grupo foi constituído por apenas quatro genótipos, os quais apresentaram valores entre $3767,5$ e $3902,0 \text{ cal g}^{-1}$.

Resultados de poder calorífico entre 15,6 e 17,5 MJ kg⁻¹ foram encontrados por Barbosa et al., (2021), para as partições folhas, bainhas e colmos. Estes resultados correspondem em Cal g⁻¹ a uma variação entre 3725,9 a 4179,8 Cal g⁻¹, logo os resultados obtidos no presente estudo estão dentro da faixa de variação citada.

Tabela 10. Poder calorífico superior (PCS) e rendimentos teóricos de energia (Energia) de genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de primeira soca.

Genótipo	PCS (Cal g ⁻¹)	Energia (GJ ha ⁻¹)
PRBIO435	3767,5 b	614,4 a
PRBIO407	4034,3 a	553,5 a
RB867515	3996,8 a	481,3 b
RB106819	3963,5 a	458,9 b
RB106814	3949,4 a	432,2 b
RB966928	3886,9 b	431,1 b
RB106818	3993,6 a	411,1 b
RB006995	4050,2 a	409,4 b
RB106822	3970,9 a	382,0 c
PRBIO353	3902,0 b	343,1 c
PRBIO528	3922,2 a	333,5 c
PRBIO354	4022,0 a	313,1 c
PRBIO337	3972,9 a	311,4 c
PRBIO537	3790,9 b	308,2 c
PRBIO293	4014,3 a	306,0 c
RB036153	3987,6 a	280,5 c
RB106807	3981,5 a	248,4 c
RB106815	3994,4 a	244,1 c
Média	3955,6	381,2
CV.(%)¹	2,1	17,8

^{a-b} Médias seguidas pelas mesmas letras constituem o mesmo grupo, pelo teste Scott-Knott (p=0,005).

¹CV: Coeficiente de variação.

Quanto ao rendimento teórico de energia, PRIO435 e PRBIO407, se destacaram frente aos demais com produtividades de 614,4 e 553,5 GJ ha⁻¹ respectivamente. Seis genótipos apresentaram rendimento de energia entre 409,4 e 481,3 GJ ha⁻¹ (RB867515, RB106819, RB106814, RB966928, RB106818 e RB006995), os demais genótipos apresentaram rendimentos entre 244,1 e 382,0 GJ ha⁻¹.

Em estudo semelhante Carvalho et al. (2021) avaliou os potenciais teóricos de produção de energia elétrica e etanol de biomassas de forrageiras tropicais. E obteve para *Pennisetum purpureum*, variação de PCS entre 4492 e 4428 cal g⁻¹ e rendimentos de energia de médio de 161,23 G cal, que corresponde a 675,55 GJ valor superior ao rendimento máximo obtido neste estudo.

Para os rendimentos teóricos de etanol (ECEL, EHEMI, 2G, 1G e 1G+2G) foi observado efeito significativo de genótipo para todas as variáveis e estes estão apresentados na tabela 11.

Tabela 11. Rendimentos teóricos de etanol de segunda geração, estimado a partir das frações celulose (ECEL) e hemicelulose (EHEMI), total de segunda geração (2G), rendimentos teóricos de etanol de primeira geração (1G) e rendimento teórico total de etanol (1G+2G) de genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de primeira soca.

Genótipo	ECEL	EHEMI	2G	1G	1G+2G
PRBIO435	9690,1 a	6504,5 a	16194,6 a	14391,8 a	30586,4 a
PRBIO407	8455,1 a	5601,0 a	14056,1 a	10788,4 b	24844,5 b
RB867515	7543,2 b	4541,1 b	12084,3 b	11464,0 b	23548,3 b
RB106819	6870,5 b	4371,4 b	11241,9 b	11099,9 b	22341,7 b
RB106814	7127,2 b	4018,3 c	11145,5 b	10680,8 b	21826,3 b
RB966928	6347,3 b	4292,0 b	10639,3 b	9278,3 b	19917,6 b
RB106818	7200,7 b	3646,7 c	10847,4 b	8884,6 b	19732,1 b
RB106822	5610,3 c	3199,2 c	8809,5 c	10052,5 b	18862,0 b
RB006995	5924,8 c	3950,3 c	9875,2 c	8359,8 c	18235,0 c
PRBIO353	5261,5 c	3828,6 c	9090,0 c	7820,9 c	16910,9 c
PRBIO528	5578,7 c	3377,9 c	8956,6 c	7427,7 c	16384,3 c
PRBIO537	4945,0 c	3382,1 c	8327,1 c	7486,3 c	15813,4 c
PRBIO354	4847,9 c	3329,6 c	8177,5 c	6906,4 c	15083,8 c
PRBIO293	4521,6 c	2885,5 c	7407,1 c	7122,2 c	14529,3 c
PRBIO337	4819,9 c	3187,3 c	8007,2 c	4595,3 d	12602,5 d
RB106807	4030,5 c	2401,8 c	6432,3 c	5772,9 d	12205,2 d
RB036153	3744,3 c	2560,8 c	6305,1 c	5622,0 d	11927,1 d
RB106815	4155,2 c	2161,7 c	6316,9 c	4783,0 d	11100,0 d
Média	5926,3	3735,5	9661,9	8474,3	18136,1
CV(%)¹	18,2	20,9	18,2	13,8	15,5

*Médias seguidas pelas mesmas letras constituem o mesmo grupo, pelo teste Scott-Knott ($p=0,005$).

¹CV: Coeficiente de variação.

Os genótipos PRBIO435 e PRBIO407 apresentaram os maiores rendimentos de etanol de segunda geração (2G), com rendimentos superiores a 14000 L ha⁻¹, ambos apresentaram também os maiores rendimentos para as frações ECEL e EHEMI. No entanto, os genótipos que constituíram o segundo grupo para esta variável (RB861575, RB106819, RB166814, RB966928 e RB106818) apresentaram também elevado rendimento de etanol 2G com produtividade acima de 10000 L ha⁻¹.

Para etanol de primeira geração (1G) o destaque foi para o genótipo PRBIO435 com rendimentos de 14391,8 L ha⁻¹, o segundo grupo de genótipos (PRBIO407, RB861575, RB106819, RB166814, RB966928, RB106818 e RB106822) também apresentou elevados rendimentos, maiores que 8800 L ha⁻¹. Enquanto, o terceiro

grupo foi formado por genótipos que apresentaram rendimentos entre 6906,4 e 8359,8 L ha⁻¹, já o quarto grupo entre 4783,0 e 5772,9 L ha⁻¹.

Considerando o rendimento médio de etanol 1G produzido a partir de cana-de-açúcar de 6500 L ha⁻¹ (CARVALHO et al., 2021), os resultados obtidos neste trabalho evidenciam o potencial dos genótipos constituíram os grupos a, b e c do teste de médias aplicado para a produção de etanol 1G, uma vez que superam o rendimento médio para a cultura, atingindo incremento de produção de até 7891 L, no caso do PRBIO435. No entanto, é importante ressaltar que os resultados obtidos tratam-se de rendimentos teóricos, assim em condições reais de produção os rendimentos podem ser relativamente menores.

Os rendimento totais de etanol por hectare variaram de 11100 a 30586,4 L com média de 18136,1 L. Para esta variável foi observada a formação de quatro grupos de genótipos, onde PRBIO435 permaneceu em evidência sendo o único pertencente ao grupo de maiores médias (30586,4 L ha⁻¹), seguido dos genótipos PRBIO407, RB867515, RB106819, RB106814, RB966928, RB106818 e RB106822 com rendimentos de 18862,0 a 24844,5 L ha⁻¹.

