

TATIANA VILELA DE SOUZA PESSOA

**ANÁLISE DIALÉLICA DE CLONES DE CAPIM ELEFANTE PARA PRODUÇÃO DE
BIOENERGIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Pedro C. Souza Carneiro

Coorientadores: Kaio O. das Graças Dias
Juarez Campolina Machado

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Campus**

T
P475a
2022

Pessoa, Tatiana Vilela de Souza, 1996-
Análise dialética de clones de capim elefante para produção de bioenergia / Tatiana Vilela de Souza Pessoa. - Viçosa, MG, 2022.
1 dissertação eletrônica (43 f.): il.
Inclui anexo.
Orientador: Pedro Crescêncio Souza Carneiro
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Biologia Geral, 2022.
Referências bibliográficas: .
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.556>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. *Cenchrus purpureus*; 2. Capim-elefante - Melhoramento genético; 3. Clonagem; 4. Biocombustíveis; I. Carneiro, Pedro Crescêncio Souza II. Universidade Federal de Viçosa.. Departamento de Biologia Geral. Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento III. Título

CDD 22. ed. 633.2233

Bibliotecário(a) responsável: ALICE REGINA PINTO PIRES CRB-6/2523


TATIANA VILELA DE SOUZA PESSOA

**ANÁLISE DIALÉTICA DE CLONES DE CAPIM ELEFANTE PARA PRODUÇÃO DE
BIOENERGIA**

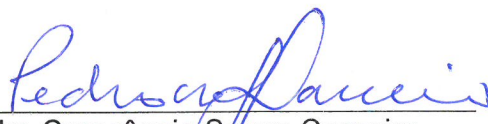
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 12 de julho de 2022

Assentimento:



Tatiana Vilela de Souza Pessoa
Autora



Pedro Crescêncio Souza Carneiro
Orientador

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por sempre guiar meus passos nos caminhos dEle. Por me ensinar a ter calma e absoluta certeza que nunca estarei desamparada e desprotegida. Obrigada, meu Deus, por colocar esperança e paz em meu coração.

Em seguida, agradecer aos meus pais José Alencar e Elizabeth por nunca medirem esforços para que a realização dos meus sonhos fosse possível. Eu não seria quem sou se não fosse vocês. Obrigada pelo amor, pela nossa união, por sempre me mostrarem exemplos de como ser alguém melhor e buscar o bem. Obrigada por toda confiança depositada em mim. Só tenho a agradecer por todo o apoio e por principalmente nunca me deixarem perder a fé e a coragem. Obrigada por TANTO. Amo muito vocês.

Gostaria também de lembrar em geral dos meus familiares, que sempre torceram por mim e que me ajudaram de alguma maneira. Em especial, não poderia esquecer da minha avó Eriam que sempre foi meu porto seguro. Obrigada por me mostrar como praticar o amor e ser a alma mais pura com quem já convivi. Você é meu exemplo. Continue olhando por nós ai de cima.

Também agradecer ao meu namorado Dimas por sempre me apoiar em minhas decisões e por fazer de meus sonhos, os dele. Obrigada por ser meu porto seguro, principalmente nos dias mais difíceis.

Não poderia deixar de agradecer aos professores que fizeram parte da minha caminhada, por todo tempo dedicado e conhecimento compartilhado. Em especial, aos professores Pedro e Kaio pelo apoio e orientação. Ao pesquisador Juarez pela confiança, parceria e paciência. Aos amigos do Programa de Melhoramento de Feijão e Laboratório de Biometria da Universidade Federal de Viçosa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

PESSOA, Tatiana Vilela de Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2022. **Análise Dialética de Clones de Capim Elefante para Produção de Bioenergia**. Orientador: Pedro Crescêncio Souza Carneiro. Coorientadores: Kaio Olimpio das Graças Dias e Juarez Campolina Machado.

Com o avanço das mudanças climáticas causadas pelo uso dos combustíveis fósseis, muita atenção tem sido direcionada para a identificação de espécies que sejam adequadas para o uso bioenergético. A biomassa de capim elefante pode ser uma ótima alternativa para diversificar a matriz energética. Uma das principais etapas de um programa de melhoramento genético é a escolha de genitores que irão compor o bloco de cruzamentos e nesta etapa destaca-se o uso dos dialelos. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo utilizar a abordagem de modelos lineares mistos para analisar cruzamentos dialélicos e estimar a capacidade geral (CGC) e específica (CEC) de combinação de clones de capim elefante, visando selecionar genitores e híbridos superiores para fins bioenergéticos. Onze genitores foram cruzados em esquema de dialelo, totalizando 55 combinações híbridas que foram avaliados em delineamento de blocos completos casualizados com três repetições. As características mensuradas foram: produção de biomassa seca (BS), digestibilidade *in vitro* da biomassa seca (DIVBS) e relação celulose/lignina (REL CEL/LIG). Observou-se efeito significativo de CEC, interação CEC x Corte e efeito permanente para BS e efeito significativo da CGC para DIVBS e REL CEL/LIG. Houve predominância de genes com efeitos aditivos no controle dos caracteres DIVBS e REL CEL/LIG e de dominância e epistasia para BS. Os genitores selecionados para processos de conversão bioquímica foram BAGCE 38 e CNPGL 92-38-2. Já para combustão direta da biomassa os genitores selecionados foram BRS Canará, BRS Capiaçú e CNPGL 96-27-3. Os híbridos oriundos dos cruzamentos BAGCE 21 x BAGCE 38, BAGCE 30 x CNPGL-92-38-2 e BAGCE 38 x BRS Kurumi apresentam potencial considerando a produção de biomassa seca.

Palavras-chave: *Cenchrus purpureus*. Dialelo. Biomassa

ABSTRACT

PESSOA, Tatiana Vilela de Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2022. **Diallel Analysis of Elephant Grass Clones for Bioenergy Production.** Adviser: Pedro Crescêncio Souza Carneiro. Co-advisers: Kaio Olimpio das Graças Dias and Juarez Campolina Machado

With the advance of climate change caused by the use of fossil fuels, much attention has been directed to the identification of species suitable for bioenergetic use. Elephant grass biomass can be a great alternative to diversify the energy matrix. One of the main steps of a genetic breeding program is the choice of parents that will compose the crossing block and in this step, the use of diallels stands out. Given the above, this study aimed to use the approach of mixed linear models to analyze diallel crosses and estimate the general (GCA) and specific combining ability (SCA) of elephant grass clones, aiming to select superior parents and hybrids for purposes of bioenergetics. Eleven parents were crossed in a diallel scheme, totaling 55 hybrid combinations that were evaluated in a randomized complete block design with three replications. The characteristics measured were: dry biomass production (BS), in vitro dry biomass digestibility (DIVBS), and cellulose/lignin ratio (REL CEL/LIG). There was a significant effect of CEC, CEC x Cut interaction, and permanent effect for BS, and a significant effect of CGC for DIVBS and REL CEL/LIG. There was a predominance of genes with additive effects controlling DIVBS and REL CEL/LIG characters and dominance and epistasis for BS. The parents selected for the biochemical conversion processes were BAGCE 38 and CNPGL 92-38-2. For the direct combustion of biomass, the selected parents were BRS Canará, BRS Capiaçú, and CNPGL 96-27-3. The hybrids of the crosses were BAGCE 21 x BAGCE 38, BAGCE 30 x CNPGL-92-38-2 and BAGCE 38 x BRS Kurumi present potential considering the production of dry biomass

Keywords: *Cenchrus purpureus*. Diallel. Biomass.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1.A cultura e o melhoramento genético do capim elefante	7
2.2.Biomassa energética e capim elefante visando bioenergia	10
2.3.Análise dialética	13
2.4.Modelos mistos.....	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
4. RESULTADOS	21
5. DISCUSSÃO.....	27
6. CONCLUSÕES.....	32
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
8. ANEXOS.....	42

1. INTRODUÇÃO

O uso de alternativas de energia renovável está se tornando cada vez mais necessário para alcançar as mudanças fundamentais e enfrentar os desafios de segurança energética e diminuição da poluição ambiental. Dados da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*, IEA) afirmam que a bioenergia é responsável por aproximadamente um décimo do suprimento total de energia primária mundial e indicam que a demanda de biocombustíveis deve aumentar 28% até 2026 (IEA, 2021).

O uso da biomassa para fornecer energia tem sido fundamental e amplamente estudado. A conversão de biomassa em energia é alcançada de diversas maneiras e é determinada pela forma de utilização. Quando a biomassa é utilizada para o processo de combustão direta, é esperado que tenha altos valores de celulose e lignina, alto poder calorífico, alta relação carbono/nitrogênio, além de baixos teores de umidade, nitrogênio e cinzas (McKendry, 2002a; Long et al., 2006; Gani e Naruse, 2007; Jaradat, 2010). Já para a produção de etanol celulósico, o esperado é que a biomassa possua altos teores de hemicelulose e alta relação celulose/lignina (McKendry, 2002a). Além disso, segundo Porter et al. (2007), para os processos fermentativos, a biomassa deve apresentar alta concentração de carboidratos com baixo peso molecular no estado não polimerizado. Ultimamente, muita atenção tem sido direcionada para a identificação de espécies que sejam adequadas para o uso bioenergético.

O capim elefante [*Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone syn. *Pennisetum purpureum* Schumach.] tem se destacado como opção para a produção de bioenergia (Marafon et al., 2014; Rocha et al. 2017a, b; Marafon et al., 2021). De acordo com diversos autores, a espécie, que é tradicionalmente utilizada para alimentação animal, vem atraindo a atenção especialmente por ser altamente eficiente em termos fotossintéticos, alta produtividade, longevidade, acelerado crescimento, fácil adaptação, além de suas propriedades químicas e capacidade de fixar nitrogênio (Anderson et al., 2008; Chaves et al., 2013; Marafon et al., 2014; Fontoura et al., 2015; Pereira et al., 2021).

Para atender a demanda relacionada à disponibilidade de cultivares com elevada qualidade de biomassa energética, os programas de melhoramento de capim elefante podem direcionar seus estudos para geração de híbridos superiores e exploração da

heterose. Nesse sentido, os cruzamentos dialélicos merecem destaque. Segundo Cruz et al. (2012), permitem estimar parâmetros genéticos que auxiliam na escolha de métodos de seleção que sejam mais eficientes e indicam quais os genitores de maior potencial para a hibridação, os quais otimizam o efeito heterótico.

Em razão do capim elefante ser uma espécie perene, vários cortes são feitos ao longo do ciclo produtivo da cultura, existindo, desta maneira, uma correlação entre as medidas, considerada de natureza ambiental ou outra circunstância que afetará o indivíduo permanentemente. Utilizar modelos lineares mistos pode ser muito útil para lidar com dados incompletos e desbalanceados, além de estimar parâmetros genéticos como herdabilidade, correlações genéticas, etc. Neste contexto, a abordagem preferida é REML/BLUP (*Restricted Maximum Likelihood/Best Linear Unbiased Predictor*). Esta abordagem permite que os parâmetros genéticos sejam estimados simultaneamente e facilita a predição de valores genotípicos, o que maximiza a correlação entre valores reais e os preditos (Searle et al., 2009).

