

DOMINGOS ALVES DOS SANTOS NETO

**Morfometria por análise de imagens aplicada à caracterização de sementes de capim-
buffel**

**São Cristóvão – SE
Fevereiro-2026**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE – UFS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS APLICADAS – CCAA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA – DEA

**Morfometria por análise de imagens aplicada à caracterização de sementes de capim-
buffel**

**Monografia apresentada ao Departamento
de Engenharia Agrônômica – Universidade
Federal de Sergipe, como requisito parcial
para obtenção do título de Engenheiro
Agrônomo.**

APROVADO em: 19 de fevereiro de 2026.

ORIENTADO: Domingos Alves do Santos Neto

Profª. Dra. Renata Silva Mann
(Orientadora)

M.Sc. Natali Aparecida Santana
(Banca examinadora)

M.Sc. Lucas Alexandre dos Santos Rocha
(Banca examinadora)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pela força, proteção e por me sustentar ao longo de toda a caminhada, especialmente nos momentos em que foi preciso persistir e acreditar.

À minha família, minha base e meu maior suporte, deixo minha gratidão mais sincera. À minha mãe, pelo cuidado constante, pela preocupação diária e pelo apoio emocional em cada etapa dessa jornada. Ao meu pai. Ao meu irmão, pelo companheirismo que, com o tempo, se transformou em uma amizade verdadeira, tornando-se meu melhor amigo. À minha irmã, pelo carinho, pela confiança em mim e pela disposição em ajudar sempre que foi necessário.

À equipe e à orientação do Grupo de Pesquisa Genaplant, agradeço pelo acolhimento, pela contribuição e pela parceria ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Em especial, à orientadora Renata Mann, pelo carinho, pela orientação e pelo apoio durante todo o processo, e ao coorientador Matheus Emmanuel, pela ajuda direta, disponibilidade e suporte ao longo do TCC.

Aos amigos e à vida acadêmica, agradeço por tudo o que a graduação me proporcionou, principalmente pelas pessoas que marcaram minha trajetória. Meu agradecimento aos amigos Gabriel Rosário, Vinicius Santana, Felipe Albuquerque, Marcos André, Diego Coréinio, Lucas Pinheiro e Ryan Eduardo, e às amigas Lorena Hellem, Priscila do Carmo e Maria Gabriela, pela amizade, apoio e pelos momentos compartilhados. Agradeço também aos colegas de turma, de forma geral, pelo convívio, parceria e aprendizados construídos em conjunto, assim como ao grupo Agropinga, pela amizade e presença ao longo dessa caminhada.

À Profa. Maria Aparecida Moreira, agradeço a excelência na condução da disciplina e pelos conhecimentos compartilhados, que contribuíram significativamente para meu crescimento acadêmico. À Universidade Federal de Sergipe (UFS), ao Departamento de Engenharia Agrônômica (DEA) e ao Centro de Ciências Agrárias Aplicadas (CCAA), meu reconhecimento pela infraestrutura e pelas oportunidades proporcionadas durante a graduação, fundamentais para minha formação.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho e para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Cada apoio, incentivo e ensinamento foi essencial para que esta etapa fosse concluída com dedicação e gratidão.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
2.1 Capim-buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i> L.): aspectos botânicos e reprodutivos	10
2.2 Capim-buffel como pastagem.....	11
2.3 Capim-buffel como alternativa para a região semiárida.....	12
2.4 Qualidade de cariopses em forrageiras: ênfase na formação de embriões viáveis em Poaceae.....	14
2.2 Dificuldades na obtenção de sementes forrageiras de qualidade.....	15
2.3 Estratégias para melhoria e seleção de cariopses forrageiras com qualidade fisiológica.....	16
2.5 Principais parâmetros empregados na análise de sementes por imagem.....	17
3. MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1. Ensaio de Campo	21
3.2. Ensaios laboratoriais	23
3.2.1. Obtenção das cariopses	23
3.2.1. Delineamento experimental dos testes de germinação	24
3.2.2. Caracterização morfométrica.....	26
3.3. Organização, tratamento dos dados e análise estatística	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1 Avaliação inicial da qualidade fisiológica dos lotes de sementes em ensaio de campo	28
4.2 Análise laboratorial.....	29
4.3 Análise de Componentes Principais (ACP).....	30
5. CONCLUSÕES.....	35
6. REFERÊNCIAS	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Procedimento experimental adotado nos ensaios de campo e laboratoriais com cariopses de <i>Cenchrus ciliaris</i> L. Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão – SE, 2026.	20
Figura 2. Preparo da área para semeadura de capim-buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i> L.) em área de pastagem degradada em Adustina, Bahia.	22
Figura 3. Semeadura das cariopses de capim-buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i> L.).....	23
Figura 4. Inflorescências de capim-buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i> L.) coletadas na área produtiva da Fazenda Cambraia Boca da Mata, Adustina – BA.	24
Figura 5. Inflorescências de capim-buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i> L.) em diferentes estádios de desenvolvimento.	24
Figura 6. Aeração com ozônio nas sementes de capim-buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i> L.).	25
Figura 7. Preparo de semeadura de cariopses capim-buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i> L.) para os testes de germinação: Peneiramento do solo (A), cariopses entre camadas de solo pulverizado (B) e cariopses sobre papel mata-borrão.	25
Figura 8. Cariopses de capim-buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i> L.) em análise de imagem em equipamento GroundEye®.	26
Figura 9. Biplot da Análise de Componentes Principais (ACP) das cariopses de capim-buffel, com distribuição dos clusters baseada nos descritores de cor e textura.	31
Figura 10. Cariopses de capim-buffel em tela do Groundeye®, que mostra a identificação em vermelho das cariopses alaranjadas, que foram separadas para análise.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo da análise de variância (ANAVA) para os descritores físicos das cariopses de capim-buffel.....	33
---	----

RESUMO

O capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) é uma gramínea forrageira de grande relevância para regiões semiáridas do Brasil, destacando-se pela tolerância à seca, bom valor nutritivo e importância estratégica para a pecuária de corte e leite. Sua utilização contribui para a segurança alimentar dos rebanhos e para a manutenção da produtividade animal em ambientes com baixa disponibilidade hídrica, reforçando a necessidade do uso de sementes de alta qualidade para o estabelecimento eficiente das pastagens. Nesse contexto, a avaliação da qualidade fisiológica de sementes torna-se fundamental, sendo a análise de imagens uma alternativa rápida, objetiva e não destrutiva para a caracterização de atributos físicos associados ao potencial fisiológico. Assim, este trabalho teve como objetivo realizar a caracterização morfométrica de cariopses de capim-buffel por meio de descritores de cor e textura extraídos de imagens digitais e a qualidade fisiológica inicial das cariopses, visando identificar padrões que auxiliem na diferenciação de cariopses. Foram avaliados descritores cromáticos, com destaque para o componente b^* do espaço de cores CIELab, canais RGB e saturação, além da entropia de Haralick como medida de textura. Com a análise descritiva observou-se elevada variabilidade na pigmentação amarela-alaranjada das cariopses, enquanto a luminosidade apresentou menor dispersão e a textura atuou como fator complementar na diferenciação entre sementes. A Análise de Componentes Principais indicou que a variabilidade das sementes é explicada principalmente pela intensidade de pigmentação e, em seguida, pela heterogeneidade superficial. Na análise de agrupamento identificou-se três grupos com diferentes níveis de coloração laranja com diferenças significativas entre os grupos ($p < 0,001$), confirmando a influência dos descritores de cor na separação das cariopses. Conclui-se que a integração entre descritores de cor e textura constitui uma estratégia para a caracterização de cariopses de capim-buffel, fornecendo subsídios para futuros estudos envolvendo associação com a viabilidade e vigor.

Palavras-chave: CIELab; textura, fenotipagem, qualidade física, Groundeye.

1. INTRODUÇÃO

O capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) é uma gramínea perene da família Poaceae amplamente utilizada na formação de pastagens, especialmente em regiões semiáridas, devido à sua elevada tolerância ao déficit hídrico, metabolismo fotossintético C4 e capacidade de rebrote sob condições adversas (Marshall; Lewis; Ostendorf, 2012; Oliveira, 2023; Santiago; Cuadra, 2017). Entretanto, o sucesso da implantação da cultura depende diretamente da qualidade fisiológica das cariopses.

Apesar da adaptação ambiental da espécie, lotes de capim-buffel frequentemente apresentam germinação irregular ou insatisfatória, mesmo quando as cariopses demonstram integridade física aparente. Em Poaceae, o diásporo funcional corresponde ao fruto do tipo cariopse, no qual o pericarpo está aderido ao tegumento, podendo influenciar processos de embebição e germinação. Além disso, a ocorrência de dormência e a formação de embriões subdesenvolvidos ou inviáveis são fatores que contribuem para a heterogeneidade germinativa.