Santos et al. (2019) indicam rendimentos de etanol de 13000 L ha⁻¹, considerando a biomassa total de cana-de-açúcar, destes 6000 L provenientes de etanol de segunda geração obtidos das frações bagaço e palha.

De modo geral, os rendimentos de etanol 2G, 1G e total foram elevados, e evidenciam o potencial de aumento da produção de etanol a partir de cana-de-açúcar, utilizando simultaneamente as tecnologias de primeira e segunda geração, sem a necessidade de expansão da área de cultivo.

Tanto os rendimentos de etanol, quanto os rendimentos de energia, estão fortemente associados as produtividades de matéria seca e rendimento de colmos dos genótipos, apresentados na tabela 9, tendo em vista que os maiores rendimentos foram observados para os genótipos com maiores produtividades. Como pode ser observado, para o genótipo PRBIO435, que embora tenha apresentado menor valor de poder calorífico entre os genótipos avaliados, apresentou o maior rendimento de energia por área. Assim como, para os genótipos PRBIO435 e PRBIO407, quanto aos rendimentos de etanol 2G, que embora não tenham apresentado os maiores teores de CEL, apresentaram os maiores rendimentos de ECEL.

Segundo Barbosa (2014) a cana-energia possui classificações de acordo com sua composição e finalidade de uso, a cana-energia do tipo 1 é indicada para a

produção de etanol de segunda geração por apresentar teor de fibra acima de 18% e teor de sacarose acima de 15%, já a cana-energia do tipo 2 apresenta potencial para produzir biomassa para geração de energia, por apresentarem teor de fibra acima de 28% e teor de sacarose inferior a 6%.

Neste sentido, os maiores rendimentos de energia e etanol 2G foram observados para genótipos de cana energia (PRBIO435 e PRBIO407), os quais podem ser classificados como cana energia do tipo 1, e embora tenham apresentado elevados potenciais para cogeração, como biomassa total, estes apresentam características que indicam potencial ainda maior para produção de etanol.

5.4. Conclusões

É possível elevar os rendimentos de etanol utilizando os processos de produção de etanol de primeira e segunda geração simultaneamente. Com base na análise de rendimentos teóricos de energia e etanol identifica-se os genótipos PRBIO435 e PRBIO407 como os mais promissores para produção de etanol de segunda geração e cogeração. Enquanto para etanol 1G os genótipos PRBIO435, PRBIO407, RB867515, RB106819, RB106814, RB966928, RB106818 e RB106822 são os mais promissores.

Considerações finais

Este trabalho visou avaliar o desempenho de novos genótipos de cana-de-açúcar quanto ao potencial produção de biomassa, nas condições do estado do Rio Grande do Sul, bem como caracterizar as biomassas para diversas formas de utilização da cultura. Neste sentido, foi possível identificar genótipos de cana-de-açúcar com excelentes desempenhos produtivos, o que indica a adaptação dos mesmos as condições de cultivo da região.

Nota-se também, a possibilidade de dentro da variabilidade existente na composição química dos genótipos, identificar aqueles que apresentam característica desejáveis a cada umas das finalidades de uso investigadas.

Neste sentido, visando a produção de etanol, e com base nos resultados observados nos primeiro e terceiro capítulos deste trabalho, conclui-se que os genótipos PRBIO435, PRBIO407, RB867515, RB106819, RB106814, RB966928, RB106818 e RB106822, apresentam características que os tornam promissores para produção de etanol de primeira geração. Enquanto, os genótipos PRBIO435 e PRBIO407 apresentam características que os tornam promissores para a produção de etanol de segunda geração.

Os resultados evidenciam também que a utilização dos processos de produção de etanol de primeira e segunda geração simultaneamente apresenta elevado potencial, possibilitando aumentar os rendimentos de etanol e a eficiência de uso da biomassa.

Para a utilização da cultura como forrageira, os genótipos RB106819 e RB106822 apresentara-se como os mais promissores com base na composição química e desempenho produtivo.

Quanto a produção de silagem de cana-de-açúcar, os resultados indicam que é possível contornar os principais problemas que ocorrem na fermentação da cultura, durante o processo de conservação, quando utilizado inoculantes bacterianos adequados, tornando a cultura alternativa potencial para auxiliar na estabilidade de produção de forragem, para as condições do estado do Rio Grande do Sul.

Cabe ressaltar que, a cana-de-açúcar apresenta grande versatilidade de uso, da qual podem ser obtido diferentes produtos, os quais estão presentes nos mais diversos níveis tecnológicos de produção, desde propriedades familiares com o objetivo de fabricação de produtos artesanais e subsistência, até produções em larga escala com o objetivo de produção energia, que representa parcela significativa da

matriz energética. Estas características fazem da cultura uma das mais importantes em nível nacional, tanto em aspectos econômicos, como sociais.

Referências Bibliográficas

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11.956 Determinação do poder calorífico superior**. Rio de Janeiro, 1990.

ALLI, I.; BAKER, B.E.; GARCIA, G. Studies on the fermentation of chopped sugarcane. **Animal Feed Science and Technology**, v.7, p.411-417, 1982.

ALMEIDA, I. J. L. **Análise da geração de energia elétrica através da biomassa da cana-de-açúcar: um estudo de caso**. 2018. 68 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

ANTUNES, W. R.; SCHÖFFEL, E. R.; DOS ANJOS, S. D.; HÄRTER, A.; DE CAMPOS, A. D. S.; MONTERO, C. R. S. Productive performance of early sugarcane genotypes in Rio Grande do Sul state, Brazil. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 2, p. 136-142, 2017.

AOAC, 1990. Official methods of analysis. 15th ed. AOAC International, Arlington, VA.

ÁVILA, C. L. D. S.; PINTO, J. C.; OLIVEIRA, D. P.; SCHWAN, R. F. Aerobic stability of sugar cane silages with a novel strain of *Lactobacillus* sp. isolated from sugar cane. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 2, p. 249-255, 2012.

ÁVILA, C. L. D. S.; VALERIANO, A. R.; PINTO, J. C.; FIGUEIREDO, H. C. P.; REZENDE, A. V. D.; SCHWAN, R. F. Chemical and microbiological characteristics of sugar cane silages treated with microbial inoculants. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 1, p. 25-32, 2010.

ÁVILA, C. L. S.; PINTO, J. C.; FIGUEIREDO, H. C. P.; SCHWAN, R. F. Effects of an indigenous and a commercial *Lactobacillus buchneri* strain on quality of sugar cane silage. **Grass and Forage Science**, v. 64, n. 4, p. 384-394, 2009.

BARBOSA, A. M.; ZILLIANI, R. R.; TIRITAN, C. S.; SOUZA, G. M.; SILVA, M.A. Energy conversion efficiency in sugarcane cultivars as a function of production environments in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, p. 111500, 2021.

BARBOSA, G. V. S. **Contribuição do melhoramento genético da cana-de-açúcar para a agroindústria canavieira de Alagoas**. 2014. 113 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BERNARDES, T. F. **Características fermentativas, microbiológicas e químicas do capim-Marandu (*Brachiaria brizantha* (Hoschst ex. A Rich) Stapf cv. Marandu) ensilado com polpa cítrica peletizada**. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

BERNARDES, T. F.; REIS, R. A.; SIQUEIRA, G. R.; BERCHIELLI, T. T.; COAN, R. M. Avaliação da queima e da adição de milho desintegrado com palha e sabugo na

ensilagem de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 36, p. 269-275, 2007.