Diante do exposto, este trabalho tem por objetivo utilizar a abordagem de modelos lineares mistos para analisar cruzamentos dialélicos e estimar os efeitos da capacidade geral e específica de combinação de clones de capim elefante, visando selecionar genitores e híbridos superiores considerando sua utilização para fins bioenergéticos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A cultura e o melhoramento genético do capim elefante

O capim elefante [*Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone syn. *Pennisetum purpureum* Schumach.] é uma gramínea muito utilizada em todo mundo (Carvalho et al., 1997). A espécie pertence à família *Poaceae*, subfamília *Panicoideae* e tribo *Paniceae*, que é representada pelos mais importantes gêneros de forrageiras tropicais (Pereira et al., 2001).

Possui como centro de origem e variabilidade genética os territórios de Moçambique, Guiné, Zimbábue, Angola e sul do Quênia (Ferreira e Pereira, 2005). No Brasil, considera-se que as primeiras mudas foram introduzidas em diferentes momentos, sendo o primeiro no Rio Grande do Sul em 1920 e, o segundo, em São Paulo no ano de 1921 com mudas vindas dos Estados Unidos e Cuba,

respectivamente. Com o passar do tempo, seu cultivo foi disseminado pelo país por apresentar ampla adaptação, alta produtividade e boa qualidade da forragem (Pereira e Lédo, 2008; Lira, et al., 2010).

De acordo com estudos realizados por Martel et al. (1997), a espécie é uma cultura perene, alógama e alotetraploide, possuindo 48 cromossomos em suas células somáticas ($2n = 4x = 48$) e genoma A'A'BB. É uma espécie com grande variabilidade genotípica ao considerar a maioria das características de importância zootécnica e agrônômica (Pereira et al., 2000). Vários estudos têm demonstrado que os cromossomos do genoma A' do capim elefante são homólogos aos do genoma A do milho (genoma AA), sendo considerado um de seus ancestrais (Jauhar, 1981; Reis et al., 2014). A origem dos cromossomos do genoma B ainda não foi identificada (Pereira et al., 2021). Para o aumento da base genética, mutações, poliploidia e hibridações interespecíficas foram importantes (Ferreira, 2006).

Com relação às características agrônômicas, o capim elefante apresenta sensibilidade a solos encharcados (McKendry, 2002a), demanda solos com alta profundidade e friáveis, que possibilitem a mecanização, além de atenção com a fertilidade dos solos, visando reposição de nutrientes, para que o estabelecimento da cultura aconteça de forma a não comprometer a produção (Lopes, 2004). Devido ao seu metabolismo C_4 , possui alta capacidade de fixar CO_2 atmosférico, sustentando uma alta produtividade, com valores de até $300 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de biomassa verde (Chaves et al., 2013).

De acordo com Lira et al. (2010), o capim elefante pode ser classificado em grupos distintos, considerando caracteres diferenciadores. Os grupos são chamados Cameroon, Napier, Mercker e Anão. O grupo Cameroon é representado por material de porte ereto com caules grossos, folhas largas e floração tardia. O grupo Napier apresenta genótipos com caules intermediários a grossos, folhas largas, touceiras mais abertas e floração intermediária. Os genótipos do grupo Mercker possuem altura reduzida com caules e folhas finas e mais numerosas. Já o grupo Anão apresenta genótipos com altura de até 1,5 m e alta relação folha/caule.

A espécie possui flores femininas e masculinas presentes na mesma inflorescência, porém, as taxas de autofecundações são baixas, pois a espécie tem autoincompatibilidade e apresenta protoginia que pode variar de seis a nove dias (Pereira et al., 2021). A metodologia mais utilizada para realização das hibridações artificiais em capim elefante consiste em proteger as inflorescências femininas com

saco de papel, antes da abertura das flores. Quando os estigmas se tornam receptivos, os grãos-de-pólen são coletados em sacos de papel para a polinização. Em seguida, os sacos são utilizados para realizar a hibridação dos genitores femininos, finalizando a polinização (Pereira e Léo, 2008). É importante identificar os cruzamentos que foram realizados. Sendo assim, é necessário escrever a identificação dos genitores femininos e masculinos, por meio de seus respectivos números, assim como a data que a polinização foi efetuada, com intuito de controlar e monitorar o período ideal para realizar a coleta das sementes (Rodrigues, 2016).

O conhecimento acerca da propagação e sistema reprodutivo de uma espécie é de extrema importância para propor e empregar estratégias adequadas de melhoramento genético. O capim elefante produz grande número de sementes que possuem boa capacidade de germinação e podem ser produzidas por meio de cruzamentos ou autofecundação, porém, por ser uma espécie alógama e alotetraploide, a autofecundação resulta em grande depressão por endogamia. Com relação ao modo de propagação, a propagação vegetativa é a mais comum e tem a vantagem de resultar em populações uniformes, mantendo a constituição genotípica dos clones (Pereira et al., 2021).

A exploração da variabilidade existente na espécie é uma grande ferramenta para os programas de melhoramento, considerando a maioria das características de importância. Rocha et al. (2017a), ao estudarem a diversidade genética de 100 acessos do Banco Ativo de Germoplasma de Capim Elefante da Embrapa, concluíram haver maior variabilidade genética com relação às características de qualidade da biomassa, comparadas às morfoagronômicas.

As estratégias mais utilizadas no melhoramento do capim elefante consistem em hibridações interespecíficas e intraespecíficas, assim como a seleção clonal (Lira et al., 2010). Para selecionar genótipos superiores, são utilizadas características como elevada produtividade, resistência a pragas (cigarrinha-das-pastagens, *Zulia entreriana*, *Deois Schach*, *Maharnarva spectabilis*), tolerância a seca, salinidade e alumínio, resistência ao pisoteio, maior teor de matéria seca e digestibilidade (Ferreira e Pereira, 2005).

Os cruzamentos interespecíficos são feitos utilizando capim elefante e o milheto (*Cenchrus americanus*), e tem intuito de aumentar o tamanho das sementes, que em capim elefante, são muito pequenas. Os híbridos gerados são estéreis ($2n = 3x = 21$) que podem ser mantidos por meio de propagação vegetativa (Pereira et al., 2021). O

restabelecimento da fertilidade é obtido pela duplicação do conjunto cromossômico e obtenção de um híbrido hexaplóide que possui baixa produção de massa seca, quando comparados com os genótipos de capim elefante e milheto, porém, são genótipos com características de grande interesse forrageiro (Barbosa et al., 2007). Além do uso como forrageira, o capim elefante vem se destacando como ótima alternativa para a produção de bioenergia.

2.2. Biomassa energética e capim elefante visando bioenergia

A crescente demanda por energia nas últimas décadas tem sido atendida pela utilização de fontes não renováveis, a exemplo dos combustíveis fósseis. As emissões de gases de efeito estufa (GEE) a partir do uso desses combustíveis contribuem para as mudanças climáticas, acarretando em efeitos irreversíveis na qualidade de vida (Bilgen et al., 2008; Omer, 2008), sendo, portanto, uma alternativa de grandes efeitos negativos.

A biomassa vegetal vem ganhando destaque como insumo para fabricação de bioenergia, sendo uma alternativa renovável e sustentável para a matriz energética (Samson et al., 2005). De acordo com Paterlini et al. (2013), a energia proveniente da biomassa é aquela adquirida por materiais vegetais e microrganismos que possuem a capacidade de bioprocessar a energia solar, assim como resquícios orgânicos de animais, que, de alguma forma, derivam destes produtos. Quando as ligações existentes entre as moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio presentes na biomassa são quebradas, são capazes de liberar sua energia química armazenada (McKendry, 2002a), podendo ser transformada em biocombustíveis que podem ser utilizados de diversas formas, como sólidos, líquidos ou gasosos, capazes de gerar bioenergia.

Para converter a energia presente na biomassa, duas tecnologias de processamento são empregadas: a termoquímica e a bioquímica ou biológica. A combustão direta é feita em um processo de conversão termoquímica enquanto a digestão (produção de biogás) e fermentação (produção de etanol de segunda geração) são consideradas processos bioquímicos (McKendry, 2002b).

A biomassa vegetal é considerada uma ótima oportunidade a longo prazo para a produzir bioenergia. É uma fonte limpa e renovável porque, no processo de combustão direta, libera uma quantidade de CO₂ que é consumida durante seu crescimento.

Dentre os recursos de energia renovável, a biomassa tem a vantagem de ser armazenada sob demanda, o que é contrário quando se leva em consideração os recursos de energia solar e eólica (Vávrová et al., 2017).

Atualmente, muitas espécies são utilizadas para produção de energia, porém, a maioria é considerada residual. Nesse sentido, os cultivos energéticos que visam a produção e o uso de matéria-prima visando bioenergia é uma alternativa complementar interessante. Florestas energéticas, como por exemplo o eucalipto, no qual a produção é dominada no Brasil, as gramíneas consideradas perenes, a exemplo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), sorgo (*Sorghum bicolor (L.) Moench*) e capim elefante (*C. purpureus*) são ótimas alternativas (Marafon et al., 2016).

Comparado com as outras gramíneas, o capim elefante é a espécie que apresenta maior potencial produtivo. Por ser uma espécie de alta eficiência fotossintética, é extremamente competente em fixar CO₂ atmosférico e converter biomassa vegetal (Taiz e Zeiger, 1998). De acordo com Lima et al. (2008), o capim elefante é capaz de produzir até 14,5 t ha⁻¹ de biomassa seca, considerando 56 dias de rebrota. A espécie também apresenta sistema radicular bem desenvolvido, o que aumenta o sequestro de carbono por meio da incorporação de matéria orgânica ao solo (Urquiaga et al., 2006). O teor de carbono presente na biomassa vegetal de capim elefante é de aproximadamente 42%, possuindo uma produção média de biomassa seca de 30 t ha⁻¹ ano⁻¹, sustentando um total de 12,6 t ha⁻¹ ano⁻¹ acumulados (Rocha, 2007).

O poder calorífico é uma característica importante em um combustível. Sua definição é em função é definido em função dos teores de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis presentes na matéria-prima, além de ser extremamente influenciado pelo grau de umidade do combustível (Marafon et al., 2016). Em pesquisas feitas por Osava (2007), para cada uma unidade de energia de origem fóssil, a biomassa seca de capim elefante é capaz de gerar 25 unidades.

O capim elefante possui o maior poder calorífico interno quando comparado ao bagaço de cana-de-açúcar seco a 50% (3.200 Kcal/kg) e a lenha de eucalipto seco à 20% (3.680 Kcal/kg) (Marafon et al., 2014). Além disso, a cana-de-açúcar é colhida uma vez ao ano, com intervalo de 12 a 16 meses. O mesmo problema acontece com o eucalipto, onde a primeira colheita é realizada com cinco a seis anos, além do tempo para o corte da rebrota, após 4 anos, aproximadamente. Segundo alguns autores, enquanto o eucalipto produz até 20 t ha⁻¹ ano⁻¹ de biomassa seca, a capacidade de

produção do capim elefante é de 30 t ha⁻¹ ano⁻¹ a 40 t ha⁻¹ ano⁻¹ (Zanetti et al., 2010; Marafon et al., 2013; Marafon et al., 2014; Pereira et al., 2021).