A qualidade fisiológica das cariopses é influenciada pelo estágio de maturação, pelas condições ambientais durante o desenvolvimento reprodutivo e pelo manejo da área de produção (Oliveira, 2023). A maturação desuniforme das inflorescências pode resultar na colheita de estruturas em diferentes estádios fisiológicos, ampliando a variabilidade intralote.

O sistema reprodutivo da espécie acrescenta complexidade a esse cenário. *Cenchrus ciliaris* apresenta ocorrência de apomixia facultativa, na qual o embrião pode se desenvolver sem fecundação, enquanto o endosperma frequentemente depende de pseudogamia (Nogler, 1984; Bicknell; Koltunow, 2004; Koltunow; Grossniklaus, 2003). Desequilíbrios no desenvolvimento do endosperma podem comprometer o enchimento da cariopse e resultar em estruturas morfológicamente completas, porém fisiologicamente inviáveis, contribuindo para a variabilidade germinativa observada.

Os testes convencionais de germinação, embora fundamentais, são destrutivos e não permitem inferências prévias sobre diferenças estruturais quando não ocorre emergência. Nesse contexto, a análise de imagens digitais surge como ferramenta complementar para caracterização não destrutiva de atributos morfométricos, cromáticos e texturais. O modelo CIELab possibilita quantificar luminosidade (L^*) e eixos cromáticos (a^* e b^*), enquanto descritores texturais, como a entropia de Haralick, permitem avaliar a heterogeneidade superficial das cariopses.

Adicionalmente, a germinação pode ser influenciada por contaminações superficiais. O tratamento com ozônio foi empregado como estratégia de desinfecção e possível modificação superficial do tegumento, visando avaliar sua influência no desempenho germinativo.

Diante desse contexto, hipotetiza-se que a variabilidade germinativa em lotes de capim-buffel esteja associada a diferenças estruturais decorrentes do desenvolvimento reprodutivo das cariopses. Assume-se ainda que descritores cromáticos e texturais obtidos por análise de imagens possam refletir, indiretamente, variações relacionadas à integridade fisiológica.

Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade fisiológica inicial das cariopses de capim-buffel por meio de dois experimentos de germinação e realizar sua caracterização morfométrica por análise de imagens digitais, buscando identificar padrões físicos associados à variabilidade do lote.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.): aspectos botânicos e reprodutivos

O capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) é uma gramínea perene, cespitosa, pertencente à família Poaceae, originária da África e amplamente distribuída em regiões tropicais e subtropicais (Marshall; Lewis; Ostendorf, 2012; Tropical Forages, 2024). A espécie apresenta colmos eretos a decumbentes, sistema radicular profundo e inflorescência em panícula espiciforme composta por espiguetas envoltas por cerdas persistentes, característica típica do gênero *Cenchrus*. O diásporo funcional corresponde a um fruto do tipo cariopse, no qual o pericarpo encontra-se aderido ao tegumento, condição estrutural relevante para os processos de embebição e germinação.

Do ponto de vista fisiológico, o capim-buffel apresenta metabolismo fotossintético do tipo C4, associado à maior eficiência na assimilação de carbono e no uso da água sob elevadas temperaturas (Marshall; Lewis; Ostendorf, 2012). Essa característica contribui para seu desempenho produtivo em ambientes tropicais, porém o sucesso da espécie não se restringe à adaptação climática, estando também relacionado à eficiência reprodutiva e à produção de cariopses viáveis.

A espécie apresenta considerável variabilidade genética e ocorrência de diferentes acessos e cultivares utilizados em sistemas forrageiros (Tropical Forages, 2024). Essa variabilidade está intimamente associada ao seu sistema reprodutivo. Em *Cenchrus ciliaris*, é relatada a ocorrência de apomixia facultativa, predominantemente do tipo apospórica, na qual o embrião pode se desenvolver a partir de células somáticas do óvulo, sem meiose ou fecundação (Asker; Jerling, 1992; Bicknell; Koltunow, 2004). Nesse sistema, embora o embrião seja geneticamente idêntico à planta-mãe, o desenvolvimento do endosperma frequentemente depende de pseudogamia, ou seja, da fertilização dos núcleos polares (Koltunow; Grossniklaus, 2003). Alterações no balanço genômico durante a formação do endosperma podem comprometer o enchimento da cariopse e afetar a viabilidade fisiológica.

Além de sua relevância forrageira, o capim-buffel é reconhecido internacionalmente como espécie com potencial invasor em determinados ecossistemas, especialmente em áreas áridas e semiáridas fora de sua região de origem. Estudos demonstram que sua elevada capacidade de estabelecimento, produção abundante de diásporos e competitividade podem levar à redução da biodiversidade vegetal nativa, alteração da estrutura da vegetação e modificação do regime de incêndios (Marshall;

Lewis; Ostendorf, 2012; Friedel *et al.*, 2011). Em alguns contextos, a formação de densas populações monodominantes está associada à exclusão de espécies nativas e à simplificação estrutural do ecossistema.

Nesse sentido, a espécie pode representar simultaneamente uma solução produtiva para sistemas pecuários e um fator de risco ambiental quando introduzida ou manejada de forma inadequada. A elevada capacidade de reprodução, aliada à produção eficiente de cariopses, contribui tanto para sua utilização agrícola quanto para seu potencial de expansão em ambientes naturais. Assim, compreender os aspectos botânicos e reprodutivos da espécie é fundamental não apenas para a interpretação da qualidade fisiológica das cariopses, mas também para o manejo responsável e tecnicamente fundamentado da cultura.

2.2 Capim-buffel como pastagem

O capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) é amplamente utilizado na formação de pastagens devido à sua elevada produção de biomassa e ao valor nutritivo da forragem, que apresenta teores adequados de proteína bruta e fibra para alimentação de ruminantes, especialmente quando manejado em estádios vegetativos apropriados (Feedipedia, 2023). Sua capacidade de rebrota após o pastejo favorece a manutenção da cobertura vegetal e a continuidade da produção forrageira ao longo do ciclo produtivo (Pedroza-Parga *et al.*, 2022).

Entretanto, o desempenho produtivo da espécie está diretamente associado ao manejo adotado. Práticas como adubação equilibrada, controle de plantas daninhas e ajuste adequado da carga animal são determinantes para evitar superpastejo e degradação secundária da área. Sistemas de pastejo rotacionado podem contribuir para maior eficiência de utilização da forragem e manutenção da persistência da pastagem.

Tradicionalmente, o capim-buffel tem sido indicado para recuperação de áreas degradadas, especialmente por sua capacidade de rápido estabelecimento e formação de cobertura densa, o que pode reduzir processos erosivos e aumentar a proteção superficial do solo. Contudo, essa recomendação deve ser analisada de forma criteriosa. A mesma característica que favorece seu estabelecimento rápido — elevada produção de diásporos, tolerância ambiental e competitividade — também está associada ao seu comportamento invasor em determinados ecossistemas (Marshall; Lewis; Ostendorf, 2012; Friedel *et al.*, 2011).

Diversos estudos demonstram que, fora de sistemas manejados, o capim-buffel pode formar populações monodominantes, reduzindo a diversidade florística e alterando a estrutura da vegetação nativa. Além disso, a acumulação de biomassa seca pode modificar

o regime de incêndios, intensificando a frequência e a severidade do fogo em ecossistemas onde historicamente não ocorria tal padrão (Marshall; Lewis; Ostendorf, 2012). Nessas condições, a espécie pode atuar não apenas como ferramenta de recuperação produtiva, mas também como agente de simplificação ecológica.

Assim, o capim-buffel pode representar simultaneamente uma solução produtiva e um fator de risco ambiental, dependendo do contexto de uso e do manejo adotado. Em sistemas agrícolas devidamente controlados, pode contribuir para estabilização da produção forrageira. Contudo, sua introdução em áreas naturais ou em ambientes ecologicamente sensíveis pode resultar em impactos negativos sobre a biodiversidade da flora e da fauna locais.

Dessa forma, o uso da espécie para recuperação de áreas deve considerar critérios técnicos, ambientais e regulatórios, avaliando-se o risco de invasão e os possíveis efeitos sobre a diversidade biológica. A elevada capacidade reprodutiva e a produção eficiente de cariopses, características desejáveis sob a perspectiva produtiva, também são fatores que contribuem para sua expansão em ambientes não manejados. Portanto, compreender os mecanismos de formação e qualidade das cariopses é relevante não apenas para a eficiência agrônômica, mas também para o manejo responsável da espécie em diferentes contextos ambientais.