BONFÁ, C. S.; GUIMARÃES, C. G.; EVANGELISTA, A. R.; SANTOS, A. S. Dos, PANTOJA, L. de A.; CASTRO, G. H. de F. Avaliação de silagens de cana de açúcar adicionadas de torta de macaúba. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 40, 2018.

BORGES, A. L. C. C.; SILVA, R. R.; GONÇALVES, L. C.; MOLINA, P. C.; SOUZA, A. S. D. O uso da cana-de-açúcar com ureia na alimentação de bovinos. **Cadernos Técnicos de Veterinária e Zootecnia**. v.80., p.39-54. 2016.

BRAGA JUNIOR, R. L. C.; LANDELL, M. G. A.; SILVA, D. N.; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, T. N.; SILVA, V. H. P.; RODRIGUES, P. E.; CARREGARI, H. R.; LUZ, A. M.; ANJOS, I. A. Censo varietal IAC de cana-de-açúcar no Brasil - Safra 2019/20 e na região Centro-Sul - Safra 2020/21. Campinas: Instituto Agrônômico, 2021. 64p. (Boletim técnico IAC, 226)

CANILHA, L.; CHANDEL, A.K.; MILESSI, T.S.S.; ANTUNES, F.A.F.; FREITAS, W.L.C.; FELIPE, M.G.A.; SILVA, S.S. da. Bioconversion of Sugarcane Biomass into Ethanol: An Overview about Composition, Pretreatment Methods, Detoxification of Hydrolysates, Enzymatic Saccharification, and Ethanol Fermentation. **Journal of Biomedicine and Biotechnology**, 1–15, 2012.

CANIZARES, G. I. L.; GONÇALVES, H. C.; MARQUES, R. O.; LOURENÇON, R. V.; GOMES, H. F. B.; BOAVENTURA NETO, O.; CANIZARES, M. C. Dry matter intake and ruminal fermentation parameters in goats fed sugarcane in replacement of corn silage. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 22, 2021.

CARVALHO, B.F.; ÁVILA, C.L.S.; MIGUEL, M.G.C.P.; PINTO, J.C.; SANTOS, M.C.; SCHWAN, R.F. Aerobic stability of sugar-cane silage inoculated with tropical strains of lactic acid bacteria. **Grass Forage Sci.** 70, 308–323. 2015.

CARVALHO, B.F.; ÁVILA, C.L.S.; PINTO, J.C.; NERI, J.; SCHWAN, R.F. Microbiological and chemical profile of sugar cane silage fermentation inoculated with wild strains of lactic acid bacteria. **Anim. Feed Sci. Technol.** 195, 1–13. 2014.

CARVALHO, M. A.; FERNANDES, F. D.; RAMOS, A. K. B.; BRAGA, G. J. Biomassa de Forrageiras Tropicais: potenciais teórico de produção de energia elétrica e etanol. **Embrapa Cerrados-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2021.

CASTRO, A. M.; PEREIRA JR, N. Produção, propriedades e aplicação de celulases na hidrólise de resíduos agroindustriais. **Química Nova**, v. 33, n. 1, p. 181-188, 2010.

CHIZZOTTI, F.H.M.; PEREIRA, O.G.; FILHO, S.C.V.; CHIZZOTTI, M.L.; RODRIGUES, R.T.S.; TEDESCHI, L.O.; SILVA, T.C. Does sugar cane ensiled with calcium oxide affect intake, digestibility, performance, and microbial efficiency in beef cattle? **Anim. Feed Sci. Technol.** 203, 23–32. 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acomp. safra bras. cana, v. 7 - Safra 2020/21**, n. 4 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-75, maio de

2021. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>. Acesso em: 16 mar. 2022.

CORRER, F. H.; HOSAKA, G. K.; BARRETO, F. Z.; VALADÃO, I. B.; BALSALOBRE, T. W. A.; FURTADO, A.; HENRY, R. J.; CARNEIRO, M. S.; MARGARIDO, G. R. A. Differential expression in leaves of *Saccharum* genotypes contrasting in biomass production provides evidence of genes involved in carbon partitioning. **BMC genomics**, v. 21, n. 1, p. 1-16, 2020.

CRUZ, C.D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum**. v.35, n.3, p.271-276, 2013

DA SILVA, V. L.; DE FREITAS, P. V. D. X.; DE OLIVEIRA CAETANO, G. A.; DE SOUZA FRANÇA, A. F. Cana energia e produção de silagem como estratégia para alimentação animal. **Veterinária e Zootecnia**, v. 27, p. 1-13, 2020.

DANIEL, J. L. P.; BERNARDES, T. F.; JOBIM, C. C.; SCHMIDT, P.; NUSSIO, L. G. Production and utilization of silages in tropical areas with focus on Brazil. *Grass and Forage Science*, v. 74, p. 188-200, 2019.

DANIEL, J. L. P.; CAPELESSO, A.; CABEZAS-GARCIA, E. H.; ZOPOLLATTO, M.; SANTOS, M. C.; HUHTANEN, P.; NUSSIO, L. G. Fibre digestion potential in sugarcane across the harvesting window. **Grass and Forage Science**, v. 69, n. 1, p. 176-181, 2014.

DANIEL, J. L. P.; JACOVACI, F. A.; JUNGES, D.; SANTOS, M. C.; LIMA, J. R.; ANJOS, I. A.; LANDELL, M. G. A.; HUHTANEN, P.; NUSSIO, L. G. Fibre digestibility and its relationships with chemical and morphological traits in thirty-two sugarcane varieties. *Grass and Forage Science*, v. 72, p. 545-555, 2016.

DANNER, H.; HOLZER, M.; MAYRHUBER, E.; BRAUN, R. Acetic acid increases stability of silage under aerobic conditions. **Applied and environmental microbiology**, v. 69, n. 1, p. 562-567, 2003.

DE MORAES, R. L.; RIBEIRO, K. G.; PEREIRA, O. G.; MARCONDES M. I.; CARDOSO, L. L. Silagem de cana-de-açúcar tratada com inoculantes microbianos e suas misturas. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v.7, n.3, p.76-83,2017.

DEL VALLE, T. A.; ZENATTI, T. F.; ANTONIO, G.; CAMPANA, M.; GANDRA, J. R.; ZILIO, E. M. C.; DE MATTOS L. F. A.; DE MORAIS, J. G. P. Effect of chitosan on the preservation quality of sugarcane silage. **Grass and Forage Science**, v. 73, n. 3, p. 630-638, 2018.

DELGADO, F.; SOUSA, M. E. DE; ROITMAN, T. **Bicombustíveis**, 2017.

DEMIRBAS, M. F. Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review. **Appl. Energ.** v. 86, p.S151-S161, 2009.

DEVI, G. K.; CHOZHAVENDHAN, S.; JAYAMUTHUNAGAI, J.; BHARATHIRAJA, B. Conversion of biomass to methanol and ethanol. In: **Horizons in Bioprocess Engineering**. Springer, Cham, 2019. p. 61-72.

DEVOS, K. M. - Grass genome organization and evolution. **Current Opinion in Plant Biology**. vol. 13, n. 2, p. 139-145, 2010.

DOAT, A. Le pouvoir calorifique dês bois tropical. Bois et Forest dos Tropiques, **Nogent. Sur-Marne**, v.172, p. 33-48, 1977

DOMINGUES, F. N.; OLIVEIRA, M. D. S. D.; SIQUEIRA, G. R.; ROTH, A. P. D. T. P.; SANTOS, J. D.; MOTA, D. A. Estabilidade aeróbia, pH e dinâmica de desenvolvimento de microrganismos da cana-de-açúcar in natura hidrolisada com cal virgem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 2011.