O objetivo do melhoramento da cana-de-açúcar para fins bioenergéticos, em especial para combustão, é de cultivares que tenham 65% de água, 30% de fibras, e 5% de açúcar. Entretanto, esta não é a realidade verificada. As cultivares contêm aproximadamente 12% de fibra, 75% de água e 13% de açúcar (Tew e Cobill, 2009). Em um estudo feito por Rocha et al. (2017b), onde estudaram ecótipos de capim elefante visando produção de bioenergia pela combustão direta da biomassa, eles puderam observar um valor de 59% de água na biomassa, evidenciando o potencial do capim elefante para uso bioenergético.

Existem diversas finalidades energéticas para a biomassa do capim elefante. Quando a biomassa é utilizada para o processo de combustão direta, é esperado que tenha altos valores de celulose e lignina, alto poder calorífico, alta relação carbono/nitrogênio, além de baixos teores de umidade, nitrogênio e cinzas (McKendry, 2002a; Long et al., 2006; Gani e Naruse, 2007; Jaradat, 2010). Por necessitar de grandes volumes, esse processo poderia ser melhor manejado pelo adensamento da biomassa em forma de peletes ou briquetes (Marafon et al., 2013). O adensamento por meio de peletes ou briquetes facilita o transporte, manuseio e armazenamento, não requerem queima especial, produzem baixa quantidade de fumaça e sua queima completa é feita sem muitos resíduos (Moraes et al., 2017).

Ao estudarem a composição química e o valor calorífico de 18 variedades de capim elefante e outras dez potenciais fontes de bioenergia para combustão direta, Marafon et al. (2021) concluíram que as variedades de capim elefante diferiram das outras matérias-primas em pelo menos um dos atributos de qualidade de bioenergia que foram avaliados (composição elementar, menor valor de aquecimento, celulose, hemicelulose, lignina e conteúdo de cinzas).

Estudando a aptidão dos grupos Cameroon e Napier visando produção de bioenergia por meio da combustão direta, Rocha et al. (2017b) sugeriram que o grupo Cameroon apresenta maior aptidão quando comparado com o Napier e que, o melhoramento de características morfoagronômicas dentro do grupo Cameroon é recomendado.

Uma outra finalidade é a produção de etanol celulósico. Para isso, é esperado que a biomassa apresente alta relação celulose/lignina e alto teor de hemicelulose (McKendry, 2002a). Em um estudo feito por Campos et al. (2019), foi possível concluir

que o capim elefante é uma matéria-prima promissora para a produção de etanol de segunda geração, devido às concentrações de etanol serem superiores aos alcançados por outras biomassas lignocelulósicas.

A biomassa de gramíneas com alto teor de lignina e celulose requer menos insumos e possui maior rendimento energético e menor emissão de GEE quando comparadas com biocombustíveis de culturas anuais como o milho (Adler et al., 2007). Culturas energéticas com significativa produção de biomassa podem ser ideais para tornar o biocombustível economicamente competitivo quando comparado com os fósseis (Sahoo e Mani, 2015; Sahoo et al., 2018).

Outra forma de utilização da biomassa para fins energéticos é o biogás, onde os principais compostos são metano e dióxido de carbono. Neste caso, a biomassa é convertida por bactérias em um ambiente anaeróbio, produzindo um gás que contém energia com cerca de 20-40% menor valor de aquecimento. Para produção de biogás é esperado que a biomassa contenha alta relação celulose/lignina e alta digestibilidade *in vitro* da biomassa seca (McKendry, 2002a; Hendriks e Zeeman, 2009). O biogás é uma tecnologia comprovada e muito utilizada para tratar resíduos orgânicos que possuem alto teor de umidade. Pode ser utilizado como combustível para motores a gás de ignição por centelha e turbinas a gás e pode se tornar de maior qualidade com a retirada do CO₂ (McKendry, 2002a).

Recentemente, a empresa Petrus Bio-Energy do Brasil, entrou com o pedido de licença ambiental para a construção de uma usina para produção de biometano no Rio Grande do Sul. A proposta é produzir energia limpa e sustentável a partir da biomassa do capim elefante. A usina terá 48 biodigestores, cada um com 30 metros de diâmetro e oito metros de altura. A empresa pretende utilizar nove unidades para produção da própria eletricidade e o restante será utilizado para a produção de biogás (Guerra, 2022).

2.3. Análise dialéctica

Escolher os genitores que irão representar o bloco de cruzamentos é uma das principais etapas de um programa de melhoramento genético, uma vez que será o ponto inicial para obtenção de cultivares superiores. Um dos métodos mais utilizados

nos programas de melhoramento que visam a exploração de heterose é o estabelecimento dos cruzamentos em esquemas dialélicos.

Os esquemas dialélicos tem como definição p^2 possíveis combinações que envolvem os progenitores selecionados, gerando um total de $p(p-1)/2$ híbridos e o mesmo número de recíprocos, sendo apresentados em uma tabela dialélica (Griffing, 1956). A tabela dialélica pode ser utilizada de quatro formas distintas: a tabela completa, onde são apresentadas todas as possíveis combinações híbridas, recíprocos e os progenitores; a meia tabela simples, apresentando apenas as combinações híbridas; a tabela completa, apresentando os híbridos e recíprocos, porém, sem os progenitores; e a meia tabela, sendo representada pelos híbridos e genitores, excluindo os recíprocos. A avaliação dos recíprocos tem como finalidade estudar os efeitos maternos envolvidos no controle da característica (Cruz et al., 2012).

O esquema de dialelos é utilizado em uma imensa gama de espécies e possibilita a obtenção de informações genéticas, além de explorar a variabilidade existente. De acordo com Cabral et al. (2015), as combinações híbridas são responsáveis pelo aumento da frequência de alelos favoráveis, ampliando as chances de selecionar genótipos superiores.

Os métodos mais utilizados são os propostos por Griffing (1956), Gardner e Eberhart (1966) e o de Hayman (1954). O dialelo proposto por Griffing (1956) é capaz de fornecer parâmetros como capacidade específica de combinação (CEC) e capacidade geral de combinação (CGC). O dialelo de Gardner e Eberhart (1966) permite avaliar a heterose varietal e efeitos de variedade. Já o de Hayman (1954) é capaz de fornecer informações relacionadas aos mecanismos básicos, a herança das características, limite de seleção e os valores genéticos.

Um passo importante para os programas de melhoramento é avaliar o potencial de determinado parental para a futura população base. O dialelo proposto por Griffing (1956) fornece parâmetros que são extremamente importantes. As capacidades de combinação são diferenciadas de acordo com a natureza da ação gênica envolvida. A capacidade específica de combinação leva em consideração o desempenho médio dos genitores envolvidos em determinado cruzamento, indicando a possibilidade de gerar híbridos inferiores ou superiores. De acordo com Sprague e Tatum (1942), a capacidade específica de combinação está ligada aos efeitos de dominância e efeitos epistáticos. A capacidade geral de combinação corresponde ao comportamento médio

do progenitor nos cruzamentos e está relacionada com a ação aditiva dos genes (Cruz et al., 2012).

Quando as estimativas da capacidade geral de combinação são significativas, é possível concluir que os progenitores se diferem em relação à capacidade de transmitir seus alelos favoráveis, existindo uma superioridade deste progenitor. O contrário é válido para estimativas não significativas. Aqueles progenitores que não se diferem da média geral possuem valores estimados de capacidade geral de combinação próximas de zero (Cruz et al., 2012).

Com relação à capacidade específica de combinação, estimativas significativas representam heterogeneidade dos cruzamentos, apresentando valores que se diferem do esperado quando se compara com a capacidade geral de combinação dos pais envolvidos no cruzamento (Cruz et al., 2012).

Em programas de melhoramento, o conhecimento destas capacidades de combinação é capaz de auxiliar na tomada de decisão para a escolha de genitores geneticamente divergentes, sobretudo quando se deseja identificar híbridos promissores ou desenvolver genótipos superiores (Marchesan, 2008; Ramalho et al., 1993).

Estudos feitos por Sinche et al. (2021) indicaram promissores resultados para exploração de vigor híbrido em capim elefante, onde 50% dos híbridos avaliados se mostraram mais produtivos que os pais e obtiveram uma produção anual de biomassa de até 52% de aumento em relação ao pai de maior rendimento.

Porém, quando os cruzamentos dialélicos são aplicados com um número reduzido de cruzamentos e genitores, os efeitos da capacidade geral e específica de combinação ficam sujeitos a uma maior variação residual. Em contrapartida, quando um grande número de pais é utilizado, a alta demanda por mão de obra e recursos financeiros e espaciais torna o dialelo impraticável. Pensando em resolver este problema, Resende (2002) sugeriu a utilização de modelos mistos para avaliar cruzamentos dialélicos geneticamente ou estatisticamente desbalanceados.

2.4. Modelos mistos

Em um modelo estatístico os efeitos são considerados aleatórios ou fixos e dependem da natureza amostral a ser estudada. Quando um modelo é considerado

de natureza fixa, o interesse do melhorista é estimar as médias fenotípicas e fazer um ranqueamento e seleção, sendo assim, as conclusões feitas não podem ser generalizadas, ou seja, são referentes aos genótipos estudados (Eisenhart, 1974). Quando o modelo é considerado aleatório, os níveis devem ser amostras da população a ser estudada permitindo a estimação dos componentes de variância genética, possibilitando estudos mais amplos. Além desses, existem os modelos que contém, além da média e do erro, efeitos aleatórios e fixos em um mesmo modelo, e são chamados de modelos mistos (Fritsche-Neto et al., 2010).

Para a obtenção de sucesso no melhoramento genético, a escolha de delineamentos experimentais e genéticos é de suma importância, além da escolha de procedimentos para seleção que serão capazes de explorar as propriedades favoráveis de cada delineamento. Ao considerar plantas perenes, a ocorrência de experimentos desbalanceados é comum, o que acaba acarretando em estimativas equivocadas dos componentes de variância ao utilizar métodos tradicionais, a exemplo da análise de variância (ANOVA). Para que o ganho genético seja mais expressivo, a metodologia REML/BLUP é uma alternativa que garante estimativas não tendenciosas dos parâmetros, sendo capaz de ordenar e avaliar os genótipos com precisão (Viana e Rezende, 2014).

Proposto por Patterson e Thompson (1971), a metodologia REML (Restricted Maximum Likelihood) é capaz de estimar os componentes de variância e possui algumas características positivas quando comparada a outros métodos, a exemplo da análise de variância (ANOVA), podendo citar a não negatividade e imposição de restrições (Duarte, 1996; Resende, 2007).

O BLUP (Best Linear Unbiased Prediction) foi proposto por Henderson (1975) e é uma metodologia aplicada para prever efeitos aleatórios, capaz de ajustar os dados aos efeitos fixos e ao número desbalanceado de informações. É capaz de maximizar a acurácia seletiva, demonstrando sua superioridade quando são considerados dados desbalanceados (Resende, 2002). Porém, para que o BLUP seja aplicado corretamente, é necessário que os componentes de variância e os parâmetros genéticos sejam estimados. A estimação é feita utilizando a metodologia da máxima verossimilhança restrita (REML), e são capazes de interagir com as equações do BLUP (Viana e Resende, 2014). Desta forma, a metodologia conhecida como REML/BLUP, ou modelos mistos, é capaz de estimar os componentes de variância, parâmetros genéticos e valores genotípicos, concomitantemente.