2.3 Capim-buffel como alternativa para a região semiárida

A região semiárida brasileira caracteriza-se por elevada variabilidade interanual das chuvas, longos períodos de estiagem e ocorrência frequente de temperaturas elevadas, fatores que influenciam diretamente o desenvolvimento reprodutivo das plantas e a qualidade das estruturas propagativas. O capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.), por apresentar metabolismo fotossintético do tipo C4 e elevada eficiência no uso da água, demonstra adaptação fisiológica a condições de déficit hídrico (Marshall; Lewis; Ostendorf, 2012; Oliveira, 2023). Contudo, a adaptação vegetativa da espécie não implica necessariamente estabilidade na formação e viabilidade das cariopses.

Durante a fase reprodutiva, condições de estresse hídrico e térmico podem afetar processos como microsporogênese, fecundação, formação do embrião e enchimento do endosperma, resultando em estruturas com desenvolvimento incompleto ou menor acúmulo de reservas (Bewley *et al.*, 2013). Em gramíneas, a limitação hídrica no período de enchimento do grão pode reduzir a translocação de assimilados para o endosperma, comprometendo o potencial germinativo (Nonogaki; Bassel; Bewley, 2010). Dessa forma,

mesmo espécies adaptadas ao semiárido podem produzir lotes com variabilidade fisiológica significativa.

Além do estresse ambiental, a maturação desuniforme das inflorescências — característica comum em Poaceae — pode resultar na colheita simultânea de cariopses em diferentes estádios fisiológicos, incluindo estruturas ainda imaturas ou com desenvolvimento embrionário incompleto (Oliveira, 2023). A imaturidade fisiológica é um fator amplamente associado à redução da germinação e do vigor, uma vez que o embrião pode não ter completado sua diferenciação estrutural ou o endosperma pode apresentar acúmulo insuficiente de reservas (Bewley *et al.*, 2013).

Outro aspecto relevante é a ocorrência de dormência, frequentemente relatada em sementes de gramíneas tropicais. A dormência pode ser de natureza fisiológica ou física, envolvendo restrições impostas pelo tegumento ou por mecanismos metabólicos internos do embrião (Baskin; Baskin, 2014). Em ambientes semiáridos, a dormência pode atuar como estratégia adaptativa para distribuição temporal da germinação, evitando a emergência em condições ambientais desfavoráveis. Contudo, sob a perspectiva produtiva, esse mecanismo pode resultar em germinação irregular e dificultar o estabelecimento uniforme da pastagem.

Adicionalmente, considerando que o capim-buffel apresenta ocorrência de apomixia facultativa (Asker; Jerling, 1992; Bicknell; Koltunow, 2004), variações na formação embrionária e no desenvolvimento do endosperma podem ocorrer independentemente da fecundação. Alterações no balanço genômico do endosperma, especialmente em sistemas pseudogâmicos, podem comprometer o suporte nutricional ao embrião, influenciando a viabilidade final da cariopse (Koltunow; Grossniklaus, 2003). Em condições ambientais adversas, a interação entre estresse abiótico e modo reprodutivo pode ampliar a heterogeneidade do lote.

Portanto, embora o capim-buffel seja frequentemente indicado como alternativa produtiva para o semiárido, a qualidade fisiológica das cariopses produzidas sob essas condições pode ser significativamente influenciada por fatores ambientais e reprodutivos. A compreensão desses efeitos é fundamental para interpretar a germinação observada em lotes provenientes de áreas sujeitas a estresse hídrico e térmico, bem como para orientar estratégias de produção e seleção de material propagativo com maior potencial de estabelecimento.

2.4 Qualidade de cariopses em forrageiras: ênfase na formação de embriões viáveis em Poaceae

A qualidade de cariopses em espécies forrageiras está diretamente relacionada à capacidade de germinação, vigor e estabelecimento inicial das plântulas. Em Poaceae, além de fatores clássicos como dormência e deterioração, um problema recorrente é a formação de cariopses sem embriões viáveis ou com embriões subdesenvolvidos, frequentemente denominadas “sementes vazias” ou “chochas”. Essas estruturas podem apresentar aparência externa aparentemente normal, mas não resultam em germinação, reduzindo significativamente a qualidade fisiológica do lote (Bewley *et al.*, 2013).

A formação de embriões inviáveis está frequentemente associada a falhas durante o desenvolvimento reprodutivo. O embrião e o endosperma desenvolvem-se de forma coordenada, sendo o endosperma responsável pelo fornecimento de reservas e sinais regulatórios essenciais ao crescimento embrionário. Alterações no desenvolvimento ou na celularização do endosperma podem comprometer o enchimento da cariopse e levar ao aborto embrionário (Bewley *et al.*, 2013; Nonogaki; Bassel; Bewley, 2010).

Diversos fatores podem influenciar negativamente esse processo. O estresse hídrico e térmico durante a fase reprodutiva pode afetar a microsporogênese, a fecundação e o enchimento do grão, reduzindo o acúmulo de assimilados e comprometendo o desenvolvimento embrionário (Bewley *et al.*, 2013). Em gramíneas cultivadas em ambientes sujeitos a déficit hídrico, é comum observar redução no peso das sementes e maior proporção de estruturas com desenvolvimento incompleto.

A maturação desuniforme das inflorescências, característica frequente em Poaceae, também pode resultar na colheita simultânea de cariopses em diferentes estádios fisiológicos. Estruturas colhidas antes da maturidade fisiológica podem apresentar embriões ainda não completamente diferenciados ou com reservas insuficientes, comprometendo a germinação e o vigor (Bewley *et al.*, 2013; Baskin; Baskin, 2014).

Outro aspecto relevante refere-se ao sistema reprodutivo. Em espécies com ocorrência de apomixia facultativa, como relatado para diversas gramíneas forrageiras tropicais, o embrião pode se desenvolver sem fecundação, enquanto o endosperma frequentemente depende de pseudogamia. Desequilíbrios no desenvolvimento do endosperma ou no balanço genômico podem resultar em estruturas morfológicamente completas, porém fisiologicamente inviáveis (Asker; Jerling, 1992; Bicknell; Koltunow, 2004; Koltunow; Grossniklaus, 2003).

Além disso, a dormência fisiológica pode impedir a germinação imediata mesmo quando o embrião é estruturalmente viável. Esse mecanismo, embora adaptativo do ponto

de vista ecológico, pode dificultar a avaliação da qualidade do lote sob condições laboratoriais (Baskin; Baskin, 2014).

Dessa forma, a qualidade fisiológica das cariopses em Poaceae resulta da interação entre fatores ambientais, genéticos e reprodutivos que influenciam o desenvolvimento embrionário e o enchimento do endosperma. A ocorrência de estruturas sem embriões viáveis ou com desenvolvimento incompleto constitui um desafio relevante na produção de sementes forrageiras, reforçando a necessidade de ferramentas complementares que auxiliem na caracterização e estratificação de lotes com base em atributos físicos associados ao desenvolvimento reprodutivo.

2.2 Dificuldades na obtenção de sementes forrageiras de qualidade

A obtenção de cariopses forrageiras com qualidade fisiológica satisfatória constitui um dos principais desafios na produção de gramíneas tropicais. Em Poaceae, a qualidade do lote está diretamente relacionada à formação adequada do embrião, ao desenvolvimento do endosperma e ao grau de maturação no momento da colheita. Diferentemente de aspectos como presença de impurezas ou contaminação por outras espécies — que envolvem etapas de beneficiamento e controle externo — os fatores fisiológicos e reprodutivos são intrínsecos à formação da cariopse e exercem influência direta sobre a germinação.

Um dos principais entraves está associado ao sistema reprodutivo. Em espécies com ocorrência de apomixia facultativa, como relatado para diversas gramíneas forrageiras tropicais, o embrião pode desenvolver-se sem fecundação, enquanto o endosperma frequentemente depende de pseudogamia (Asker; Jerling, 1992; Bicknell; Koltunow, 2004). Alterações no balanço genômico do endosperma ou falhas no seu desenvolvimento podem comprometer o enchimento da cariopse e resultar em estruturas morfológicamente completas, porém fisiologicamente inviáveis (Koltunow; Grossniklaus, 2003). Essa característica pode contribuir para a heterogeneidade intralote observada na germinação.

Além do sistema reprodutivo, a maturação desuniforme das inflorescências representa fator crítico na qualidade das cariopses. Em gramíneas, é comum a presença simultânea de estruturas em diferentes estádios de desenvolvimento dentro da mesma panícula, o que pode levar à colheita de cariopses imaturas ou com desenvolvimento embrionário incompleto (Bewley *et al.*, 2013). A imaturidade fisiológica está associada à menor acumulação de reservas e à redução do vigor germinativo.

Outro fator relevante é a ocorrência de dormência fisiológica, frequentemente relatada em espécies forrageiras tropicais. A dormência pode envolver mecanismos

metabólicos internos do embrião ou restrições impostas pelo tegumento, retardando ou impedindo a germinação sob condições laboratoriais padrão (Baskin; Baskin, 2014). Embora represente estratégia adaptativa em ambientes naturais, a dormência pode dificultar a avaliação da real viabilidade das cariopses.