DOS SANTOS, W.C.C., DO NASCIMENTO, W.G., MAGALHÃES, A.L.R., SILVA, D.K.A., SILVA, W.J.C.S., SANTANA, A.V.S., SOARES, G.S.C., Nutritive value, total losses of dry matter and aerobic stability of the silage from three varieties of sugarcane treated with commercial microbial additives. **Anim. Feed Sci. Technol.** 204, 1–8. 2015.

DRIEHUIS, F.; WILKINSON, J. M.; JIANG, Y.; OGUNADE, I.; ADESOGAN, A. T. Silage review: animal and human health risks from silage. **Journal Dairy Science**, Amsterdam, v. 101, n. 5, p. 4093-4110, 2018.

EMBRAPA, **Vazio forrageiro: estratégias para driblar a escassez de pasto no outono**. EMBRAPA, 20 fev. 2018. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/31989924/vazio-forrageiro-estrategias-para-driblar-a-escassez-de-pasto-no-outono> > Acesso em: Abr. 2022.

EMBRAPA. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. – Brasília, DF: Embrapa, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Análise de conjuntura de biocombustíveis. Ano 2020**. Junho de 2021a. Disponível em < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis> > Acesso em: 13 de jan. de 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Oferta de Biocombustíveis Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Outubro de 2021b. Disponível em < <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-pde> > Acesso em: 13 de jan. de 2022.

FABRIS, L.B. **Variedades de cana forrageira e sucroalcooleira em diferentes espaçamentos e adubação nitrogenada**. 2009. 32p. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade do Oeste Paulista. Presidente Prudente, 2009.

FARIAS, D.; DE MÉLO, A. H.; DA SILVA, M. F.; BEVILAQUA, G. C.; RIBEIRO, D. G.; GOLDBECK, R.; FORTES, M.B.S; MAUGERI-FILHO, F. New biotechnological opportunities for C5 sugars from lignocellulosic materials. **Bioresource Technology Reports**, p. 100956, 2022.

FERNANDES A.M.; QUEIROZ A.C.; PEREIRA J.C.; LANA R.P.; BARBOSA M.; FONSECA D.M.; DETMANN E.; CABRAL L.S.; PEREIRA E.S.; VITTORI A. Composição químico-bromatológica de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum*

spp. L.) com diferentes ciclos de produção (precoce e intermediário) em três idades de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia** 32, 977-985, 2003.

FERREIRA, D.A.; GONÇALVES, L.C.; MOLINA, L.R. et al. Características de fermentação da silagem de cana-de-açúcar tratada com uréia, zeólita, inoculante bacteriano e inoculante bacteriano/enzimático. **Arquivos Brasileiros de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.59, n.2, p.423-433, 2007.

FLAUSINIO, B. F. P. G. **Produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar gerado no setor sucroalcooleiro de Minas Gerais**. 2015. 169 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

FONSECA, J. M. N. **Valorização energética de resíduos para uma economia circular: o estado da arte em Portugal**. 2020. 137 p. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2020.

FONTANELI, R.; BONDAN, C.; dos SANTOS, H. P.; JUCHEM, S. D. O.; PIZZANI, R., KLEIN, A.; ... GUBERT, M. Silagem de cereais de inverno: um alimento estratégico para a sustentabilidade da produção animal no subtropical brasileiro. 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAOSTAT**. 2022. Disponível em: < <http://faostat.fao.org/faostat> > . Acesso em: 10 jan. 2022.

FREITAS, A.W.P. **Avaliação da qualidade nutricional de genótipos de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) e de sua silagem com diferentes aditivos**. 2005. 100p. Tese (Doutorado em zootecnia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

GANDRA, J. R.; OLIVEIRA, E. R.; TAKIYA, C. S.; GOES, R. H. T. B.; PAIVA, P. G.; OLIVEIRA, K. M. P.; GANDRA, E. R. S.; ORBACH, N. D.; HAKI, H. M. C. Chitosan improves the chemical composition, microbiological quality, and aerobic stability of sugarcane silage. **Animal Feed Science and Technology**, v. 214, p. 44-52, 2016.

GIACOMINI, A. A.; BATISTA, K.; DE ANDRADE, J. B.; LIMA, M. L. P.; GERDES, L.; DE MATTOS, W. T.; OTSUK, I. P.; COLOZZA, M. T.; JÚNIOR, E. F. Potencial de cana de açúcar sucroalcooleira para alimentação de ruminantes ao longo do ciclo da cultura. **Boletim De Indústria Animal**, v. 71, n. 1, p. 8-17, 2014

GOMES, A. L. M.; BUENO, A. V.; OSMARI, M. P.; MACHADO, J.; NUSSIO, L. G.; JOBIM, C. C.; DANIEL, J. L. P. Effects of obligate heterofermentative lactic acid bacteria alone or in combination on the conservation of sugarcane silage. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 1025, 2021.

GRANT, R. J., ADESOGAN, A. T. Journal of dairy science silage special issue: Introduction. **Journal of Dairy Science**, 101, 3935–3936, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2019. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: < <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/201904/25164639-lspa-pesquisa->

mensal-de-previsao-e-acompanhamento-fevereiro-2019.pdf>. Acesso 19 de Jul., 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo agro 2017**. Disponível em: <<https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/>>. Acesso em: 04 de set. 2021.

JAISWAL, N.; AGARWAL, A.; TRIPATHI, A. D. Application of Microorganisms for Biofuel Production. In: **Bioenergy Research: Basic and Advanced Concepts**. Springer, Singapore, 2021. p. 35-72.

KUHN, J. G.; CUMBE, T. A.; BARCELLOS, J. O. J.; **Vazio forrageiro**. Nota técnica sobre sistemas de produção de bovinos de corte e cadeia produtiva, n 28, abr. 2020. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/nespro/wp-content/uploads/2021/04/nt28-vazio-forrageiro.pdf>> Acesso em: Abr. 2022.

KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia Naturais e Tecnológicas**, v. 2, n. 1, p. 171-182, 2001.

KUMAR, A. K.; SHARMA, S. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. **Bioresources and bioprocessing**, v. 4, n. 1, p. 1-19, 2017.

KUNG JR, L.; SHAVER, R. D.; GRANT, R. J.; SCHMIDT, R. J. Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. **Journal of dairy Science**, v. 101, n. 5, p. 4020-4033, 2018.

KUNG JR, L.; STANLEY, R. W. Effect of stage of maturity on the nutritive value of whole-plant sugarcane preserved as silage. **Journal of Animal Science**, v. 54, n. 4, p. 689-696, 1982.

LANDELL, M. G. A.; CAMPANA, M. P.; DE RODRIGUES, A. A.; DA CRUZ, G. M.; BATISTA, L. A. R.; FIGUEIREDO, P.; ...XAVIER, M. A. A variedade IAC86-2480 como nova opção de cana-de-açúcar para fins forrageiros: manejo de produção e uso na alimentação animal. **Embrapa Pecuária Sudeste-Séries anteriores (INFOTECA-E)**, 2002.

LIAO, J. J.; ABD LATIF, N. H.; TRACHE, D.; BROSSE, N.; HUSSIN, M. H. Current advancement on the isolation, characterization and application of lignin. **International journal of biological macromolecules**, v. 162, p. 985-1024, 2020.

LOPES, J. **Qualidade da silagem de cana-de-açúcar elaborada com diferentes aditivos**. 2006. 85p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

MAGALHÃES, J. A., RODRIGUES, B. H. N., SANTOS, F. D. S., DE ANDRADE JUNIOR, A. S., DE ARAÚJO NETO, R. B., COSTA, N. D. L. et al. Produção e composição química de variedades de cana-de-açúcar com fins forrageiros sob irrigação e adubação. **Embrapa Meio-Norte-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2018.