De acordo com estudos feitos por Pandolfi Filho et al. (2016), os ganhos com seleção podem ser facilmente obtidos com o BLUP dos indivíduos, pois são capazes de denotar a estimação dos valores genotípicos, ou seja, valores que já foram ajustados com base nos efeitos ambientais. Maia et al. (2014) afirmam que a chance de ganhos genéticos aumenta consideravelmente quando os cruzamentos são realizados com indivíduos geneticamente distantes e divergentes ou que apresentam superioridade *per se* para a característica estudada, o que acaba por favorecer populações segregantes superiores por meio de complementariedade gênica superior.

Viana et al. (2010), demonstraram maior eficiência e precisão do BLUP ao selecionar famílias de meio-irmãos de milho quando comparado com a metodologia BLUE/ANOVA. A superioridade do BLUP dependeu das estimativas dos parâmetros genéticos, em especial, às correlações ambientais e genéticas dos caracteres.

Entre as diversas vantagens da metodologia REML/BLUP, é possível citar: correção dos dados com base nos efeitos do ambiente; estimação dos parâmetros genéticos e predição de valores genéticos; fornecimento de resultados sem viés; maximização dos ganhos genéticos e eficiência dos programas de melhoramento; utilização de dados desbalanceados com elevado número de informações; além de permitir comparar indivíduos no tempo e espaço, estudando estruturas com alto grau de complexidade experimental e heterogeneidade de variâncias (Resende, 2002; Viana e Resende, 2014).

Como já mencionado, por ser uma planta perene, o capim elefante passa por vários cortes ao longo de sua vida. Quando as avaliações são realizadas em uma mesma unidade experimental, é considerada a existência de uma semelhança entre as avaliações, sendo considerada de efeito ambiental ou algum acontecimento que afetará o indivíduo permanentemente. Sendo assim, assume-se a existência de covariância entre as avaliações, sendo considerada de natureza não genética (Mrode, 2014). Desta maneira, a metodologia de modelos mistos auxiliará na escolha dos melhores indivíduos, assim como as melhores combinações híbridas.

É importante frisar que a eficiência de seleção de um programa de melhoramento pode ser aumentada com o emprego de modelos genético-estatísticos que irão representar os dados de forma mais real. A utilização de modelagem de estruturas de variância-covariância (VCOV) genética e residual pode aumentar a acurácia do

modelo, levando à obtenção de estimativas mais precisas do valor genotípico, aumentando a eficiência de seleção (Melo et al., 2020; Krause et al., 2020).

3. MATERIAL E MÉTODOS

No desenvolvimento deste trabalho, onze genitores de capim elefante foram selecionados, sendo quatro cultivares (Pioneiro, BRS Kurumi, BRS Canará e BRS Capiaçú) e três clones (CNPGL 91-06-3, CNPGL 96-27-3 e CNPGL 92-38-2) oriundos do programa de melhoramento da Embrapa e quatro acessos provenientes do Banco Ativo de Germoplasma de Capim Elefante (BAGCE 21, BAGCE 30, BAGCE 37, BAGCE 38) da Embrapa.

Foram realizadas hibridações artificiais entre os 11 genitores selecionados em esquema de dialelo completo, obtendo-se 55 combinações híbridas. As sementes oriundas destes cruzamentos foram semeadas dia 18/10/2012 em bandejas de isopor contendo 128 células preenchidas com substrato florestal. As mudas foram transplantadas para o campo com 21 dias após a emergência. Foi realizado um corte de uniformização do experimento dia 29/04/2014.

O experimento para a avaliação destes híbridos foi conduzido no campo experimental da Embrapa Gado de Leite localizado no município de Coronel Pacheco, Minas Gerais, Brasil, coordenadas 21° 33' 58" S e 43° 15' 21" W, sob o delineamento de blocos completos casualizados com três repetições. Cada parcela foi constituída de uma linha de 5 m, com espaçamento de 0,5 m entre plantas e 1,5 m entre parcelas. Os tratos culturais e cortes seguiram as recomendações para o cultivo de capim elefante (Lira et al., 2010), com frequência de cortes indicada para o uso bioenergético da cultura.

Foram realizados dois cortes para a avaliação das características, sendo o primeiro dia 02/06/2015 e o segundo dia 03/05/2016. As características mensuradas foram: i) produção de biomassa seca (BS), em que a massa de biomassa fresca por parcela (kg parcela^{-1}) foi obtido colhendo-se uma seção de 4 metros do meio de cada parcela. As amostras foram coletadas manualmente e pesadas. Três perfilhos completos de cada parcela foram selecionados aleatoriamente e pesados para obtenção da biomassa fresca (g). Essas amostras foram secas em estufas a 56°C até atingir peso constante, e então, a biomassa seca (BS, em %) foi calculada. A produção de biomassa seca total (t ha^{-1}) foi então quantificada conforme descrito por Rocha et

al. (2017a). ii) digestibilidade *in vitro* da matéria seca (DIVBS) e iii) relação celulose/lignina (REL CEL/LIG), onde amostras aleatórias de três plantas foram coletadas de cada parcela antes do corte. Essas amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 56°C por 72h. Após a secagem as amostras foram moídas em pequenas partículas (1mm) em um moinho tipo Wiley e analisadas. A quantificação da DIVBS, celulose e lignina foi feita por espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS), após calibração conforme relatado por Rocha et al. (2019). O resultado final foi dado em porcentagem.

Primeiramente, os dados referentes a cada características, foram submetidos às análises dialéticas individuais por corte. As capacidades gerais e específicas de combinação foram estimadas pela metodologia de modelos mistos conforme o seguinte modelo:

$$y = \mu \mathbf{1} + X\mathbf{b} + Z_1\mathbf{g} + Z_2\mathbf{s} + \varepsilon$$

Onde:

y é o vetor das observações fenotípicas;

μ é a constante;

\mathbf{b} é o vetor de blocos, considerado como fixo;

\mathbf{g} é o vetor da capacidade geral de combinação (CGC), considerado como aleatório, com $\mathbf{g} \sim \text{NID}(0, \sigma_g^2 I_g)$;

\mathbf{s} é o vetor da capacidade específica de combinação (CEC), considerado como aleatório, com $\mathbf{s} \sim \text{NID}(0, \sigma_s^2 I_s)$;

ε é o vetor dos resíduos, considerado como aleatório, com $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma_e^2 I_e)$;

\mathbf{X} , \mathbf{Z}_1 e \mathbf{Z}_2 representam as matrizes de incidência para os efeitos de blocos, CGC e CEC, respectivamente.

A análise dialética conjunta dos cortes, para cada característica, foi feita assumindo o seguinte modelo:

$$y = \mu \mathbf{1} + X_1\mathbf{c} + X_2\mathbf{b} + X_3\mathbf{cxb} + Z_1\mathbf{g} + Z_2\mathbf{s} + Z_3\mathbf{gxc} + Z_4\mathbf{sxc} + Z_5\mathbf{perm} + \varepsilon$$

Onde:

y é o vetor de observações fenotípicas;

μ é a constante;

\mathbf{c} é o vetor dos cortes, considerado como fixo;

b é o vetor de blocos, considerado como fixo;

cxb é o vetor da interação corte x blocos, considerado como fixo;

g é o vetor da capacidade geral de combinação (CGC), considerado como aleatório, com $g \sim \text{NMV}(0, \sigma_g^2 I_g)$;

s é o vetor da capacidade específica de combinação (CEC), considerado como aleatório, com $s \sim \text{NMV}(0, \sigma_s^2 I_s)$;

gxc é o vetor da interação entre capacidade geral de combinação e cortes, considerado como aleatório, com $gxc \sim \text{NMV}(0, \sigma_{gxc}^2 I_{gxc})$;

sxc é o vetor da interação entre capacidade específica de combinação e cortes, considerado como aleatório, com $sxc \sim \text{NMV}(0, \sigma_{sxc}^2 I_{sxc})$;

perm é o vetor do efeito permanente, ou seja, o efeito de parcelas, considerado como aleatório, com $perm \sim \text{NMV}(0, \sigma_{perm}^2 I_{perm})$;

ε é o vetor dos resíduos, considerado como aleatório, com $\varepsilon \sim \text{NMV}(0, D_{ei} \otimes I_{ni})$;

D_e é a matriz diagonal c x c da matriz VCOV, em que cada corte (ci) tem um componente de variância específico e independente para os efeitos das repetições dentro dos conjuntos e para os resíduos, respectivamente.

X₁, X₂, X₃, Z₁, Z₂, Z₃, Z₄ e Z₅ representam a matriz de incidência para os respectivos efeitos.

A significância de cada efeito aleatório dos modelos estatísticos foi avaliada pelo Teste de Razão de Verossimilhança (LRT) (Wilks, 1938), utilizando a estatística de Qui-Quadrado, com 1 grau de liberdade e 0,05 de probabilidade.

O cálculo da acurácia foi feito levando em consideração os híbridos. Utilizando, desta maneira, a seguinte fórmula:

$$r\hat{g}g = \sqrt{1 - \frac{PEV}{\hat{\sigma}_g^2}}$$

Onde:

$r\hat{g}g$ é a acurácia;

PEV é a variância do erro predito; e

$\hat{\sigma}_g^2$ é a variância genética dos híbridos.

Já para calcular o coeficiente de variação (CV%), foi utilizado a seguinte fórmula:

$$CV\% = \frac{\sqrt{\hat{\sigma}_e^2}}{\bar{X}} \times 100$$

Onde:

$\hat{\sigma}_e^2$ é a variância do erro experimental; e

\bar{X} é a média fenotípica.

A média fenotípica foi calculada utilizando a seguinte fórmula:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Onde:

X_i é o valor de cada observação; e

n é o número de observações.

Para garantir uma distribuição gaussiana para os resíduos, os outliers foram detectados e removidos com base nos resíduos usando o teste de Bonferroni-Holm ($\alpha = 0,05$) conforme descrito em Bernal-Vasquez et al. (2016). Entre os 330 resíduos, 1 foi considerado outlier. Todas as análises foram realizadas pelo programa Asreml-R versão 4 (Butler et al, 2018).

4. RESULTADOS

Os coeficientes de variação experimental (CV%) apresentaram estimativas variando de 5,67% para a característica DIVBS no corte 2 a 27,41% para BS no corte 1 (Tabela 1). Estes resultados indicam boa precisão do experimento de campo e estão próximos aos valores de CV% relatados por outros autores em experimentos com capim elefante (Habte et al., 2020; Souza, 2014).

Observou-se significância do efeito de CGC apenas para DIVBS e REL CEL/LIG no corte 2. O efeito de CEC também foi significativo apenas para a característica BS, tanto no corte 1 quanto no 2 (Tabela 1). Estes resultados indicam predominância de genes com efeito aditivo no controle dos caracteres DIVBS e REL CEL/LIG e que para a característica BS os genitores envolvidos no dialelo apresentam frequência de alelos favoráveis próximas, porém, divergentes entre si, ou seja, para esta característica é possível obter êxito na seleção de híbridos superiores.

As estimativas de acurácia seletiva dos híbridos (r_{gg}) também variaram entre os cortes (Tabela 1). Para BS no corte 1, a acurácia foi de 0,5427, enquanto que no corte 2 foi de 0,8071. Elevada variação também foi observada para a característica REL CEL/LIG, com valores de 0,2415 e 0,6972 nos cortes 1 e 2, respectivamente. Já para a característica DIVBS, as estimativas foram mais próximas com valores de 0,5468 no corte 1 e 0,4349 no corte 2 (Tabela 1). Estes resultados corroboram a chance de maior êxito na seleção de híbridos superiores quanto à característica BS.