Adicionalmente, condições ambientais durante a fase reprodutiva, como estresse hídrico e altas temperaturas, podem interferir na formação do embrião e no enchimento do endosperma, reduzindo o acúmulo de assimilados e aumentando a proporção de cariopses com baixo potencial germinativo (Bewley *et al.*, 2013). Assim, mesmo em espécies adaptadas a ambientes adversos, a qualidade fisiológica do lote pode ser significativamente afetada por condições ambientais ocorridas durante o desenvolvimento reprodutivo.

Dessa forma, as principais dificuldades na obtenção de cariopses forrageiras com qualidade fisiológica não se restringem a aspectos externos de pureza ou comercialização, mas estão fortemente relacionadas a processos biológicos intrínsecos à espécie, como sistema reprodutivo, desenvolvimento embrionário, maturação e dormência. A compreensão desses fatores é essencial para interpretar a variabilidade germinativa observada em lotes de gramíneas forrageiras e fundamentar estratégias de avaliação e seleção baseadas em atributos estruturais das cariopses.

2.3 Estratégias para melhoria e seleção de cariopses forrageiras com qualidade fisiológica

A obtenção de cariopses forrageiras com elevado potencial fisiológico envolve uma série de estratégias que atuam desde a fase de produção até os métodos de avaliação e seleção do lote. A seleção de plantas matrizes vigorosas constitui etapa fundamental, uma vez que características genéticas e fisiológicas da planta-mãe influenciam diretamente o desenvolvimento do embrião e o enchimento do endosperma (Bewley *et al.*, 2013). O manejo adequado durante a produção, incluindo nutrição equilibrada e controle fitossanitário, contribui para a formação de estruturas mais uniformes e com maior acúmulo de reservas.

A colheita no estágio de maturidade fisiológica é outro fator determinante para a qualidade das cariopses. A colheita precoce pode resultar em embriões incompletamente desenvolvidos e menor acúmulo de matéria seca, reduzindo germinação e vigor (Bewley *et al.*, 2013). Após a colheita, o beneficiamento — incluindo secagem, limpeza e classificação — contribui para padronização do lote e remoção de estruturas visivelmente defeituosas. Sistemas de certificação estabelecem padrões mínimos de qualidade para comercialização, incluindo parâmetros de pureza e germinação (USDA NRCS, 2022).

Entretanto, embora essas estratégias sejam essenciais, elas não garantem uniformidade fisiológica intralote, especialmente em espécies com maturação desuniforme ou variações no desenvolvimento embrionário. Nesse contexto, ferramentas complementares de avaliação tornam-se relevantes.

A análise de imagens digitais tem se consolidado como método não destrutivo para avaliação da qualidade de sementes, permitindo extração de descritores morfológicos e cromáticos associados ao desenvolvimento estrutural (Hemender; Mor; Bhuker, 2018). Essa técnica possibilita quantificar atributos como tamanho, forma, área projetada, coloração e textura superficial, os quais podem refletir diferenças no grau de maturação e na integridade física das estruturas.

Modelos de representação de cor, como o sistema CIELab, permitem interpretar variações de luminosidade (L^*) e eixos cromáticos (a^* e b^*), possibilitando a quantificação objetiva de tonalidades relacionadas ao estágio de maturação. Já descritores texturais derivados da matriz de coocorrência de níveis de cinza, como os propostos por Haralick (Haralick; Shanmugam; Dinstein, 1973), permitem mensurar a heterogeneidade superficial, potencialmente associada a variações estruturais do tegumento.

Do ponto de vista prático, a análise de imagens pode ser aplicada como ferramenta de triagem e estratificação de lotes antes da realização de testes fisiológicos, permitindo a identificação de grupos com padrões morfométricos distintos. Sistemas automatizados possibilitam a avaliação de grandes volumes de cariopses em curto período, reduzindo a subjetividade de análises visuais tradicionais e aumentando a reprodutibilidade dos resultados (Hemender; Mor; Bhuker, 2018). Além disso, a integração com métodos estatísticos multivariados e algoritmos de aprendizado de máquina amplia o potencial de classificação e predição de qualidade.

Dessa forma, as estratégias para melhoria da qualidade de cariopses forrageiras envolvem tanto práticas agronômicas durante a produção quanto métodos avançados de caracterização física. A combinação entre manejo adequado e ferramentas de análise não destrutiva pode contribuir para maior precisão na seleção de estruturas com potencial fisiológico superior, especialmente em espécies que apresentam heterogeneidade intrínseca no desenvolvimento reprodutivo.

2.5 Principais parâmetros empregados na análise de sementes por imagem

A análise de imagens aplicada à avaliação de sementes baseia-se na extração de descritores quantitativos capazes de representar características físicas associadas ao desenvolvimento estrutural das unidades propagativas. Em Poaceae, atributos como

tamanho, forma, cor e textura podem refletir diferenças no enchimento do endosperma, no grau de maturação e na integridade do tegumento, fatores diretamente relacionados ao potencial fisiológico (Bewley *et al.*, 2013; Hemender; Mor; Bhuker, 2018).

O tamanho da cariopse, frequentemente representado por área projetada, comprimento e largura, está relacionado ao acúmulo de reservas no endosperma. Em gramíneas, estruturas com maior massa e maior acúmulo de matéria seca tendem a apresentar maior vigor inicial, embora essa relação não seja absoluta (Bewley *et al.*, 2013). Já a forma pode indicar irregularidades decorrentes de desenvolvimento incompleto, deformações ou danos mecânicos. Parâmetros como circularidade, razão comprimento/largura e índice de compacidade permitem quantificar desvios morfológicos que não são facilmente detectáveis por inspeção visual.

A cor é um dos principais descritores utilizados na caracterização de sementes por imagem, pois pode refletir diferenças no grau de maturação, na composição do tegumento e na integridade estrutural. Entre os modelos de cor disponíveis, o sistema CIELab é amplamente empregado em análises científicas por apresentar uniformidade perceptual, ou seja, variações numéricas correspondem proporcionalmente à percepção visual humana (OIV, 2006).

No modelo CIELab:

- L* representa a luminosidade, variando de 0 (preto) a 100 (branco);
- a* corresponde ao eixo verde (valores negativos) – vermelho (valores positivos);
- b* corresponde ao eixo azul (valores negativos) – amarelo (valores positivos).

A interpretação desses parâmetros permite avaliar objetivamente a tonalidade e intensidade cromática das cariopses. No caso de gramíneas como o capim-buffel, valores mais elevados de b* indicam maior tendência à coloração amarelada ou alaranjada, frequentemente associada ao estágio de maturação. Já variações em L* indicam diferenças de brilho ou escurecimento, que podem estar relacionadas a deterioração ou variações na composição do tegumento.

A saturação cromática, derivada da magnitude combinada dos eixos a* e b*, expressa a intensidade ou pureza da cor. Valores elevados indicam cores mais intensas, enquanto valores próximos de zero indicam tons menos saturados, próximos ao cinza. É importante destacar que menor saturação não implica necessariamente menor luminosidade; são atributos distintos.

A escolha do modelo CIELab neste estudo justifica-se por sua padronização internacional e por permitir comparações quantitativas reprodutíveis, reduzindo a subjetividade associada à avaliação visual tradicional (OIV, 2006).

A textura superficial fornece informações sobre a heterogeneidade estrutural da cariopse. Diferentemente da cor, que expressa composição cromática, a textura descreve a distribuição espacial dos níveis de intensidade dos pixels na imagem.

Descritores texturais frequentemente são derivados da matriz de coocorrência de níveis de cinza (GLCM), proposta por Haralick, Shanmugam e Dinstein (1973). Entre esses descritores, destaca-se a entropia, que mede o grau de desordem ou heterogeneidade da superfície. Valores elevados de entropia indicam maior variação tonal e superfície mais irregular; valores reduzidos indicam padrões mais homogêneos.

Em sementes, maior heterogeneidade superficial pode estar associada a fissuras, irregularidades no tegumento ou variações no padrão de pigmentação. Entretanto, a interpretação da textura deve ser contextualizada com outros descritores, pois alterações texturais não indicam necessariamente inviabilidade, mas podem sinalizar diferenças estruturais intralote.

A confiabilidade da análise de imagens depende da padronização das condições de aquisição, incluindo iluminação, resolução e calibração do sistema. A repetibilidade dos descritores extraídos é fundamental para garantir comparabilidade entre lotes e experimentos (Hemender; Mor; Bhuker, 2018).