MASCARENHAS, L. S. **Uso de inoculantes microbiológicos para otimização do crescimento e desenvolvimento de plantas de cana-de-açúcar cultivadas sob déficit hídrico**. 2021. 98 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

MATOS, M. M. de (2020). Crescimento econômico e produção de energias renováveis: um breve estudo empírico. **Revista de Economia Mackenzie**, 17(2), 12-26. doi: 105935/1808-2785/rem.v17n2p.12-26

MATSUOKA, S.; BRESSIANI, J. A.; MACCHERONI, W.; FOUTO, I. Bioenergia da Cana. In: **Cana-de-açúcar: Bioenergia, Açúcar e Álcool**. (Eds. Santos, F.; Borém, A. e Caldas, C.) 2 ed. Viçosa: UFV, v.1. p 487-517, 2012.

MATSUOKA, S.; MACCHERONI, W. **Microsatellite-based fingerprinting system for *Saccharum* complex**. U.S. Patent Application n. 12/522,612, 28 jan. 2010.

McDONALD, P.M.; EDWARDS, R.A.; GREENHALGH, J.F.D.; MORGAN, C.A.; SINCLAR, L.A.; WILKINSON, R.G., **Animal nutrition**. Harlow, UK: Pearson, 2010. 693p

McDONALD, P.; HENDERSON, A.R.; HENDERSON, S.J. **Biochemistry of silage**. 2.ed. Marlow: Chalcombe, 1991. 340 p.

MIELLENZ, J. R. Small-scale approaches for evaluating biomass bioconversion for fuels and chemicals. In: **Bioenergy**. Academic Press, 2015. p. 385-406.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Resenha Energética Brasileira - Exercício de 2020**. edição 2021, v.3, Brasília- DF, p. 1-31, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/resenha-energetica-brasileira/resenhas.pdf>>. Acesso em: 22 de fev. de 201.

MOOD, S. H.; GOLFESHAN, A. H.; TABATABAEI, M.; JOUZANI, G. S.; NAJAFI, G. H.; GHOLAMI, M.; ARDJMAND, M. Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 27, p. 77-93, 2013.

MORAIS, L. K.; CURSI, D.; DOS SANTOS, J. M.; SAMPAIO, M.; CAMARA, T.; SILVA, P. D. A.; ... GAZAFFI, R. Melhoramento genético da cana-de-açúcar. **Embrapa Tabuleiros Costeiros-Documents (INFOTECA-E)**, 2015.

MORINI, M. S. C.; DA SILVA, O. G. M.; ZAMBON, V.; NOCELLI, R. C. F. Cultura de cana-de-açúcar no Brasil: manejo, impactos econômicos, sociais e ambientais. **Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica**, p. 31.

MUCK, R. E.; NADEAU, E. M. G.; MCALLISTER, T. A. Silage review: Recent advances and future uses of silage additives. **Journal of dairy science**, v. 101, n. 5, p. 3980-4000, 2018.

MURARO, G.B.; ROSSI JUNIOR, P.; OLIVEIRA, V.C.; GRANZOTTO, P.M.C.; SCHOGOR, A.L.B. Efeito da idade de corte sobre a composição bromatológica e as características de cana-de-açúcar plantada em dois espaçamentos e três idades de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, n.8, p.1525-1531, 2009.

MUSSATTO, S. I.; DRAGONE, G.; GUIMARÃES, P. M.; SILVA, J. P. A.; CARNEIRO, L. M.; ROBERTO, I. C.; VICENTE, A.; DOMINGUES, L.; TEIXEIRA, J. A. Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production. **Biotechnology advances**, v. 28, n. 6, p. 817-830, 2010.

NUSSIO, L.G.; ROMANELLI, T.L.; ZOPOLLATTO, M. Tomada de decisão na escolha de volumosos suplementares para bovinos de corte em confinamento. In: SIMPÓSIO GOIANO SOBRE MANEJO E NUTRIÇÃO DE BOVINOS DE CORTE E LEITE, 5, 2003, Campinas. **Anais...** Campinas: CBNA, 2003. p.1-14.

OF ENERGY, US Department. Bioenergy: Biomass to Biofuels Glossary of Terms and Conversion Factors. In: **Bioenergy**. Academic Press, 2015. p. 41-52.

OGEDA, T. L.; PETRI, D. F. S. Hidrólise Enzimática de Biomassa. **Quím. Nova [online]**. 2010, vol.33, n.7, pp.1549-1558.

O'HARA, I. M.; MUNDREE, S. G. **Sugarcane-based biofuels and bioproducts**. John Wiley & Sons, 2016.

PACHECO, T. F. Produção de etanol: primeira ou segunda geração?. **Embrapa Agroenergia-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2011.

PARACHIN, N. S.; ALMEIDA, J. R. M. In: **Microrganismos na Produção de biocombustíveis Líquidos**; Machado, C. M. M. (Edt.); Embrapa: Brasília, 2013, p.189

PEDROSO, A. D. F., NASSU, R. T., TULLIO, R. R., BERNDT, A., JUNIOR, W. B., ESTEVES, S. N. Sugarcane silage treated with calcium hydroxide in feedlot cattle diet: animal performance and meat quality. **Boletim de Indústria Animal**, v. 75, 2018.

PEDROSO, A. D. F.; NUSSIO, L. G.; PAZIANI, S. D. F.; LOURES, D. R. S.; IGARASI, M. S.; COELHO, R. M.; ... GOMES, L. H. Fermentation and epiphytic microflora dynamics in sugar cane silage. **Scientia Agricola**, v. 62, p. 427-432, 2005.

PEDROSO, A. F. **Aditivos na ensilagem de cana-de-açúcar**. Embrapa Pecuária Sudeste-Circular Técnica (INFOTECA-E), 2004.

PLAYNE, M.J.; McDONALD, P. The buffering constituents of herbage and of silage. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.17, p.264-268, 1966.

RABELO, C. H. S., BASSO, F. C., LARA, E. C., JORGE, L. G. O., HÄRTER, C. J., MARI, L. J., REIS, R. A. Effects of *Lactobacillus buchneri* as a silage inoculant or probiotic on in vitro organic matter digestibility, gas production and volatile fatty acids of low dry-matter whole-crop maize silage. **Grass and Forage Science**, v.72 n. 3, p. 534-544, 2017.

RABELO, C. H. S.; BASSO, F. C.; LARA, E. C.; JORGE, L. G. O.; HÄRTER, C. J.; MESQUITA, L. G.; ... REIS, R. A. Effects of *Lactobacillus buchneri* as a silage inoculant and as a probiotic on feed intake, apparent digestibility and ruminal

fermentation and microbiology in wethers fed low-dry-matter whole-crop maize silage. **Grass and forage science**, v. 73, n. 1, p. 67-77, 2018.

RABELO, C. H. S.; HÄRTER, C. J.; ÁVILA, C. L. D. S.; REIS, R. A. Meta-analysis of the effects of *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus buchneri* on fermentation, chemical composition and aerobic stability of sugarcane silage. **Grassland science**, v. 65, n. 1, p. 3-12, 2019.

RANA, V.; ECKARD, A. D.; AHRING, B. K. Comparison of SHF and SSF of wet exploded corn stover and loblolly pine using in-house enzyme produced from *T. reesei* RUT C30 and *A. saccharolyticus*. **Springer Plus**, v. 3, n. 516, p. 1-13, 2014.

RANJIT N. K., KUNG JR. L. The effect of *Lactobacillus buchneri*, *Lactobacillus plantarum*, or a chemical preservation on fermentation and aerobic stability of corn silage. **Journal of Dairy Science**, 83(3), 526-535, 2000.