Tabela 1. Resumo das análises dialélicas individuais de dois cortes (C1 e C2), médias fenotípicas, coeficientes de variação experimental (CV%) e acurácia seletiva (r_{gg}) referentes às características BS, DIVBS e REL CEL/LIG avaliadas em 55 combinações híbridas, oriundas de 11 clones de capim elefante, visando produção de bioenergia

Efeitos	Características					
	BS (t ha ⁻¹)		DIVBS (%)		REL CEL/LIG (%)	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
CGC	1,0518	0,0000	1,3239	0,5433*	0,0059	0,0167*
CEC	5,2542*	23,3627*	0,0000	0,0000	0,0000	0,0188
Erro	29,2309	34,9868	11,4280	5,0500	0,2015	0,1420
Média	24,02	21,58	37,42	39,65	4,60	4,85
CV%	22,50	27,41	9,03	5,67	9,75	7,76
r_{gg}	0,5427	0,8071	0,5468	0,4349	0,2415	0,6972

* significativo pelo teste LRT a 5% de probabilidade.

CGC: capacidade geral de combinação, CEC: capacidade específica de combinação, C1: corte 1, C2: corte 2, BS: produção de biomassa seca, DIVBS: digestibilidade in vitro da biomassa seca e REL CEL/LIG: relação celulose/lignina.

Com base na análise dialélica conjunta para os dois cortes (Tabela 2), observou-se efeito significativo da interação apenas para o efeito da CEC X Corte em relação à característica BS. Da mesma forma que nas análises individuais para corte, observou-se apenas efeito significativo de CEC para BS e CGC para DIVBS e REL CEL/LIG. Também a 5% de probabilidade pelo teste LRT (Tabela 2), observou-se significância para o efeito permanente de meio apenas para a característica BS (Tabela 2).

Também com base na análise dialélica conjunta dos cortes, observou-se predominância de genes com efeitos aditivos envolvidos no controle dos caracteres relacionados à qualidade da biomassa (DIVBS e REL CEL/LIG) e que para BS os genitores envolvidos no dialelo apresentam frequências de alelos favoráveis próximas, porém, complementares.

As estimativas de acurácia foram de 0,6192, 0,7116 e de 0,6604 para os caracteres BS, DIVBS e REL CEL/LIG, respectivamente (Tabela 2). Estes resultados indicam estimativas de acurácia de magnitude moderada para BS e REL CEL/LIG e alta magnitude para DIVBS (Resende e Alves, 2020).

Tabela 2. Resumo da análise dialélica conjunta dos cortes, médias fenotípicas e acurácia (r^2) referentes às características BS, DIVBS e REL CEL/LIG avaliadas em 55 combinações híbridas, oriundas de 11 clones de capim elefante, visando produção de bioenergia

Efeitos	Características		
	BS (t ha ⁻¹)	DIVBS (%)	REL CEL/LIG (%)
CGC	0,0000	0,7234*	0,0072*
CEC	8,0174*	0,0000	0,0124
Permanente	8,6856*	0,0000	0,0220
CGC x Corte	0,0000	0,0459	0,0044
CEC x Corte	6,2323*	0,0000	0,0000
Erro corte 1	18,7521	11,6319	0,1692
Erro corte 2	29,3099	5,0139	0,1250
Média	22,88	38,54	4,73
r^2	0,6192	0,7116	0,6604

* significativo pelo teste LRT a 5% de probabilidade.

CGC: capacidade geral de combinação, CEC: capacidade específica de combinação, BS: produção de biomassa seca, DIVBS: digestibilidade in vitro da biomassa seca e REL CEL/LIG: relação celulose/lignina.

Na tabela 3 são apresentadas as estimativas dos efeitos de capacidade geral de combinação (g_i) para cada um dos genitores em relação às três características avaliadas, além dos erros associados aos efeitos. É válido lembrar que apenas para DIVBS e REL CEL/LIG o efeito da CGC foi significativo pelo teste de LRT (likelihood ratio test) a 5% de probabilidade (Tabela 2).

Observou-se que quatro genitores apresentaram estimativas positivas de CGC para DIVBS, variando de 0,0695 a 1,4385 e sete estimativas negativas, variando de -0,9279 a -0,1571 (Tabela 3). Resultados similares foram obtidos para REL CEL/LIG, em que sete genitores apresentaram valores negativos, variando de -0,1021 a -0,0075 e quatro genótipos apresentaram valores positivos, variando de 0,1188 a 0,0124 (Tabela 3).

Os genitores que se destacaram para produção de biogás e etanol de segunda geração foram: BAGCE 38 e CNPGL 92-38-2, por possuírem valores

Tabela 3. Estimativas dos efeitos médios da capacidade geral de combinação (g_i) e erro padrão associado a cada característica dos 11 genitores de capim elefante resultantes de cruzamentos dialélicos completos

Genitores	Características		
	BS (t ha ⁻¹)	DIVBS (%)	REL CEL/LIG (%)
BAGCE 21	13,7233 x 10 ⁻⁷	-0,6077	-0,0140
BAGCE 30	-0,3350 x 10 ⁻⁷	-0,4912	0,0147
BAGCE 37	-7,5794 x 10 ⁻⁷	-0,4436	-0,0075
BAGCE 38	-6,4654 x 10 ⁻⁷	1,4385	0,1188
Pioneiro	2,5623 x 10 ⁻⁷	-0,4974	0,0124
CNPGL 91-06-3	-1,1442 x 10 ⁻⁷	-0,1571	-0,0078
BRS Kurumi	-5,2626 x 10 ⁻⁷	1,2635	-0,0253
BRS Canará	4,5424 x 10 ⁻⁷	-0,9279	-0,1021
BRS Capiaçú	1,1135 x 10 ⁻⁷	-0,1881	-0,0470
CNPGL 96-27-3	-2,5835 x 10 ⁻⁷	0,0695	-0,0300
CNPGL 92-38-2	1,4286 x 10 ⁻⁷	0,5416	0,0880

BS: produção de biomassa seca, DIVBS: digestibilidade in vitro da biomassa seca e REL CEL/LIG: relação celulose/lignina.

positivos de DIVBS e REL CEL/LIG. Já para combustão direta, BRS Canará, BRS Capiaçú, CNPGL 96-27-3 entre outros, merecem destaque pois apresentam baixos valores de REL CEL/LIG.

Na Tabela 4 são apresentados os efeitos da capacidade específica de combinação (S_{ij}) para as características avaliadas, além dos erros associados aos efeitos. É válido lembrar que apenas BS foi significativo para a CEC pelo teste de LRT (likelihood ratio test) a 5% de probabilidade (Tabela 2).

A maioria das combinações híbridas apresentou estimativas positivas (30 combinações) para BS, com valores variando de 0,0636 e 4,2974 (Tabela 3). Os híbridos oriundos dos cruzamentos BAGCE 21 x BAGCE 38, BAGCE 30 x CNPGL-92-38-2 e BAGCE 38 x BRS Kurumi merecem destaque pelas maiores estimativas de S_{ij} .

Tabela 4. Estimativas dos efeitos médios da capacidade específica de combinação (S_{ij}) e o erro padrão associado a cada característica dos 55 híbridos de capim elefante resultantes de cruzamentos dialélicos completos.

Híbridos	Características		
	BS (t ha ⁻¹)	DIVBS (%)	REL CEL/LIG (%)
BAGCE 21 x BAGCE 30	1,9208	2,5860	0,0679
BAGCE 21 x BAGCE 37	0,6016	-4,9274	-0,0876
BAGCE 21 x BAGCE 38	4,2974	2,2609	-0,0182
BAGCE 21 x Pioneiro	1,4608	-2,7655	-0,0091
BAGCE 21 x CNPGL-91-6-3	2,1833	-1,5056	-0,0841
BAGCE 21 x BRS Kurumi	-5,2866	2,2268	0,0007
BAGCE 21 x BRS Canará	2,1156	6,9680	0,0086
BAGCE 21 x BRS Capiaçú	1,1675	2,7667	0,1271
BAGCE 21 x CNPGL-96-27-3	1,2103	-1,1796	-0,0127
BAGCE 21 x CNPGL-92-38-2	2,1716	-1,2263	-0,0166
BAGCE 30 x BAGCE 37	-0,8124	-8,6317	-0,0321
BAGCE 30 x BAGCE 38	0,5618	2,8717	0,1649
BAGCE 30 x Pioneiro	-3,2341	-8,4224	-0,0269
BAGCE 30 x CNPGL-91-6-3	1,1452	-2,6295	0,0518
BAGCE 30 x BRS Kurumi	1,0594	-2,5954	-0,0278
BAGCE 30 x BRS Canará	-2,1867	-2,3821	-0,0672
BAGCE 30 x BRS Capiaçú	1,4348	4,1014	-0,0433
BAGCE 30 x CNPGL-96-27-3	-2,8520	3,9856	0,0096
BAGCE 30 x CNPGL-92-38-2	2,6740	-2,1658	-0,0716
BAGCE 37 x BAGCE 38	-2,0878	-4,1356	-0,0750
BAGCE 37 x Pioneiro	-0,4921	3,0923	0,0741
BAGCE 37 x CNPGL-91-6-3	-3,5519	3,0409	0,1100
BAGCE 37 x BRS Kurumi	-1,0723	1,2817	-0,0249
BAGCE 37 x BRS Canará	2,3975	1,2870	0,0101
BAGCE 37 x BRS Capiaçú	0,8363	-1,3897	-0,0050
BAGCE 37 x CNPGL-96-27-3	-1,0145	-1,0733	0,0078
BAGCE 37 x CNPGL-92-38-2	-1,3448	2,0025	0,0098
BAGCE 38 x Pioneiro	-2,5160	-8,1631	-0,0322
BAGCE 38 x CNPGL-91-6-3	-2,4603	1,0351	0,0573
BAGCE 38 x BRS Kurumi	2,4332	1,2756	-0,0387
BAGCE 38 x BRS Canará	-1,0946	-8,8059	-0,0795
BAGCE 38 x BRS Capiaçú	-2,8211	-2,8210	0,0436

BAGCE 38 x CNPGL-96-27-3	-0,2874	1,2676	0,0511
BAGCE 38 x CNPGL-92-38-2	-3,8687	1,3685	0,1301
Pioneiro x CNPGL-91-6-3	1,3200	-6,3376	0,0058
Pioneiro x BRS Kurumi	0,6209	1,2243	0,0189
Pioneiro x BRS Canará	0,7427	2,1121	-0,0262
Pioneiro x BRS Capiaçú	1,2311	1,4029	0,0234
Pioneiro x CNPGL-96-27-3	-1,2942	-2,8439	-0,0297
Pioneiro x CNPGL-92-38-2	2,1075	-1,5752	0,0231
CNPGL 91-06-3 x BRS Kurumi	-1,5258	8,6258	0,0061
CNPGL 91-06-3 x BRS Canará	-0,5073	-6,8784	-0,0401
CNPGL 91-06-3 x BRS Capiaçú	-0,3906	-1,6494	-0,0711
CNPGL 91-06-3 x CNPGL-96-27-3	2,2119	-1,1261	-0,0376
CNPGL 91-06-3 x CNPGL-92-38-2	0,8801	2,7738	-0,0115
BRS Kurumi x BRS Canará	1,0354	5,4674	0,0288
BRS Kurumi x BRS Capiaçú	0,0997	-2,1185	-0,0034
BRS Kurumi x CNPGL-96-27-3	-0,4585	-1,3482	-0,0250
BRS Kurumi x CNPGL-92-38-2	-1,4468	1,7073	0,0219
BRS Canará x BRS Capiaçú	0,1703	1,2238	-0,0386
BRS Canará x CNPGL-96-27-3	0,4195	-6,0156	0,0081
BRS Canará x CNPGL-92-38-2	0,8274	-2,9160	0,0214
BRS Capiaçú x CNPGL-96-27-3	-0,2281	-2,0577	-0,0900
BRS Capiaçú x CNPGL-92-38-2	-0,5390	-1,1094	-0,0230
CNPGL-96-27-3 x CNPGL-92-38-2	0,0636	2,9321	0,0670

BS: produção de biomassa seca, DIVBS: digestibilidade in vitro da biomassa seca e REL CEL/LIG: relação celulose/lignina.