Dessa forma, a combinação de parâmetros geométricos, cromáticos (especialmente no sistema CIELab) e texturais permite uma caracterização multivariada das cariopses, fornecendo subsídios objetivos para identificação de variabilidade estrutural e possível estratificação de lotes com base em atributos físicos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi dividido em dois ensaios complementares, conduzidos em condições de campo e de laboratório, com o objetivo de avaliar aspectos relacionados à germinação e à caracterização física de cariopses de capim-buffel (Figura 1).



Figura 1. Procedimento experimental adotado nos ensaios de campo e laboratoriais com cariopses de *Cenchrus ciliaris* L. Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão – SE, 2026.

Fonte: Imagem elaborada com auxílio de inteligência artificial (ChatGPT – OpenAI, 2026).

O ensaio de campo teve como finalidade avaliar a germinação das cariopses durante o processo de formação da pastagem, com o objetivo de observar o estabelecimento inicial da cultura em condições naturais de cultivo. As cariopses utilizadas foram provenientes da mesma área produtiva descrita anteriormente, localizada na Fazenda Cambraia Boca da Mata, no município de Adustina – BA, onde *Cenchrus ciliaris* L. já se encontrava implantado. A área apresentava histórico de cultivo da espécie e encontrava-se em condição de pastagem degradada. A utilização de material proveniente dessa área permitiu analisar o desempenho germinativo em um ambiente representativo das condições reais de produção e implantação no semiárido.

O ensaio laboratorial foi conduzido com o objetivo de complementar as observações de campo por meio de avaliações sob condições controladas. Nessa etapa, realizou-se a caracterização morfométrica das cariopses utilizando sistema automatizado

de análise de imagens, possibilitando a extração de descritores físicos relacionados principalmente à cor e à textura superficial.

Paralelamente, foi realizada a avaliação da germinação de cariopses submetidas e não submetidas ao tratamento com ozônio. A aplicação do ozônio teve como finalidade promover a desinfecção superficial das cariopses, reduzindo possíveis contaminações por microrganismos que pudessem interferir no processo germinativo. Adicionalmente, considerou-se a possibilidade de que o tratamento oxidativo pudesse promover alterações superficiais no tegumento, favorecendo a embebição e contribuindo para a superação de eventuais barreiras físicas associadas à dormência.

Após a aplicação do ozônio, as cariopses foram dispostas em dois arranjos experimentais distintos: (i) entre folhas de papel mata-borrão, posicionadas acima e abaixo das cariopses, garantindo contato uniforme com o substrato umedecido; e (ii) sobre papel mata-borrão acrescido de uma fina camada de solo pulverizado, com aproximadamente 2 mm de espessura, buscando simular condições mais próximas ao ambiente natural de germinação.

A condução integrada dos ensaios de campo e laboratoriais possibilitou avaliar o comportamento germinativo das cariopses sob condições naturais e controladas, além de permitir a caracterização física do lote, fornecendo subsídios para a interpretação da variabilidade observada.

3.1. Ensaio de Campo

A área experimental destinada ao ensaio de campo localiza-se na Fazenda Cambraia Boca da Mata, no município de Ajustina, Bahia, Brasil (aproximadamente 10°32' S e 38°07' W). A região insere-se no domínio semiárido, caracterizada por elevada variabilidade pluviométrica, temperaturas médias elevadas e predominância de solos de fertilidade natural variável.

A área apresenta histórico de cultivo de *Cenchrus ciliaris* L., estando previamente implantada com pastagem da espécie. Entretanto, encontrava-se em condição de degradação, caracterizada por redução da densidade de plantas, presença de falhas na cobertura vegetal e diminuição do vigor da pastagem (Figura 2). Tal condição não inviabiliza o desenvolvimento do capim-buffel, uma vez que a espécie apresenta reconhecida capacidade de rebrota e adaptação a solos de baixa fertilidade e condições edafoclimáticas restritivas. Contudo, a degradação pode refletir limitações no manejo anterior, como superpastejo ou ausência de reposição nutricional.

A escolha da área considerou sua representatividade em relação às condições reais de produção do semiárido, permitindo avaliar o comportamento germinativo das cariopses em cenário compatível com a prática agrícola regional. Antes da instalação do ensaio, realizou-se a limpeza superficial do local, com remoção de resíduos vegetais secos e espécies competidoras, a fim de reduzir interferências na emergência das plântulas e proporcionar condições mais homogêneas para o estabelecimento inicial.

A utilização de uma área com histórico de cultivo da espécie permitiu avaliar o desempenho germinativo das cariopses em ambiente previamente adaptado ao capim-buffel, ao mesmo tempo em que a condição de degradação possibilitou investigar o potencial de estabelecimento da cultura sob cenário de recuperação produtiva (Figura 2).



Figura 2. Preparo da área para semeadura de capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) em área de pastagem degradada em Adustina, Bahia.

Posteriormente, foi feito o preparo do solo por meio de aração. A semeadura foi realizada a lança, contribuindo para a formação de um estande homogêneo (Figura 3).



Figura 3. Semeadura das cariopses de capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.).

3.2. Ensaio laboratoriais

3.2.1. Obtenção das cariopses

A colheita das cariopses foi realizada em plantas que se encontravam no estágio ótimo de maturação, correspondente à maturidade fisiológica, fase em que ocorre máximo acúmulo de matéria seca e consolidação do desenvolvimento embrionário. A identificação desse estágio foi realizada com base em características morfológicas externas, especialmente na coloração das cariopses, que apresentavam tonalidade predominantemente bege a amarelada, indicativa de maturação avançada.

A adoção desse critério visou garantir maior qualidade fisiológica do material amostrado, reduzindo a inclusão de estruturas imaturas e assegurando maior representatividade do lote quanto ao potencial germinativo (Figura 4).



Figura 4. Inflorescências de capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) coletadas na área produtiva da Fazenda Cambraia Boca da Mata, Adustina – BA.

A coleta das cariopses foi efetuada diretamente das inflorescências, priorizando aquelas com coloração predominantemente amarelo-palha a alaranjada e ausência de danos aparentes causados por pragas, doenças ou intempéries. Esse procedimento teve como finalidade reduzir a variabilidade associada a sementes imaturas ou deterioradas (Figura 5).



Figura 5. Inflorescências de capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) em diferentes estádios de desenvolvimento.

Após a colheita, o material foi encaminhado para o beneficiamento, etapa na qual foram removidas impurezas como fragmentos vegetais. Em seguida, as cariopses foram submetidas a uma seleção visual preliminar para assegurar maior uniformidade do lote utilizado nas análises.

Posteriormente, as sementes foram acondicionadas em sacos de papel kraft sob refrigeração (8°C) de dezembro de 2025 a janeiro de 2026, até o momento dos testes.

3.2.1. Delineamento experimental dos testes de germinação

O experimento foi conduzido em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). Para a avaliação fisiológica, realizou-se inicialmente um teste de germinação, utilizando oito repetições de 25 sementes, totalizando 200 sementes. O teste foi conduzido em câmara do tipo BOD, sob temperatura controlada de 25°C, garantindo condições uniformes para o processo germinativo.

Posteriormente, o ensaio foi repetido com sementes submetidas ao tratamento com ozônio, no qual foram expostas ao gás por 20 minutos, sob aeração em água destilada, com o objetivo de verificar possíveis efeitos sobre a germinação (Figura 6).



Figura 6. Aeração com ozônio nas sementes de capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.).

Após o tratamento, as sementes foram colocadas para germinar em caixas do tipo Gerbox, sob condições de ambiente laboratorial, sem controle artificial de temperatura, apresentando variação térmica entre 25 e 30 °C.

Para essa etapa, foram adotados dois arranjos de semeadura (Figura 7). No primeiro, as sementes foram distribuídas entre duas folhas de papel mata-borrão, uma posicionada abaixo e outra acima das sementes, garantindo contato uniforme com a umidade do substrato. No segundo arranjo, utilizou-se uma folha de papel mata-borrão como base, sobre a qual foi adicionada uma fina camada de solo pulverizado, cobrindo as sementes. Esse procedimento buscou simular uma condição mais próxima ao ambiente natural de germinação.



Figura 7. Preparo de semeadura de cariopses capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) para os testes de germinação: Peneiramento do solo (A), cariopses entre camadas de solo pulverizado (B) e cariopses sobre papel mata-borrão.

3.2.2. Caracterização morfométrica

Paralelamente, uma fração independente do lote foi destinada à análise morfométrica por imagens, cujas sementes não foram submetidas a qualquer tratamento preliminar, preservando suas características físicas naturais. A aquisição das imagens foi realizada com quatro repetições de 25 sementes, totalizando 100 cariopses. As sementes foram distribuídas uniformemente na bandeja do equipamento GroundEye®, evitando sobreposição e assegurando maior precisão na delimitação dos contornos.

Com o sistema houve a captura padronizada das imagens e a extração automática dos descritores físicos, com ênfase em atributos relacionados à cor e à textura das cariopses.