RESENDE, F.D.; SIGNORETTI, R.D.; COAN, R.M.; SIQUEIRA, G.R. Terminação de bovinos de corte com ênfase na utilização de alimentos conservados. In: REIS, R.A.; SIQUEIRA, G.R.; BERTIPAGLIA, L.M.A. (Eds). **Volúmosos na produção de ruminantes**. Jaboticabal: Funep, 2005. p.83-104.

RIPOLI, M. L. C. **Ensaio de dois sistemas de obtenção de biomassa de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) para fins energéticos**. 2004. 213 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2004.

RUGERI, A. P. **Identificação do uso e desempenho de genótipos de cana-de-açúcar no Estado do Rio Grande do Sul**. 2015, 91 p. Dissertação - Mestrado em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2015.

SÁNCHEZ, C. Lignocellulosic residues: biodegradation and bioconversion by fungi. **Biotechnology advances**, v. 27, n. 2, p. 185-194, 2009.

SANCHEZ, O. J.; CARDONA, C. A. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. **Bioresource technology**, v. 99, n. 13, p. 5270-5295, 2008.

SANTOS, F. A. **Análise da Aplicação da Biomassa da Cana como Fonte de Energia Elétrica: Usina de Açúcar, Etanol e Bioeletricidade**. Dissertação de Mestrado, POLI/Universidade de São Paulo, 2012.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. D.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C (Ed.). **Sugarcane: agricultural production, bioenergy and ethanol**. Academic Press, 2015.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, JH de. **Bioenergia e Biorrefinaria: Cana-de-Açúcar e Espécies Florestais**. Os Editores, 2013.

SANTOS, F.; RABELO, S.; DE MATOS, M.; & EICHLER, P. (Ed.). **Sugarcane biorefinery, technology and perspectives**. Academic Press, 2019.

SANTOS, M. C.; NUSSIO, L. G.; MOURÃO, G. B.; SCHMIDT, P.; MARI, L. J.; RIBEIRO, J. L.; Influência da utilização de aditivos químicos no perfil da fermentação, no valor nutritivo e nas perdas de silagens de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 9, p. 1555-1563, 2008.

SCHMIDT, P. **Perdas fermentativas na ensilagem, parâmetros digestivos e desempenho de bovinos de corte alimentados com rações contendo silagens de cana-de-açúcar**. 2006. 228p. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

SILVA, D.J.; QUEIROZ, A.C. **Análise de Alimentos: métodos químicos e biológicos**. 3.ed. 235p Viçosa: UFV, 2002.

SILVA, L. D., PEREIRA, O. G., ROSEIRA, J. P. S., AGARUSSI, M. C. N., SILVA, V. P., SILVA, T. C., ... VALADARES, S. F. Effect of Wild Lactobacillus buchneri Strains on the Fermentation Profile and Microbial Populations of Sugarcane Silage. **Recent patents on food, nutrition & agriculture**. 2019.

SILVA, L. F. P. E, FERRARI, V. B., CÔNSOLO, N. R. B., SOUSA, R. T. DE, SOUZA, J. M. DA, SOUSA, D. O. de, et al. Fontes de carboidratos não fibrosos na terminação de bovinos de corte. In: **Novos desafios da pesquisa em nutrição e produção animal** [S.l: s.n.], 2014.

SILVA, S. D. A.; SIMON, E.; CARNEIRO, J. D. C.; MONTERO, C.; TATTO, F. Composição química nutricional de genótipos de cana-de-açúcar coletados no Sul do Brasil. **Embrapa Clima Temperado-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2016.

SILVA, S. I. S. **Biomassa para geração de energia: eucalipto, cana-energia e bagaço de cana-de-açúcar**. 2016.

SILVA, V. L.; DE FREITAS, P. V. D. X.; DE OLIVEIRA CAETANO, G. A.; DE SOUZA FRANÇA, A. F. Cana energia e produção de silagem como estratégia para alimentação animal. **Veterinária e Zootecnia**, v. 27, p. 1-13, 2020.

SIQUEIRA, G. R.; REIS, R. A.; SCHOCKEN-ITURRINO, R. P.; PIRES, A. J. V.; BERNARDES, T. F.; AMARAL, R. C. D. Perdas de silagens de cana-de-açúcar tratadas com aditivos químicos e bacterianos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 36, n. 6, p. 2000-2009, 2007.

SIQUEIRA, G. R.; ROTH, M. D. T. P.; MORETTI, M. H.; BENATTI, J. M. B.; RESENDE, F. D. D. Uso da cana-de-açúcar na alimentação de ruminantes. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 13, n. 4, 2012.

SIQUEIRA, G.R.; REIS, R.A.; SCHOCKEN-ITURRINO, R. P.; PIRES, A. J. V.; BERNARDES, T. F.; ROTH, M. D. T. P. Queima e aditivos químicos e bacterianos na ensilagem da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.39, n.1, p.103-112, 2010.

SIQUEIRA, G.R.; RESENDE, F.D.; REIS, R. A.; ROMAN, J.; BERNARDES, T.F. Uso estratégico de forragens conservadas em sistemas de produção de carne. In: JOBIM, C.C.; CECATO, U.; CANTO, M.W. (Eds) **Produção e utilização de forragens conservadas**. Maringá: Masson, 2008. p.41-89.

TEW, T. L.; COBILL, R. M. Genetic Improvement of Sugarcane (*Saccharum spp.*) as an Energy Crop. In: VERMERRIS, W. **Genetic Improvement of Bioenergy Crops**. Springer, New York, 2008. cap. 9, p. 273-294.

THIAGO, L. D. S.; VIEIRA, J. M. Cana-de-açúcar: uma alternativa de alimento para a seca. **Embrapa Gado de Corte-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2002.

TOMICH, T. R.; PEREIRA, L. G. R.; GONÇALVES, L. C.; TOMICH, R. G. P.; BORGES, I. Características químicas para avaliação do processo fermentativo de silagens: uma proposta para qualificação da fermentação. **Embrapa Pantanal-Documentos (INFOTECA-E)**, 2003.

TROMBETA, N. D. C.; CAIXETA FILHO, J. V. Potencial e Disponibilidade de Biomassa de Cana-de-açúcar na Região Centro-Sul do Brasil: indicadores agroindustriais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 55, n. 3, p. 479- 496, 2017

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR – UNICA. **Bioeletricidade, energia sustentável!** Disponível em: <https://www.unica.com.br/setor-sucroenergetico/bioeletricidade/>. Acesso em: 16 de fev. 2022.

VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B. 1985. **Analysis of forages and fibrous foods**, Cornell University, Ithaca.

VIOLANTE, M. H. S. R. **Potencial de produção de cana-energia**. Dissertação. FGV. São Paulo, 2012.

WILLIAMS, C. L.; DAHIYA, A.; PORTER, P. Introduction to bioenergy and waste to energy. In: **Bioenergy**. Academic Press, p. 5-44, 2020.