5. DISCUSSÃO

As estimativas de parâmetros genéticos de uma população auxiliam na escolha das estratégias de melhoramento mais adequadas a serem empregadas visando obter êxito com a seleção.

De maneira geral, os valores genéticos preditos se diferem dos verdadeiros. A acurácia ($r_{\hat{g}g}$) é uma estatística que indica a proximidade dos valores preditos e reais (Van Vleck et al., 1987). De acordo com Resende e Alves (2020), as estimativas de acurácia podem ser classificadas em muito altas, quando os valores de $r_{\hat{g}g}$ forem superiores a 0,90; de alta magnitude para valores de $r_{\hat{g}g}$ entre 0,70 e 0,90; para valores de $r_{\hat{g}g}$ entre 0,40 e 0,70 a acurácia é classificada como de magnitude moderada e de baixa magnitude para valores de $r_{\hat{g}g}$ entre 0,10 e 0,40 e muito baixa

para valores abaixo de 0,10. Assim, de acordo a classificação proposta por Resende e Alves (2020), as características BS e REL CEL/LIG apresentam estimativas de acurácia de magnitude moderada, cujos valores foram de 0,6192 e 0,6604, respectivamente, e a característica DIVBS, com estimativa de acurácia 0,7116, de alta magnitude (Tabela 2).

Ressalta-se que as estimativas de acurácia apresentadas neste trabalho foram baseadas na variância genotípica entre média dos híbridos avaliados, ou seja, considerou-se em conjunto a variância aditiva e a de dominância. Como para BS apenas o efeito de CEC foi significativo (Tabela 2), a estimativa de acurácia apresentada para esta característica (0,61) representa a confiabilidade na seleção dos híbridos de maior potencial. Já para os caracteres DIVBS e REL CEL/LIG, em que apenas o efeito de CGC foi significativo, as estimativas de acurácia representam a confiabilidade na seleção dos genitores envolvidos na análise dialélica, visando melhoria destes caracteres.

É importante frisar que a eficiência de seleção de um programa de melhoramento pode ser aumentada com o emprego de modelos genético-estatísticos que irão representar os dados de forma mais real. A utilização de modelagem de estruturas de variância-covariância (VCOV) genética e residual pode aumentar a acurácia do modelo, levando à obtenção de estimativas mais precisas do valor genotípico, aumentando a eficiência de seleção (Melo et al., 2020; Krause et al., 2020).

A partição da variância genotípica entre híbridos nas frações devidas à CGC e CEC são também particularmente importantes. Quando a característica apresenta significância para os efeitos de CEC, como para BS (Tabelas 1 e 2), pode-se inferir que métodos que priorizem a capitalização da heterose devem ser preferidos. Além disso, para esta característica o efeito de CGC foi não significativo, indicando que os genitores envolvidos no dialelo possuem frequências de alelos favoráveis, envolvidos no controle desta característica, semelhantes. Nesta situação a seleção dos híbridos de maior potencial em comparação aos demais é uma estratégia que não deve ser descartada.

Ao estudarem o desenvolvimento e caracterização de uma população de mapeamento de capim elefante para características relacionadas ao tempo de floração e produção de biomassa, Sinche et al. (2021) encontraram resultados promissores de exploração de vigor híbrido, onde 50% dos híbridos avaliados se

mostraram mais produtivos que os pais e obtiveram uma produção anual de biomassa de até 52% de aumento em relação ao pai de maior rendimento.

Quando para uma característica o efeito de CGC apresenta-se significativo e o de CEC não significativo, a exemplo de DIVBS e REL CEL/LIG neste trabalho (Tabelas 1 e 2), pode-se inferir que os genes envolvidos no controle desta característica apresentam efeito aditivo em predominância. Nesta situação, infere-se, portanto, que os parentais não apresentam uma complementação gênica que seja favorável com relação à frequência de alelos que apresentam dominância (Vencovsky e Barriga, 1992). Entretanto, isto não quer dizer que os genitores não sejam complementares em relação aos genes de efeito aditivo envolvidos no controle da característica em questão. Nesta situação a seleção deve recair sobre os genitores e métodos de melhoramento que alternem autofecundação com a etapa de seleção devem ser implementados no melhoramento destes caracteres.

Resultados semelhantes foram relatados por Ferreira (2018) ao trabalhar com um modelo dialélico com informação de repetibilidade no melhoramento genético de capim elefante para uso forrageiro. O autor também relatou efeito significativo de CEC para BS na análise dialélica, bem como para efeito permanente de meio e interação CEC x Corte. Além disso, para DIVBS o autor também observou efeito significativo de CGC.

Ao estudarem a capacidade combinatória de genótipos de capim elefante com base em características morfoagronômicas, Silva et al. (2014) também relataram resultados semelhantes, observando predominância de efeitos gênicos de dominância para características morfoagronômicas.

Para a identificação dos genitores de maior potencial, é importante levar em consideração os efeitos da capacidade geral de combinação (g_i), que fornecem informações sobre o potencial de determinado parental em relação à sua frequência de alelos favoráveis. Quanto mais altas essas estimativas, positivas ou negativas, o pai específico será considerado superior ou inferior aos outros no cruzamento dialélico. Da mesma maneira, para uma estimativa igual ou próxima a zero, infere-se que o comportamento de determinado pai não se difere da média geral (Cruz et al., 2012).

Considerando selecionar genitores para processos de conversão bioquímica (produção de biogás e etanol de segunda geração), os materiais devem apresentar altos valores de REL CEL/LIG. As proporções relativas de celulose e lignina são

fatores determinantes na identificação de espécies e, ou cultivares adequadas e são mais importantes em processos de conversão bioquímica (produção de biogás e etanol de segunda geração). A biodegradabilidade da celulose é maior do que a da lignina, desta forma, a conversão do material vegetal contendo carbono em forma de celulose é maior do que para aquelas que possuem maior proporção de lignina (McKendry, 2002a). Desta maneira, materiais que possuam alta REL CEL/LIG são desejáveis. Dentre os genitores avaliados, aqueles que apresentam valores positivos para os efeitos de *gi* com maior destaque foram BAGCE 38, CNPGL 92-38-2, BAGCE 30 e Pioneiro.

Uma outra característica importante para os processos de conversão bioquímica é a DIVBS. Para a produção de biogás por digestão anaeróbica, um consórcio de microrganismos é utilizado para facilitar a hidrólise e produção de metano. Já para produção de etanol de segunda geração, a conversão de celulose em açúcares monoméricos é feita por ácidos ou celulases, sendo, posteriormente, fermentado em etanol (Hendriks e Zeeman, 2009). Desta maneira, em programas de melhoramento de capim elefante voltados para geração de energia, é esperado que a biomassa tenha uma maior digestibilidade *in vitro*, facilitando os processos de conversão. Assim, os genitores de maior destaque com as estimativas de *gi* mais elevadas para DIVBS foram: BAGCE 38, BRS Kurumi, CNPGL 92-38-2 e CNPGL 96-27-3. Neste caso, indicados para novos cruzamentos visando a produção de biogás ou etanol de segunda geração. Levando em consideração as duas características simultaneamente, ou seja, alta DIVBS e alta REL CEL/LIG, os genitores que merecem atenção são: BAGCE 38 e CNPGL 92-38-2. Campos et al. (2019) demonstraram que o capim elefante se apresenta como uma matéria-prima promissora para a produção de etanol de segunda geração, devido às concentrações de etanol serem superiores aos alcançados por outras biomassas lignocelulósicas.

Apesar da relação entre a celulose e lignina ser mais importante para processos bioquímicos, o rendimento energético de um processo de combustão também é dependente de sua constituição química, seja direta ou indiretamente. Na combustão, o poder calorífico é de extrema importância e define-se como a quantidade de energia que é liberada na forma de calor. De acordo com Jara (1989), o poder calorífico depende da umidade e é influenciado pelos constituintes químicos, principalmente lignina e extrativos. Cunha et al. (1989) afirmam que o poder calorífico é mais alto

quanto maior o teor de lignina, porque contém menores quantidades de oxigênio quando comparados com celulose e hemicelulose.

Dorez et al. (2014) sugerem que valores menores de REL CEL/LIG na biomassa são importantes para a combustão, uma vez que baixos teores de lignina e altos teores de celulose influenciam a via de degradação da celulose, levando à carbonização e combustão incompleta dessas fibras, o que acaba limitando o calor gerado durante a queima. Assim, os genitores de destaque considerando as menores estimativas de g_i para a REL CEL/LIG são: BRS Canará, BRS Capiaçú, CNPGL 96-27-3.

Ao estudarem a composição química e o valor calorífico de 18 variedades de capim elefante e outras dez potenciais fontes de bioenergia para combustão direta, Marafon et al. (2021) concluíram que as variedades de capim elefante diferiram das outras matérias-primas em pelo menos um dos atributos de qualidade de bioenergia que foram avaliados (composição elementar, poder calorífico inferior, celulose, hemicelulose, lignina e conteúdo de cinzas). Também concluíram que o menor valor de aquecimento das variedades de capim elefante foram superiores aos da casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar e sorgo, enfatizando o grande potencial do capim elefante para combustão direta.

De acordo com Cruz et al. (2012), a combinação híbrida mais promissora é aquela onde os valores estimados da CEC são maiores e que o híbrido seja resultante de um cruzamento onde pelo menos um parental possui alta CGC. Porém, com relação ao capim elefante, esta afirmativa pode ser desconsiderada, pois, o foco da seleção é a capitalização dos efeitos de heterose e/ou a variância genética total, que será explorada na propagação clonal.

A quantidade de matéria seca produzida por uma espécie de produção de biomassa determina a capacidade potencial de produção de energia (McKendry, 2002b). Desta maneira, a escolha dos melhores híbridos deve levar em consideração as maiores estimativas de s_{ij} com base em BS, uma vez que para esta característica apenas o efeito de CEC foi significativo. Assim, os híbridos de maior potencial são: BAGCE 21 x BAGCE 38, BAGCE 30 x CNPGL-92-38-2, BAGCE 38 x BRS Kurumi, BAGCE 37 x BRS Canará, CNPGL 91-06-3 x CNPGL-96-27-3.