A captura das imagens foi realizada utilizando o equipamento GroundEye®, sistema automatizado de análise de sementes baseado em visão computacional. As amostras foram distribuídas de maneira uniforme sobre a bandeja de leitura do equipamento, evitando sobreposição entre as sementes para garantir maior precisão na detecção dos contornos.

O sistema realizou a segmentação das imagens, permitindo a individualização de cada cariopse e a extração automática dos descritores físicos. Todas as imagens foram obtidas sob condições padronizadas de iluminação e resolução, assegurando a reprodutibilidade das análises (Figura 8).



Figura 8. Cariopses de capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) em análise de imagem em equipamento GroundEye®.

Foram avaliados descritores relacionados à cor e à textura das sementes. Entre os parâmetros cromáticos, destacaram-se os componentes do espaço de cor CIELab, especialmente o parâmetro b^* , associado à tonalidade amarelo-alaranjada, além da saturação e dos canais RGB.

Para a caracterização da textura superficial, foi utilizada a entropia de Haralick, considerada um indicador da heterogeneidade da superfície da semente.

3.3. Organização, tratamento dos dados e análise estatística

Os dados extraídos foram organizados em planilhas eletrônicas para posterior análise estatística. Inicialmente, foi realizada a análise descritiva das variáveis, incluindo medidas de tendência central e dispersão, com o objetivo de compreender a variabilidade presente no conjunto amostral.

Posteriormente, os dados foram padronizados para aplicação de técnicas multivariadas, minimizando possíveis efeitos de escala entre as variáveis analisadas.

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi empregada para reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar os principais eixos de variação associados às características das sementes. Essa técnica permitiu avaliar a contribuição relativa de cada descritor na diferenciação das cariopses.

Em seguida, foi realizada a Análise de Componentes Principais, com o propósito de identificar grupos de cariopses com padrões físicos semelhantes. Os grupos obtidos foram interpretados com base na intensidade de pigmentação e nas características texturais.

Para verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os grupos formados, foram aplicados testes paramétricos e não paramétricos, conforme a adequação dos dados aos pressupostos de normalidade. A análise de variância (ANAVA) e o teste de Kruskal–Wallis foram utilizados para comparação entre grupos, adotando-se nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$). Quando identificadas diferenças significativas, foram realizados testes para comparações múltiplas, permitindo determinar quais grupos diferiram entre si.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação inicial da qualidade fisiológica dos lotes de sementes em ensaio de campo

A inexistência de germinação pode estar associada à presença de mecanismos de dormência, amplamente descritos em sementes de Poaceae, incluindo espécies forrageiras tropicais. A dormência em gramíneas pode ser de natureza fisiológica, envolvendo restrições metabólicas internas ao embrião, ou física, relacionada à impermeabilidade das estruturas que envolvem a cariopse, dificultando a embebição e a retomada do metabolismo germinativo (Baskin; Baskin, 2014; Bewley *et al.*, 2013). Em *Cenchrus ciliaris*, estudos relatam ocorrência de dormência variável entre lotes, podendo ser influenciada pelo estágio de maturação e pelas condições ambientais durante a formação das cariopses (Silva, 2022).

As condições de armazenamento também exercem influência significativa sobre o potencial germinativo. De modo geral, sementes ortodoxas — categoria na qual se enquadram a maioria das Poaceae — apresentam melhor conservação quando armazenadas com baixo teor de umidade e sob temperaturas reduzidas, sendo recomendados teores de umidade inferiores a 12% e ambientes com temperatura controlada e baixa umidade relativa (Bewley *et al.*, 2013). Condições inadequadas de armazenamento podem acelerar processos de deterioração, comprometendo a integridade das membranas celulares e reduzindo a viabilidade.

Além do armazenamento, as condições de produção podem impactar diretamente o potencial germinativo. Estresses hídricos ou térmicos durante a fase reprodutiva podem afetar a formação do embrião e o enchimento do endosperma, reduzindo o acúmulo de reservas e aumentando a proporção de estruturas com desenvolvimento incompleto (Nonogaki; Bassel; Bewley, 2010). Em ambientes semiáridos, a variabilidade climática pode intensificar esse efeito, resultando em maior heterogeneidade intralote.

As características intrínsecas da espécie também devem ser consideradas. A ocorrência de apomixia facultativa em *Cenchrus ciliaris* pode influenciar o padrão de formação embrionária e o desenvolvimento do endosperma (Bicknell; Koltunow, 2004). Além disso, fatores genéticos modulam a intensidade da dormência, o vigor inicial e a longevidade das sementes, podendo resultar em diferenças significativas entre populações ou acessos da espécie (Baskin; Baskin, 2014). Dessa forma, a viabilidade das cariopses pode refletir a interação entre genética, ambiente de produção e condições pós-colheita.

Considerando esses aspectos, a ausência de germinação observada neste estudo pode decorrer da atuação conjunta de mecanismos de dormência, limitações estruturais internas e possíveis efeitos das condições ambientais e genéticas sobre o desenvolvimento reprodutivo das cariopses.

4.2 Análise laboratorial

A análise descritiva evidenciou elevada variabilidade nos descritores de cor das cariopses, com destaque para o componente b^* do espaço CIELab, que representa o eixo cromático azul–amarelo. Nesse sistema, valores negativos de b^* indicam maior tendência à tonalidade azulada, enquanto valores positivos indicam maior intensidade de amarelo. As cariopses avaliadas apresentaram valores exclusivamente positivos, com média de 14,76, desvio padrão de 3,26 e amplitude aproximada de 20 unidades, evidenciando variação expressiva na intensidade da coloração amarelo-alaranjada entre as unidades analisadas. Essa heterogeneidade sugere diferenças no grau de maturação ou na composição do tegumento, uma vez que a coloração em gramíneas tende a intensificar-se com o avanço da maturidade fisiológica.

A luminosidade (L^*), que expressa o eixo claro–escuro (variando de 0 = preto a 100 = branco), apresentou média de 64,22 e menor dispersão em relação ao b^* , indicando que as cariopses apresentaram brilho relativamente uniforme. Assim, as diferenças visuais observadas no lote estão mais associadas à tonalidade (intensidade do amarelo) do que à variação de brilho.

Em relação à textura, a entropia de Haralick apresentou média de 7,11, com coeficiente de variação indicativo de dispersão intermediária entre as unidades avaliadas. A entropia mede o grau de desordem ou heterogeneidade na distribuição dos níveis de cinza na imagem: valores mais elevados indicam maior irregularidade superficial e maior complexidade textural, enquanto valores menores indicam superfície mais homogênea. A variação moderada observada sugere a presença de diferenças estruturais superficiais entre as cariopses, embora menos pronunciadas que as variações cromáticas.

De modo geral, os resultados indicam que os descritores cromáticos, especialmente o eixo b^* , foram os principais responsáveis pela diferenciação inicial das cariopses, refletindo variações na intensidade da tonalidade amarelo-alaranjada. A textura, por sua vez, atuou como variável complementar na discriminação do material, contribuindo para a identificação de heterogeneidade estrutural superficial no lote analisado.

4.3 Análise de Componentes Principais (ACP)

A verificação da normalidade dos dados, realizada por meio do teste de Shapiro–Wilk, indicou que parte dos descritores apresentou comportamento compatível com a distribuição normal. Entre essas variáveis, destacaram-se o componente CIELab b, os parâmetros CIELab a e b acima do limiar de Otsu, a saturação, a média do canal azul, algumas variáveis relacionadas à dominância de cores (azul, vermelha, preta, magenta, púrpura e rosa), além da variável geométrica área. De modo geral, esses descritores apresentaram menor assimetria e distribuição mais homogênea dos dados.

Por outro lado, a maior parte das variáveis não atendeu ao pressuposto de normalidade, incluindo os canais RGB abaixo do limiar de Otsu, os componentes CIELab L e a em diferentes segmentações, bem como variáveis associadas ao brilho, à concentração e dispersão cromática e outros descritores derivados do processo de segmentação das imagens. Esse comportamento é frequentemente observado em dados provenientes de análise de imagens, uma vez que tendem a apresentar elevada variabilidade, assimetria e presença de valores extremos.

De forma geral, observou-se que 73 variáveis (Tabela suplementar) apresentaram distribuição normal, enquanto 25 não demonstraram aderência à normalidade, caracterizando o conjunto de dados como predominantemente não paramétrico — condição considerada comum em estudos multivariados aplicados à caracterização física de sementes por meio de imagens digitais.

A Análise de Componentes Principais (ACP) possibilitou a redução da dimensionalidade dos dados, permitindo identificar os principais eixos de variação associados às características físicas das cariopses. Trata-se de uma técnica multivariada que transforma variáveis originais correlacionadas em componentes ortogonais, ordenados conforme a proporção de variância explicada (Jolliffe, 2002; Hair *et al.*, 2009).