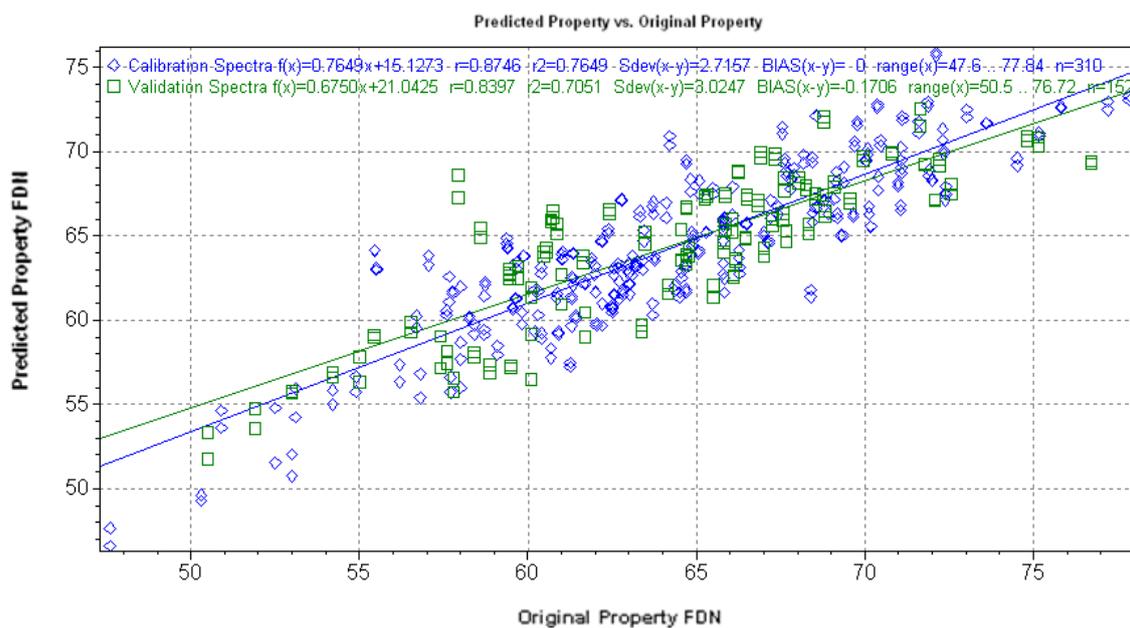
XAVIER, M. A. et al. Gemas brotadas de cana-de-açúcar: produção sustentável e utilização experimental na formação de áreas de multiplicação Campinas: Instituto Agrônômico, 52 p. (**Documentos IAC, 115**), 2020.

ZANINE, A. M.; SANTOS, E. M.; FERREIRA, D. J.; PEREIRA, O. G.; ALMEIDA, J. C. C. Efeito do farelo de trigo sobre as perdas, recuperação da matéria seca e composição bromatológica de silagem de capim-mombaça. **Brazilian Journal of veterinary Research and animal Science**, v. 43, n. 6, p. 803-809, 2006.

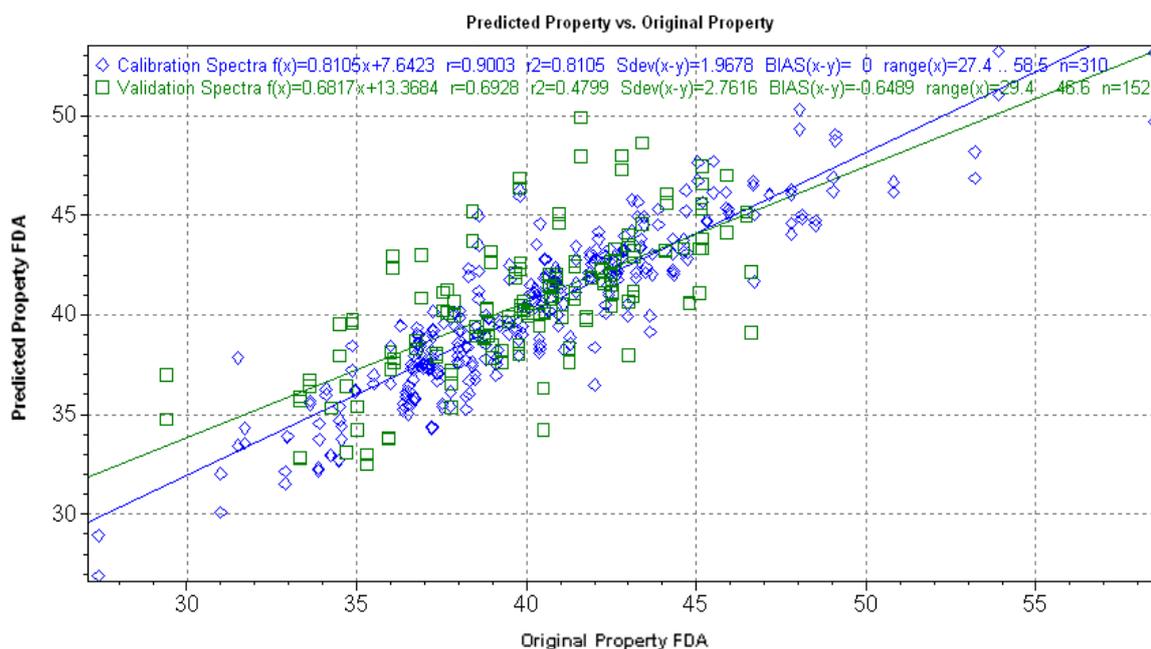
ZHAO, X.; PENG, F.; DU, W.; LIU, C.; LIU, D. Effects of some inhibitors on the growth and lipid accumulation of oleaginous yeast *Rhodospiridium toruloides* and preparation of biodiesel by enzymatic transesterification of the lipid. **Bioprocess and biosystems engineering**, v. 35, n. 6, p. 993-1004, 2012.

ANEXOS

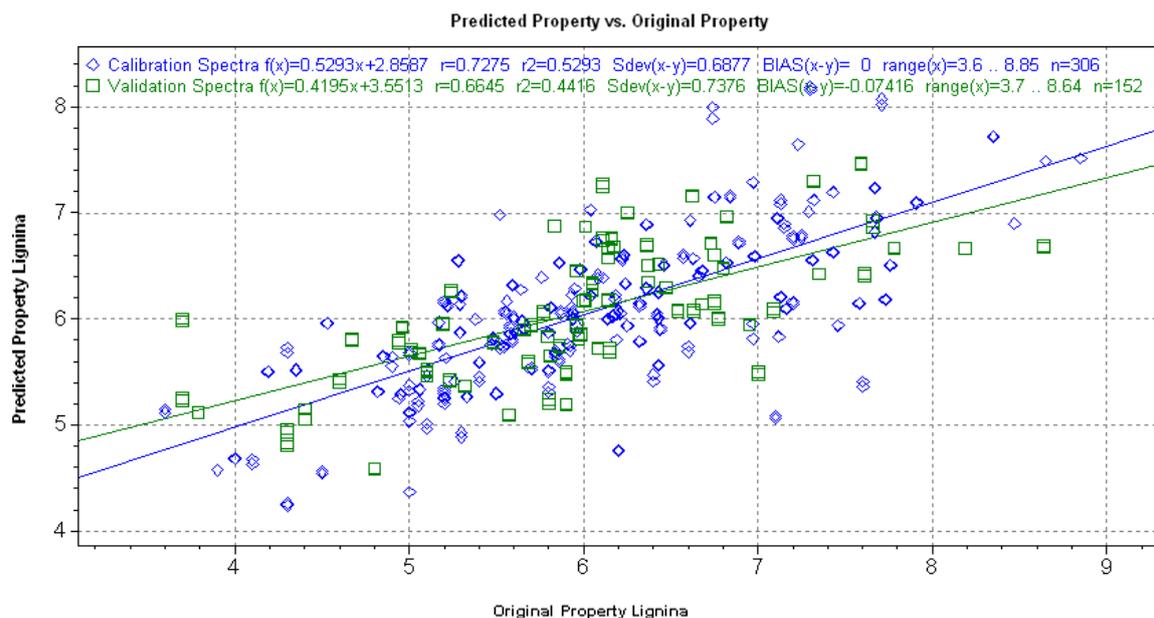
Anexos A – Figuras curvas de calibração (NIR) e tabelas resumo da análise de variância para as variáveis do capítulo 1



Anexo A1. Curva de calibração FDIH de amostras de cana-de-açúcar para espectroscopia de infravermelho próximo (NIR).