Cabe ressaltar que o efeito da interação CEC x Corte foi significativo para BS. A presença desta interação pode dificultar a seleção e recomendação dos materiais, já que o capim elefante é uma planta perene e vários cortes são feitos ao longo do

ciclo produtivo da cultura, demandando desempenho e estabilidade do material genético.

6. CONCLUSÕES

Utilizar a abordagem de modelos mistos para analisar os dados dos cruzamentos dialélicos de clones de capim elefante oriundos de diferentes cortes se mostrou adequada para estimar a capacidade geral e específica de combinação.

Houve predominância de genes com de efeitos de dominância no controle da característica BS e de genes com efeitos aditivos para os caracteres DIVBS e REL CEL/LIG.

Os híbridos oriundos dos cruzamentos entre BAGCE 21 x BAGCE 38, BAGCE 30 x CNPGL-92-38-2 e BAGCE 38 x BRS Kurumi se destacaram considerando a característica BS.

Considerando processos de conversão bioquímica (produção de biogás e etanol de segunda geração), os genitores que apresentaram maior potencial foram os acessos BAGCE 38 e CNPGL 92-38-2 e para a combustão direta da biomassa, os genitores que apresentaram maior potencial foram as cultivares BRS Canará, BRS Capiapu e CNPGL 96-27-3.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, P.R., DEL GROSSO, S.J., PARTON, W.J. Life-cycle assessment of net greenhouse-gas flux for bioenergy cropping systems. **Ecological Applications**, v. 17, n. 3, p. 675–691, 2007.

ANDERSON, W., CASLER, M., BALDWIN, B. Improvement of perennial forage species as feedstock for bioenergy. **Genetic Improvement of Bioenergy Crops**, p. 308–345, 2008

BARBOSA, S., DAVIDE, L.C., PEREIRA, A.V., ABREU, J.C. Duplicação cromossômica de híbridos triploides de capim-elefante e milho. **Bragantia**, v. 66 n. 3 p. 365-372, 2007.

BERNAL-VASQUEZ, A.M., UTZ, H.F, PIEPHO, H.P. Outlier detection methods for generalized lattices: a case study on the transition from ANOVA to REML. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 129, n. 4, p. 787-804, 2016.

BILGEN, S., KELES, S., KAYGUSUZ, A., SARI, A., KAYGUSUZ, K. Global warming and renewable energy sources for sustainable development: a case study in Turkey. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 2, p. 372-396, 2008.

BUTLER D.G. et al. 2018. ASReml-R reference manual version 4. The State of Queensland. Department of Primary Industries and Fisheries, Brisbane, Austrália.

CABRAL, P. D. S.; AMARAL JÚNIOR, A. T. DO; VIANA, A. P.; VIEIRA, H. D.; FREITAS, I. L. DE J.; VITTORAZZI, C.; VIVAS, M. Combining ability between tropical and temperate popcorn lines for seed quality and agronomic traits. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 4, p. 256–263, 2015.

CAMPOS, B.B., DINIZ, R.H.S., SILVEIRA, F.A. DA., JUNIOR, J.I.R., FIETTO, L.G., MACHADO, J.C., SILVEIRA, W.B. da. Elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schumach) is a promising feedstock for ethanol production by the thermotolerant yeast *Kluyveromyces marxianus* CCT 7735. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 36, n. 1, p. 43-49, 2019.

CARVALHO, M.M., ALVIM, M.J., XAVIER, D.F., CARVALHO, L. de A. **Capim-elefante: produção e utilização**. 2ª Edição. Embrapa-SPI; Juiz de Fora: Embrapa-CNPGL, 1997.

CHAVES, C.S., GOMIDE, C.A. de M., RIBEIRO, K.G., PACIULLO, D.S.C., LEDO, F.J. DA S., COSTA, I. DE A., CAMPANA, L.L. Forage production of elephant grass under intermitente stocking. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 2, p. 234-240, 2013.

CRUZ, C.D., REGAZZI, A.J., CARNEIRO, P.C.S. **Métodos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4ª Edição. Viçosa: Editora UFV. Imprensa Universitária, 514p, 2012.

CUNHA, M.P.S.C.; PONTES, C.L.F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z.B.; BARBOSA, A.P.R. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para

geração de energia em caldeiras. In: **3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais**, v.2, p. 93-121, São Carlos, 1989.

DOREZ, G., FERRY, L., SONNIER, R., TAGUET, A., LOPEZ-CUESTA, J.M. Effect of cellulose, hemicellulose and lignin contents on pyrolysis and combustion of natural fibers. **J. Anal. Appl. Pyrol.** 107, 323–331, 2014.

DUARTE, J. B. **Princípios Sobre Delineamentos Em Experimentação Agrícola**. p.66, 1996.

EISENHART, C. The assumptions underlying the analysis of variance. **Biometrics**, v. 3, n. 1, p. 1-21, 1947.

FERREIRA, P.V. **Melhoramento de plantas**. Maceió: UFAL, 2006.

FERREIRA, R. P.; PEREIRA, A. V. Melhoramento de forrageiras. In: BORÉM, A. (Ed.) **Melhoramento de espécies cultivadas**. 2ª Edição. Viçosa, MG: Editora UFV, p. 781-812, 2005.

FERREIRA, R.A.D.C. **Modelo dialélico com informação de repetibilidade no melhoramento genético de capim elefante**. 2018. 41 f. Tese (Genética e Melhoramento) – UFV, Viçosa, 2018.

FONTOURA, C.F., BRANDÃO, L.E., GOMES, L.L. Elephant grass biorefineries: towards a cleaner Brazilian energy matrix? **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 85–93, 2015.

FRITSCHÉ-NETO, R., GONÇALVES, M. C., VENCOVSKY, R., & SOUZA JÚNIOR, C. L. Prediction of genotypic values of maize hybrids in unbalanced experiments. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 10, n. 1, p. 32-39, 2010.

GANI, A., NARUSE, I. Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass. **Renewable Energy**, v. 32, n. 4, p. 649–661, 2007.

GARDNER, C. O.; EBERHART, S. A. Analysis and interpretation of the variety cross diallel and related population. **Biometrics**, Alexandria, v.22, n. 3, p. 439-452, 1966.

GRIFFING, B. Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. **Australian Journal of Biological Sciences**, v. 9, n. 4, p. 463-493, 1956.

GUERRA, G. Projeto prevê usina de R\$1,2 bi para gerar energia de capim. **GZH**. 2022. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/colunistas/giane-guerra/noticia/2022/05/projeto-preve-usina-de-r-12-bi-para-gerar-energia-de-capim-veja-imagens-cl34bjqjc000a019i2m2gawrb.html>. Acesso: 27/05/2022.

HABTE, ERMIAS., MUKTAR, M.S., ABDENA, A., HANSON, J., SARTIE, A.M., NEGAWO, A.T., MACHADO, J.C., LEDO, F.J. da S., JONES, C.S. Forrage performance and detection of marker trait associations with potential for Napier grass (*Cenchrus purpureus*) improvement. **Agronomy**, v. 10, n. 4, p. 542, 2020.

HAYMAN, B. I. The theory and analysis of diallel crosses. **Genetics**, Baltimore, v. 39, n. 6, p. 789-809, 1954.

HENDERSON, C.R. Best linear unbiased estimation and prediction under a selection model. **International Biometric Society**, v. 31, n. 2, p. 423-447, 1975.

HENDRIKS, A. T. W. M.; ZEEMAN, G. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource technology**, v. 100, n. 1, p. 10-18, 2009.

IEA, **International Energy Agency**, 2021. Bioenergy – Fuels & Technologies Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/bioenergy>. Acesso em: 10/05/2022.

JARA, E.R.P. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. São Paulo: **Instituto de Pesquisas Tecnológicas–IPT**, 1989.

JARADAT, A.A. Genetic resources of energy crops: biological systems to combat climate change. **Australian Journal Crop Science**, v. 4, n. 5, p. 309–323, 2010.

JAUHAR, P. P. **Cytogenetics and breeding of pearl millet and related species**. New York: Alan R. Liss, 289p, 1981.

KRAUSE, M.D., DIAS, K.O. das G., SANTOS, J.P.R. dos, OLIVEIRA, A.A. de, GUIMARÃES, L.J.M., PASTINA, M.M., MARGARIDO, G.R.A., GARCIA, A.A.F. Boosting predictive ability of tropical maize hybrids via genotype-by-environment

interaction under multivariate GBLUP models. **Crop Science**, v. 60, n. 6, p. 3049-3065, 2020.

LIMA, E. S.; SILVA, J. F. C.; VÁSQUEZ, H. M.; ARAÚJO, S. A. C.; LISTA, F. N.; CARNEIRO, R. F. V.; ROCHA, T. C.; RUIVO, S. C.; DEMINICIS, B. B.; COSTA, D. P. B. Composição e digestibilidade in vitro de genótipos de capim-elefante, aos 56 dias de rebrota. **Archivos de zootecnia**, n. 218, p. 279-282. 2008.

LIRA, M. de A., CUNHA, M.V. da., PEREIRA, A.V. **Melhoramento genético do capim elefante**. In: LIRA et al. (Ed.). **Capim-elefante: fundamentos e perspectivas**. Recife: IPA: UFRPE, 2010.

LONG, S.P., ZHU, X.G., NAIDU, S.L., ORT, D.R. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? **Plant, Cell and Environment**, v. 29, n. 3, p. 315–330, 2006.

LOPES, B.A. **O Capim-Elefante**. In: **Métodos nutricionais e alimentação de ruminantes**, Centro de Ciências Agrárias - Departamento de Zoologia, Viçosa, 56p, 2004.

MAIA, M.C.C., RESENDE, M.D.V., OLIVEIRA, L.C., VASCONCELOS, L.F.L., NETOS, J.F.P.L. Análise genética em genótipos de manga rosa via REML/BLUP. **Revista Agrotecnologia**, v. 5, n. 1, p. 01 – 16, 2014.

MARAFON, A.C., AMARAL, A.F.C., MACHADO, J.C., CARNEIRO, J. da C., BIERHALS, A.N., GUIMARÃES, V. DOS S. Chemical composition and calorific value of elephant grass varieties and other feedstocks intended for direct combustion. **Grassland Science**, v. 67, n. 3, p. 241-249, 2021.

MARAFON, A.C., SANTIAGO, A.D., AMARAL, A.F.C., BIERHALS, A.N., PAIVA, H.L., GUIMARÃES, V. dos S. **Poder calorífico do capim-elefante para a geração de energia térmica**. Circular técnica. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, p. 1-30, 2016.

MARAFON, A.C., SANTIAGO, A.D., CÂMARA, T.M.M., RANGEL, J.H. de A., AMARAL, A.F.C., LÉDO, F.J. da S., BIERHALS, A.N., PAIVA, H.L. **Potencial produtivo e qualidade da biomassa de capim-elefante para fins energéticos**. Circular técnica, Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, p. 1-6, 2014.

MARAFON, A.C., SANTIAGO, A.D., CÂMARA, T.M.M., RANGEL, J.H. de A., LÉDO, F.J. da S. **Produção e qualidade da biomassa de genótipos de capim-elefante com fins energéticos cultivados nos tabuleiros costeiros de Alagoas**. Circular Técnica, Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, p. 1-7, 2013.