O primeiro componente principal explicou 18,63% da variância total, enquanto o segundo foi responsável por 14,05%, totalizando aproximadamente 33% da variabilidade dos dados (Figura 9). Em estudos baseados em análise de imagens, nos quais se emprega muitos descritores morfométricos, cromáticos e texturais, é comum que a variabilidade esteja distribuída entre múltiplas variáveis e, conseqüentemente, que os primeiros componentes concentrem percentuais moderados de variância (Jolliffe, 2002; Hair *et al.*, 2009).

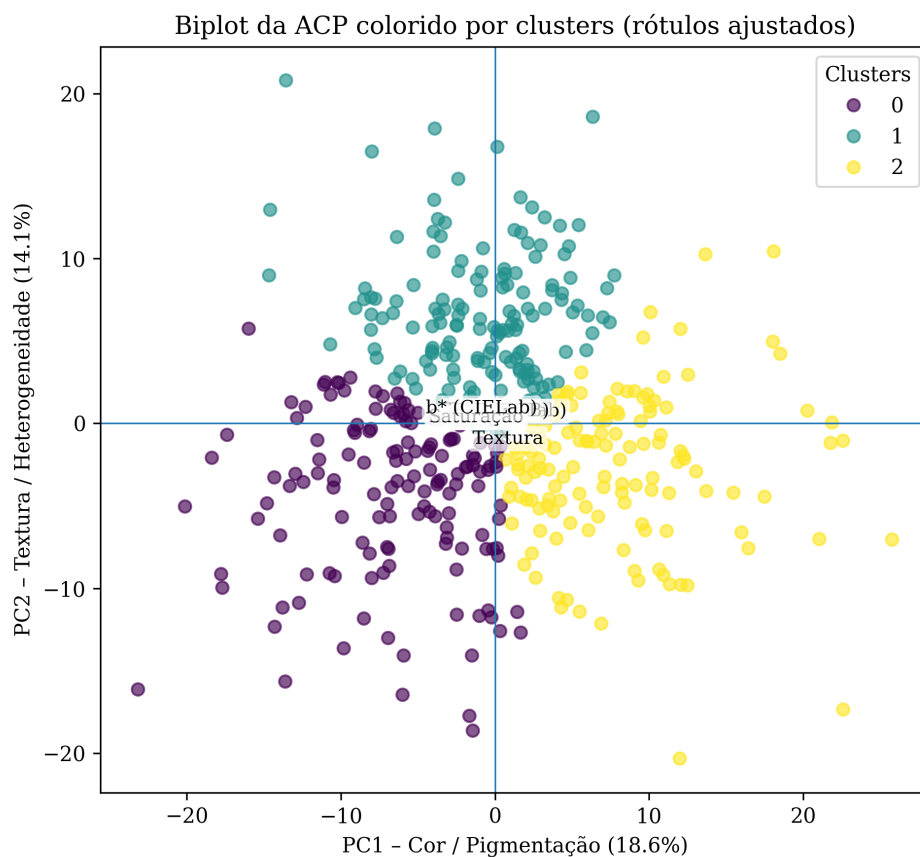


Figura 9. Biplot da Análise de Componentes Principais (ACP) das cariopses de capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.), com distribuição dos clusters baseada nos descritores de cor e textura.

O eixo PC1 representou um gradiente cromático associado principalmente à intensidade da pigmentação superficial das cariopses. Esse componente foi dominado pelos descritores relacionados à saturação cromática (C^*) e ao parâmetro b^* do sistema CIELab. Valores elevados de PC1 corresponderam a cariopses com maior intensidade de tonalidade amarelo-alaranjada, enquanto valores reduzidos estiveram associados a unidades com pigmentação menos intensa.

A saturação cromática (C^*) foi calculada a partir da magnitude combinada dos eixos a^* e b^* do sistema CIELab, conforme a equação:

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

Nessa equação, C^* representa a intensidade ou pureza da cor, independentemente da luminosidade. O parâmetro a^* corresponde ao eixo verde-vermelho, assumindo valores negativos para tonalidades verdes e positivos para tonalidades vermelhas. O parâmetro b^* corresponde ao eixo azul-amarelo, sendo valores negativos indicativos de tonalidade azulada e valores positivos associados a tonalidades amareladas.

Geometricamente, C^* corresponde à distância do ponto (a^* , b^*) à origem (0,0) no plano cromático a^*-b^* , desconsiderando o componente de luminosidade (L^*). Assim, quanto maior essa distância, maior a intensidade da cor. Valores elevados de saturação indicam pigmentação mais intensa, enquanto valores reduzidos indicam cores menos saturadas, mais próximas do cinza.

É importante destacar que saturação (C^*) não se confunde com luminosidade (L^*). A luminosidade mede o grau de clareza ou escurecimento da superfície, variando de 0 (preto) a 100 (branco), enquanto a saturação expressa exclusivamente a intensidade cromática, independentemente do brilho.

O componente b^* , por sua vez, integra o sistema CIELab, modelo amplamente utilizado em análises de imagens devido à sua uniformidade perceptual (OIV, 2006). No presente estudo, a predominância de valores positivos de b^* indica variação na intensidade do amarelo superficial das cariopses. Essa variação pode refletir diferenças no grau de maturação ou na composição do tegumento, fatores potencialmente associados à qualidade fisiológica (Abtahi *et al.*, 2022).

Já o PC2 esteve associado às variações texturais da superfície das cariopses, com forte contribuição da entropia. A entropia é um descritor estatístico derivado da matriz de coocorrência de níveis de cinza (GLCM), proposto por Haralick, Shanmugam e Dinstein (1973), e mede o grau de desordem na distribuição espacial dos pixels. Valores elevados indicam maior heterogeneidade tonal e maior irregularidade superficial, enquanto valores reduzidos indicam padrões mais homogêneos.

Nesse contexto, o segundo componente principal diferenciou as cariopses principalmente quanto às variações estruturais do tegumento visíveis na superfície da imagem. Ressalta-se que todos os descritores analisados neste estudo correspondem a atributos superficiais extraídos por imagem, não havendo mensuração direta de características internas. Assim, a variabilidade capturada pelo PC2 refere-se especificamente à heterogeneidade visual da superfície das cariopses.

A dispersão das cariopses no plano PC1 \times PC2 revelou distribuição contínua, sem formação de agrupamentos completamente isolados, mas com gradiente evidente associado à intensidade da pigmentação superficial. Com base nos agrupamentos ilustrados na Figura 9, evidencia-se a existência de variabilidade física no lote, demonstrando a sensibilidade da análise de imagens na diferenciação das cariopses.

Na análise de variância (ANAVA), foram observadas diferenças altamente significativas entre os grupos para todas as variáveis analisadas ($p < 0,001$), com maiores tamanhos de efeito para saturação, canais RGB e b^* , evidenciando que a intensidade

cromática superficial foi o principal fator responsável pela separação das cariopses (Tabela 1).

Tabela 1. Resumo da análise de variância (ANAVA) para os descritores físicos das cariopses de capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.).

Variável	p-valor	Efeito	Interpretação
Saturação	p<0,001	Alto	Forte contribuição para a separação dos grupos
Canais RGB	p<0,001	Alto	Indicaram elevada influência da pigmentação
Componente (CIELab)	b* p<0,001	Alto	Principal descritor associado à variabilidade cromática
Variáveis geométricas e texturais	p<0,001	Moderado	Atuação complementar na diferenciação das cariopses

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Com o teste de Kruskal–Wallis confirmou-se esses resultados, demonstrando que as diferenças permanecem robustas mesmo sem a suposição de normalidade.

Pelo teste de comparação de médias de Tukey, foram observadas diferenças pareadas significativas entre todos os grupos para o componente b*, com valores de p ajustados próximos de zero, reforçando a distinção estatística entre os grupos.

Para a variável entropia, entretanto, não houve diferença significativa entre os grupos caracterizados por baixa e média intensidade de pigmentação, indicando que a textura atua como fator complementar, mas não dominante na separação das cariopses.

Na análise por categorias de cor, sementes classificadas como laranjas apresentaram valores médios superiores de b* e saturação, confirmando a coerência da classificação visual.