Anexo A2. Curva de calibração FDA de amostras de cana-de-açúcar para espectroscopia de infravermelho próximo (NIR).



Anexo A3. Curva de calibração LIG de amostras de cana-de-açúcar para espectroscopia de infravermelho próximo (NIR).

Anexo A4. Número de amostras, espectros e coeficiente de determinação (r^2) de calibração e validação para as curvas de FDN, FDA e LIG utilizadas, para espectroscopia de infravermelho próximo (NIR).

Curva	Calibração			Validação		
	n° amostras	n° de espectros	r^2	n° amostras	n° de espectros	r^2
FDN	155	310	0,7649	76	152	0,7051
FDA	155	310	0,8105	76	152	0,4799
LIG	153	306	0,5293	76	152	0,4416

Anexo A5 - Resumo Anova desempenho produtivo dos genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de primeira soca, para as variáveis TMF, TMS, TCH e TBH com respectivos quadrados médios

FV	GL	TMF	TMS	TCH	TBH
Blocos	2	146,1667	46,2035	92,7267	1,0557
Gen.	17	3175,601 **	122,2198 **	2471,826 **	95,5117 **
Resíduo	34	301,0927	16,822	197,2551	6,3369
Média		116,7	23,06	100,94	18,36
CV(%)		14,87	17,79	13,91	13,71

Anexo A6 - Resumo Anova composição química dos genótipos de cana-de-açúcar em ciclo de primeira soca, para as variáveis FDN, FDA, HEMI, CEL, LIG e CZ com respectivos quadrados médios

FV	GL	FDN	FDA	HEMI	CEL	LIG	CZ	MS
Blocos	2	4,2217	35,0826	49,7965	27,2383	0,5205	0,115	28,6952
Gen.	17	23,878 **	16,9825 *	8,3515 *	16,5601 **	0,4548 **	1,3604 **	24,1672 **
Resíduo	34	7,8999	7,0324	3,5764	6,0667	0,1764	0,31	3,646
Média		65,77	42,14	23,62	35,84	6,30	4,9	20,0
CV(%)		4,27	6,29	8,00	6,87	6,66	11,4	9,6

** significativos a 1 % e * significativo a 5% de probabilidade pelo teste F, ns não-significativo

Anexo B - Tabelas resumo da análise de variância para as variáveis do capítulo 2

Anexo B1 - Composição química da forragem dos genótipos antes da ensilagem

Genótipo	CZ		FDN		FDA		HEM	CEL		LIG	
PRBIO353	5,22	a	62,2	a	46,1	a	15,9	40,1	a	5,99	a
RB106818	3,56	d	57,9	bc	41,1	b	16,8	35,8	ab	5,34	ab
PRBIO435	4,61	b	60,6	ab	43,2	ab	17,1	38,4	a	4,89	ab
PRBIO407	3,30	d	61,6	a	42,6	ab	18,9	37,3	a	5,23	ab
RB106822	4,82	b	51,6	d	34,2	c	17,4	29,7	b	4,22	b
RB106819	3,97	c	55,7	c	35,6	c	19,9	31,2	b	4,35	b

^{a-d} Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem significativamente ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey.

Anexo B2 - Composição química das silagens de cana-de-açúcar após inoculação bacteriana (dados em % MS, salvo indicação em contrário).

Item	FDA	HEM	CEL	LIG
Genótipo				
PRBIO353	43.6 ab	20.1 ab	38.3 a	5.35
RB106818	44.2 a	16.1 c	39.3 a	4.99
PRBIO435	43.9 a	19.2 b	39.5 a	4.40
PRBIO407	43.8 a	23.0 a	39.0 a	4.87
RB106822	38.6 c	18.6 bc	33.8 b	4.77
RB106819	40.5 bc	20.4 ab	35.4 b	5.13
Tratamento¹				
Controle	45.2 a	21.3 a	40.0 a	5.20
LB	41.0 b	18.6 b	36.2 b	4.80
MIX	41.1 b	18.9 b	36.4 b	4.75

^{a-c} Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem significativamente ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey.

¹ A cana-de-açúcar foi tratada na ensilagem sem inoculação (controle) ou com *Lactobacillus buchneri* (5×10^4 ufc g^{-1} de forragem fresca (LB)), ou com uma mistura de BAL heterofermentativa (3×10^5 ufc g^{-1} de forragem fresca (MIX)).

Anexo B3 - Perdas fermentativas e estabilidade aeróbia de silagens de cana-de-açúcar após inoculação bacteriana (dados em % MS, salvo indicação em contrário).

Genótipo	Tratamento	Efluente, Kg t ⁻¹ MF	Perdas Gás	Perdas MS	Estabilidade Aeróbia, h
PRBIO353	Controle	56,1	13,8	18,7	87
PRBIO353	LB	62,1	7,5	10,3	214
PRBIO353	MIX	66,5	11,7	17,7	276
RB106818	Controle	63,4	17,8	23,3	158
RB106818	LB	61,8	13,3	18,8	215
RB106818	MIX	64,9	7,8	14,1	89
PRBIO435	Controle	53,2	18,4	22,8	100
PRBIO435	LB	54,6	6,5	11,7	154
PRBIO435	MIX	60,1	12,6	18,0	220
PRBIO407	Controle	55,9	18,0	22,8	-
PRBIO407	LB	53,5	4,6	9,8	222
PRBIO407	MIX	77,4	7,4	14,9	117
RB106822	Controle	59,7	20,6	25,5	124
RB106822	LB	60,2	7,4	9,6	117
RB106822	MIX	58,7	9,7	15,1	221
RB106819	Controle	61,9	18,6	24,7	152
RB106819	LB	60,9	4,7	10,6	121
RB106819	MIX	61,7	5,0	11,0	191
EPM		5,42	2,63	2,35	36,1
P-valor	G*	0,44	0,40	0,43	0,91
	T	0,036	<0,001	<0,001	0,032
	G × T	0,27	0,25	0,07	0,08

*G = genótipos de cana-de-açúcar; T = tratamento da silagem; G × T = interação entre genótipos de cana-de-açúcar e tratamentos de silagem. ¹ A cana-de-açúcar foi tratada na ensilagem sem inoculação (controle) ou com *Lactobacillus buchneri* (5×10^4 ufc g⁻¹ de forragem fresca (LB)), ou com uma mistura de BAL heterofermentativa (3×10^5 ufc g⁻¹ de forragem fresca (MIX)).

Anexo B4 - Perfil fermentativo das silagens de cana-de-açúcar após inoculação bacteriana (dados em % MS)

Item	Acético	Butírico
Genótipo		
PRBIO353	2,0 a	0,41
PRBIO407	1,2 b	0,39
PRBIO435	2,2 a	0,36
RB106818	1,8 ab	0,55
RB106819	1,8 ab	0,49
RB106822	1,8 ab	0,40
Tratamento¹		
Controle	1,4 b	0,54 a
LB	1,9 a	0,45 ab
Mix	2,1 a	0,31 b

^{a-b} Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem significativamente ($p \leq 0,05$) pelo teste de Tukey.

¹ A cana-de-açúcar foi tratada na ensilagem sem inoculação (controle) ou com *Lactobacillus buchneri* (5×10^4 ufc g⁻¹ de forragem fresca (LB)), ou com uma mistura de BAL heterofermentativa (3×10^5 ufc g⁻¹ de forragem fresca (MIX)).