MARCHESAN, C.B. **Análise de um cruzamento dialélico parcial em pimentão visando caracteres agronômicos e resistência ao Oídio [*Leveillula taurica* (Lév.) Arn.]**. 2008. 60 f. Dissertação (Mestre em Agricultura Tropical e Subtropical. Área de Concentração em Genética, Melhoramento Vegetal e Biotecnologia.) – Instituto Agrônomo, Campinas, São Paulo, 2008.

MARTEL, E., de NAY, D., SILJAK-YAKOVLEV, S., BROWN, S., SARR, A. Genome size variation and basic chromosome number in pearl millet and fourteen related *Pennisetum* species. **Journal of Heredity**, v. 88, n. 72. p. 139-143, 1997.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresouce Technology**, v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002a.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresouce Technology**, v. 83, n. 1, p. 47-54, 2002b.

MELO, V.L., MARÇAL, T., ROCHA, J.R. do A.S de C., ANJOS, R.S.R. Modeling (co)variance structures for genetic and non-genetic effects in the selection of common bean progenies. **Euphytica**, v. 216, n. 5, p. 1-13, 2020.

MORAES, S.L., MASSOLA, C.P., SACCOCCIO, E.M., SILVA, D.P. da., GUIMARÃES, Y.B.T. Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada. **Revista IPT, Tecnologia e Inovação**, v.1, n. 4, 2017.

MRODE, R A. **Linear models for the prediction of animal breeding values**. 3ª Edição. Cabi, 2014.

OMER, A. Energy, environment and sustainable development. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 9, p. 2265-2300, 2008.

OSAVA, M. ENERGIA-BRASIL: Pasto elefante, nuevo campeón en biomassa. **Inter Press Service**, 07 out, 2007. Disponível em: <https://ipsnoticias.net/2007/10/energia-brasil-pasto-elefante-nuevo-campeon-en-biomasa/>. Acesso em: 24/11/2021.

PANDOLFI FILHO, A.D., DO VALLE, C.B., BARRIOS, S.C.L., ALVES, G.F., DEMINICIS, B.B. Avaliação de genitoras sexuais de *Brachiaria* spp. na época de seca. **Archivos de Zootenia**, v. 65, n. 250, p. 213-219, 2016.

PATERLINI, E.M., ARANTES, M.D.C., GONÇALVES, F.G., VIDAURRE, G.B., BAUER, M. DE O., MOULIN, J.C. Evaluation of elephant grass for energy use. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 4, n. 2, p. 119-125, 2013.

PATTERSON, H. D.; THOMPSON, R. Recovery of inter-block information when block sizes are unequal. **Biometrika**, v. 58, n. 3, p. 545–554, 1971.

PEREIRA A.V., LÉDO, F.J.S. Melhoramento genético de *Pennisetum purpureum*. In: Resende, R. M. S., Vale, C. B. e Jank, L. (Eds.). **Melhoramento de forrageiras tropicais**, p.89-116, 2008.

PEREIRA, A.V., LIRA, M. de A., MACHADO, J.C., GOMIDE, C.A. de M., MARTINS, C.E., LÉDO, F.J. da S., DAHER, R.F. Elephantgrass, a tropical grass for cutting and grazing. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, n. 3, p. 1-13, 2021.

PEREIRA, A.V., VALLE, C.B., FERREIRA, R.P., MILES, J.W. Melhoramento de forrageiras tropicais. In: Nass, L.L.; Valois, A.C.C.; Melo, I.S.; Valadares-Inglis, M.C. **Recursos genéticos e melhoramento de plantas**. Rondonópolis: Fundação Mato Grosso, 2001.

PEREIRA, A.V.; FERREIRA, R.P.; PASSOS, L.P.; FREITAS, V.P.; VERNEQUE, R.; BARRA, R.B.; SILVA, C.H.P.E. Variação da qualidade de folhas em capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) e híbridos de capim-elefante x milho (*P. purpureum* x *P. glaucum*), em função da idade da planta. **Ciências e Agrotecnologia**, v.24, p.490-499, 2000.

PORTER, J.R., KIRSCH, M.M.N., STREIBIG, J., FELBY, C. Choosing crops as energy feedstocks. **Nature Biotechnology**, v. 25, n. 7, p. 716–717, 2007.

RAMALHO, M.A.P., SANTOS, J.B. dos, ZIMMERMANN, M.J. **Genética quantitativa em plantas autógamas: aplicações ao melhoramento de feijoeiro**. Goiânia: Editora UFG, 1993.

REIS, G.B.; MESQUITA, A.T.; TORRES, G.A.; ANDRADE-VIEIRA, L.F.; PEREIRA, A.V.; DAVIDE, L.C. Genomic homeology between *Pennisetum purpureum* and

Pennisetum glaucum (Poaceae). **Comparative Cytogenetics**, v. 8, n.3, p. 31-41, 2014.

RESENDE, M.D.V. **Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas**. Brasília: Embrapa, 2002.

RESENDE, M.D.V. Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético. Embrapa Florestas, 2007.

RESENDE, M.D.V; ALVES, R.S. Linear, generalized, hierarchical, Bayesian and random regression mixed models in genetics/genomics in plant breeding. **Functional Plant Breeding Journal**, v. 2, n. 2, 2020.

ROCHA, D. **Energia limpa - capim elefante pode substituir o carvão mineral**, 2007.

ROCHA, J.R. do A. S de C., MARÇAL, T.D.S., SALVADOR, F.V., SILVA, A.C.da., CARNEIRO, P.S.C., RESENDE, M.D.V.de., CARNEIRO, J.da.C., AZEVEDO, A.L.S., PEREIRA, J.F., MACHADO, J.C. Unraveling candidate genes underlying biomass digestibility in elephant grass (*Cenchrus purpureus*). **BMC Plant Biol** 19, n. 548, 2019.

ROCHA, J.R. do A.S de C., MACHADO, J.C., CARNEIRO, P.C.S., CARNEIRO, J. da C., RESENDE, M.D.V., LÉDO, F.J. da S., CARNEIRO, J.E. DE S. Bioenergetic potential and genetic diversity of elephantgrass via morpho-agronomic and biomass quality traits. **Industrial Crops and Products**, v.95, p.485-492, 2017a.

ROCHA, J.R. do A.S de C., MACHADO, J.C., CARNEIRO, P.C.S., CARNEIRO, J. da C., RESENDE, M.D.V., PEREIRA, A.V., CARNEIRO, J.E. de S. Elephant grass ecotypes for bioenergy production via direct combustion of biomass. **Industrial Crops and Products**, v. 95, p. 27-32, 2017b.

RODRIGUES, E.V. **Seleção de genótipos de capim elefante via modelos mistos para produção de bioenergia**. 2016. 76 f. Tese (Centro de Ciências e Tecnologias. Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacases, Rio de Janeiro, 2016.

SAHOO, K., MANI S. **GIS based discrete event modeling and simulation of biomass supply chain**. *In: 2015 Winter Simulation Conference*, Huntington Beach, CA. IEEE. p. 967–978, 2015.

- SAHOO, K., MANI, S., DAS, L., BETTINGER, P. GIS-based assessment of sustainable crop residues for optimal siting of biogas plants. **Biomass Bioenergy**, v. 110, p. 63–74, 2018.
- SAMSON, R., MANI, S., BODDEY, R.M., SOKHANSANJ, S., QUESADA, D.M., URQUIAGA, S., REIS, V., LEM, C.H. The potential of C4 perennial grasses for developing a global bioheat industry. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 24, n. 5-6, p. 461-495, 2005.
- SEARLE, S.R., CASELLA, G., MCCULLOCH, C.E. **Variance components**. John Wiley & Sons; 536p, 2009.
- SILVA, V.Q.R. da., DAHER, R.F., GRAVINA, G. de A., LÉDO, F.J. da S., TARDIN, F.D., SOUZA, M.C. de. Capacidade Combinatória de Capim Elefante com base em caracteres bromatológicos. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 71, n. 3, p. 241-249, 2014.
- SINCHE, M., KANNAN, B., PAUDEL, D., CORSATO, C., LOPEZ, Y., WANG, J., ALTPETER, F. Development and Characterization of a Napier grass (*Cenchrus purpureus* Schumach) Mapping Population for Flowering Time-and Biomass-Related Traits Reveal Individuals with Exceptional Potential and Hybrid Vigor. **GCB Bioenergy**. v. 13, n. 9, p. 1561-1575, 2021.
- SOUZA, P.H. **Valor nutritivo de quatro genótipos de capim-elefante**. 2014. 48f. Dissertação (Saúde e Produção Animal na Amazonia) UFRA, Belém, 2014.
- SPRAGUE, G.F., TATUM, L.A. General vs specific combining ability in single crosses of corn. **Journal of the American Society Agronomy**, v. 34, p. 923-932, 1942.
- TAIZ, L., ZEIGER, E. **Plant physiology**, 2ª Edição, Sunderland: Sinauer., 1998.
- TEW, TL, COBILL, RM. **Melhoramento genético da cana- de -açúcar (*Saccharum spp.*) como cultura energética**. In: Vermerris, W. (Ed.), **Melhoramento Genético de Cultivos Bioenergéticos**. Springer, Nova York, pp. 273-294, 2009.
- URQUIAGA, S., ALVES, B.J.R., BODDEY, R.M. Capim elefante: Uma Fonte Alternativa Promissora para a Produção de Energia. **Infobibos**, 2006. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/Capimelefante/. Acesso em: 14/10/2021.

VAN VLECK, L.D. et al. **Genetics for the animal sciences**. New York: W.H. Freeman, 391p, 1987.

VÁVROVÁ, K., KNÁPEK, J., & WEGER, J. Short-term boosting of biomass energy sources –Determination of biomass potential for prevention of regional crisis situations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 426–436, 2017.

VENCOVSKY, R., BARRIGA, P. **Genética biométrica no fitomelhoramento**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 496p. 1992

VIANA, A.P., RESENDE, M.D.V. **Genética quantitativa no melhoramento de fruteiras**. 1ª Edição, Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

VIANA, J.M.S., de ALMEIDA, Í.F., de RESENDE, M.D.V., FARIA, V.R., SILVA, F.F. BLUP for genetic evaluation of plants in non-inbred families of annual crops. **Euphytica**, v. 174, n. 1, p. 31-39, 2010.

WILKS, S. S. The Large-Sample Distribution of the Likelihood Ratio for Testing Composite Hypotheses. **The Annals of Mathematical Statistics**, v. 9, n. 1, p. 60–62, 1938.

ZANETTI, J.B., MORAIS, R.F., ALVES, B.J.R., BODDEY, R.M., URQUIAGA, S., SOARES, L.H.B. **Balço de energia na produção de capim-elefante em condições experimentais**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 71, 2010.

8. ANEXOS

Informações de apoio

Modelo Asreml análise dialélica individual

```
M1 <- asreml(BSton ~ bloco,  
            random = ~ pai + and(mae) + hibrido,  
            maxit = 100, data = dat_1)  
  
summary(M1)$varcomp
```

Modelo Asreml análise dialélica conjunta

```
M2 <- asreml(BSton ~ bloco + corte + bloco:corte,  
            random = ~ pai + and(mae) + hibrido +  
            pai:corte + and(mae:corte) + hibrido:corte  
            + hibrido:bloco,  
            residual = ~dsum(~units|corte),  
            equate.levels = c('pai','mae'),  
            #residual = ~ ar1(C):ar1(R),  
            maxit = 100, data = dat)  
  
summary(M2)$varcomp
```