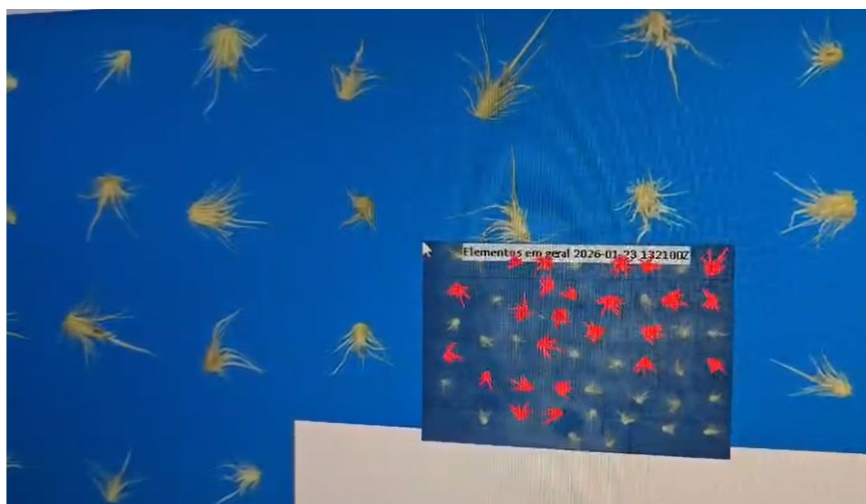


Figura 10. Cariopses de capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) em tela do Groundeye®, que mostra a identificação em vermelho das cariopses alaranjadas, que foram separadas para análise.

A variabilidade das cariopses de capim-buffel foi explicada principalmente pela intensidade da pigmentação superficial, especialmente associada ao componente b^* e à saturação cromática, sendo complementada por diferenças texturais relacionadas à heterogeneidade do tegumento. A combinação de descritores de cor e textura mostrou-se eficaz na diferenciação física das unidades avaliadas, permitindo a identificação de gradientes contínuos de variação no lote.

Entretanto, ressalta-se que, na ausência de germinação, não foi possível estabelecer correlação direta entre os descritores físicos e a viabilidade fisiológica das cariopses. Assim, embora os parâmetros cromáticos e texturais tenham demonstrado capacidade discriminatória, sua utilização como subsídio para tomada de decisão em controle de qualidade ou beneficiamento depende de validação adicional por meio de testes fisiológicos ou análises correlacionais.

Ainda assim, mesmo sem evidência de viabilidade germinativa, a análise de imagens permitiu identificar padrões estruturais relevantes e caracterizar a heterogeneidade intralote, evidenciando o potencial dessa abordagem como ferramenta complementar na triagem preliminar de sementes e na investigação de variabilidade física em estudos futuros.

5. CONCLUSÕES

A análise de imagens digitais permite identificar a variabilidade física entre as cariopses de capim-buffel, sendo os descritores de cor, especialmente o componente b^* , os principais responsáveis pela diferenciação das sementes. A textura, representada pela entropia, atua como variável complementar na caracterização do lote.

Existem padrões distintos entre as cariopses, evidenciando o potencial da abordagem multivariada para a classificação de sementes com base em atributos físicos.

Apesar da ausência de germinação, que impossibilitou a associação entre características físicas e viabilidade, a análise de imagens mostra-se eficiente para a caracterização objetiva das sementes. Assim, essa técnica apresenta potencial para auxiliar na triagem e no controle de qualidade de lotes de capim-buffel, sendo recomendados estudos futuros que integrem avaliações físicas e fisiológicas para ampliar a compreensão sobre o potencial de viabilidade das sementes.

6. REFERÊNCIAS

- ABTAHI, M.; RASHIDI, M.; GHASEMI-VARNAMKHAZI, M.; MOHTASEBI, S. S. Application of image processing techniques for seed quality evaluation: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, Amsterdam, v. 196, 106861, 2022.
- ASKER, S. E.; JERLING, L. *Apomixis in plants*. Boca Raton: CRC Press, 1992.
- BASKIN, C. C.; BASKIN, J. M. *Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination*. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2014.
- BEWLEY, J. D.; BRADFORD, K. J.; HILHORST, H. W. M.; NONOGAKI, H. *Seeds: physiology of development, germination and dormancy*. 3. ed. New York: Springer, 2013.
- BICKNELL, R. A.; KOLTUNOW, A. M. G. Understanding apomixis: recent advances and remaining conundrums. *The Plant Cell*, Rockville, v. 16, suppl. 1, p. S228–S245, 2004.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. *Regras para análise de sementes*. Brasília, 2025.
- FRIEDEL, M. H.; LANDSBERG, J.; SMITH, M. S. Buffel grass: both friend and foe. *The Rangeland Journal*, Melbourne, v. 33, n. 1, p. 91–101, 2011.
- HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. *Multivariate data analysis*. 7. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2009.
- HARALICK, R. M.; SHANMUGAM, K.; DINSTEN, I. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, New York, v. 3, n. 6, p. 610–621, 1973.
- HEMENDER, S.; MOR, V. S.; BHUKER, A. Image analysis: a modern approach to seed quality testing. *Current Journal of Applied Science and Technology*, v. 27, n. 2, p. 1–11, 2018.
- JOLLIFFE, I. T. *Principal component analysis*. 2. ed. New York: Springer, 2002.
- KOLTUNOW, A. M. G. Apomixis: embryo sacs and embryos formed without meiosis or fertilization in ovules. *The Plant Cell*, Rockville, v. 5, n. 10, p. 1425–1437, 1993.
- KOLTUNOW, A. M. G.; GROSSNIKLAUS, U. Apomixis: a developmental perspective. *Annual Review of Plant Biology*, Palo Alto, v. 54, p. 547–574, 2003.
- MARSHALL, V. M.; LEWIS, M. M.; OSTENDORF, B. Buffel grass (*Cenchrus ciliaris*) as an invader and threat to biodiversity in arid environments: a review. *Journal of Arid Environments*, London, v. 78, p. 1–12, 2012.
- NONOGAKI, H.; BASSEL, G. W.; BEWLEY, J. D. Germination—still a mystery. *Plant Science*, Amsterdam, v. 179, n. 6, p. 574–581, 2010.
- NOGLER, G. A. Gametophytic apomixis. In: JOHRI, B. M. (ed.). *Embryology of angiosperms*. Berlin: Springer, 1984. p. 475–518.

OIV – ORGANISATION INTERNATIONALE DE LA VIGNE ET DU VIN. *Chromatic characteristics (OIV-MA-AS2-11: R2006)*. Paris, 2006.

OLIVEIRA, A. R. et al. *Cultivo de capim-buffel no semiárido brasileiro*. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2023.

SANTIAGO, R.; CUADRA, R. Desempenho agronômico do capim-buffel em condições semiáridas. *Revista Brasileira de Zootecnia*, Viçosa, v. 46, n. 4, p. 321–329, 2017.

SILVA, A. R. et al. *Produção e qualidade de sementes de capim-buffel*. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2022.

USDA NRCS – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *The importance of seed quality for natural resource conservation*. Washington, 2022.

Tabela Suplementar. Variáveis avaliadas no Groundeye® e teste de normalidade (Shapiro–Wilk).

Variável	Distribuição	Critério
L*	Normal	p > 0,05
a*	Normal	p > 0,05
b*	Normal	p > 0,05
Saturação (C*)	Normal	p > 0,05
Matiz (h°)	Normal	p > 0,05
R médio	Normal	p > 0,05
G médio	Normal	p > 0,05
B médio	Normal	p > 0,05
R desvio padrão	Normal	p > 0,05
G desvio padrão	Normal	p > 0,05
B desvio padrão	Normal	p > 0,05
Índice de amarelo	Normal	p > 0,05
Índice de vermelho	Normal	p > 0,05
R/G	Normal	p > 0,05
R/B	Normal	p > 0,05
G/B	Normal	p > 0,05
Área	Normal	p > 0,05
Perímetro	Normal	p > 0,05
Comprimento	Normal	p > 0,05
Largura	Normal	p > 0,05
Diâmetro equivalente	Normal	p > 0,05
Razão comprimento/largura	Normal	p > 0,05
Circularidade	Normal	p > 0,05
Alongamento	Normal	p > 0,05
Compacidade	Normal	p > 0,05
Solidez	Normal	p > 0,05
Convexidade	Normal	p > 0,05
Retangularidade	Normal	p > 0,05
Excentricidade	Normal	p > 0,05
Fator de forma	Normal	p > 0,05
Entropia	Normal	p > 0,05
Contraste	Normal	p > 0,05
Homogeneidade	Normal	p > 0,05
Energia	Normal	p > 0,05
Correlação	Normal	p > 0,05
Variância	Normal	p > 0,05
Momento angular secundário	Normal	p > 0,05
Assimetria	Normal	p > 0,05
Curtose	Normal	p > 0,05
Desvio padrão da intensidade	Normal	p > 0,05
Amplitude tonal	Normal	p > 0,05
Rugosidade superficial	Normal	p > 0,05
Descritor_superficial_43	Normal	p > 0,05
Descritor_superficial_44	Normal	p > 0,05
Descritor_superficial_45	Normal	p > 0,05
Descritor_superficial_46	Normal	p > 0,05
Descritor_superficial_47	Normal	p > 0,05
Descritor_superficial_48	Normal	p > 0,05

