

ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MICROSCÓPICAS DE DIFERENTES VARIEDADES DE PALMA FORRAGEIRA

Kaique Augusto Almeida Chaves¹, Marcela Azevedo Magalhães², Kaliston Aurélio Lomba³, Franciele Maria Pelissari Molina⁴, Giselle Pereira Cardoso⁵

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), Diamantina, Minas Gerais, Brasil.
(kaique.augusto@ufvjm.edu.br)

²Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Faculdade de Ciências Agrárias (FCA), Diamantina, Minas Gerais, Brasil.

³Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), Diamantina, Minas Gerais, Brasil.

⁴Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), Diamantina, Minas Gerais, Brasil.

⁵Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), Diamantina, Minas Gerais, Brasil.

Resumo: Este estudo avaliou as propriedades físicas e microscópicas de quatro variedades de palma forrageira cultivadas em Diamantina - MG. Foram realizadas análises de textura, colorimetria e microscopia óptica dos cladódios. A Sertânia apresentou maior resistência à perfuração (4320,81 g), enquanto a Gigante apresentou maior força (0,846 MPa) e resistência à tração (0,063 MJ/m³). A colorimetria revelou diferenças significativas entre as variedades, e a microscopia evidenciou estômatos, fibras, mucilagem e possíveis cristais de oxalato de cálcio.

Palavras-chave: Colorimetria; microscopia metalográfica; *Opuntia ficus*; texturometria.

INTRODUÇÃO

A palma forrageira tem despertado crescente interesse científico devido à sua versatilidade e ao potencial de aplicação em diferentes setores. Tradicionalmente utilizada na alimentação animal, essa espécie vem sendo cada vez mais explorada na alimentação humana, na produção de alimentos funcionais, na indústria farmacêutica e cosmética, na obtenção de biomateriais, bem como na produção de biocombustíveis e em diversos processos agroindustriais. Sua elevada adaptação a ambientes semiáridos, associada à presença de compostos bioativos e ao seu valor nutricional, torna a palma uma matéria-prima promissora para o desenvolvimento de produtos sustentáveis e de alto valor agregado (Martins *et al.*, 2023; Monteiro *et al.*, 2023; Rodrigues *et al.*, 2023).

Pertencente à família *Cactaceae*, a palma (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.) é uma planta originária do México e amplamente distribuída em regiões áridas e semiáridas do mundo. Essa família compreende aproximadamente 178 gêneros e mais de 2.000 espécies (Oliveira *et al.*, 2025). Entre essas espécies, a palma forrageira destaca-se não apenas por sua reconhecida importância forrageira e elevada

resistência à escassez hídrica, mas também por suas múltiplas aplicações. Atualmente, seus cladódios, frutos e flores são empregados na indústria alimentícia para o desenvolvimento de alimentos funcionais, nutracêuticos e probióticos, além do consumo humano direto (Monteiro *et al.*, 2023; Rodrigues *et al.*, 2023). Já na indústria farmacêutica e cosmética, seus extratos ricos em compostos bioativos são utilizados em formulações voltadas ao tratamento de doenças crônicas, processos cicatriciais e cuidados com a pele (Martins *et al.*, 2023; Rodrigues *et al.*, 2023). A palma também apresenta relevância biotecnológica, sendo empregada na produção de biomateriais, corantes naturais, biogás, no tratamento de águas residuais e até mesmo na fabricação de materiais para a construção civil (Martins *et al.*, 2023; Monteiro *et al.*, 2023; Rodrigues *et al.*, 2023).

Considerando a grande diversidade de gêneros e espécies pertencentes à família *Cactaceae*, as variedades de palma forrageira apresentam diferenças em suas características físicas e físico-químicas, incluindo aspectos relacionados à cor, textura, composição e propriedades estruturais. Essas variações podem influenciar diretamente seu potencial de aplicação, tornando determinadas

variedades mais adequadas para aplicações específicas. Dessa forma, o conhecimento dessas propriedades é fundamental para a seleção da variedade mais apropriada aos fins desejados, contribuindo para o melhor aproveitamento de suas características tecnológicas e funcionais (Oliveira *et al.*, 2025; Chaves *et al.*, 2026).

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar as propriedades físicas e microscópicas de diferentes espécies de palma cultivadas no Setor de Forragicultura da FCA, no Campus JK da UFVJM, em Diamantina, MG.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram colhidos dois cladódios secundários de cada uma das quatro variedades de palma forrageira dos gêneros *Opuntia* e *Nopalea*: Gigante (*Opuntia ficus-indica*), Sertânia (*Nopalea cochenillifera* Salm-Dyck ou *Opuntia cochenillifera* Salm-Dyck), Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta* Haw) e Miúda (*Nopalea cochenillifera* Salm-Dyck ou *Opuntia cochenillifera*) (Figura 1). As palmas foram colhidas em maio de 2026 no Setor de Forragicultura da FCA, localizado no Campus JK da UFVJM, em Diamantina/MG, sendo a localização dos canteiros em latitude de 18°12'11.1"S e longitude de 43°34'23.8"O.

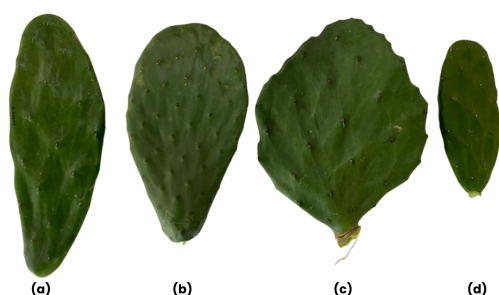


Figura 1. Cladódios dos gêneros de palmas estudadas. (a) Gigante (b) Sertânia (c) Orelha de Elefante Mexicana e (d) Miúda.

As palmas colhidas foram submetidas a análises físicas, incluindo avaliação da cor da polpa obtida dos cladódios, textura do cladódio e análises microscópicas da polpa e da casca. Para a análise de cor, a palma foi triturada integralmente em liquidificador até a obtenção de um gel viscoso. Em seguida, as análises foram realizadas em espectrofotômetro CM-5 Konica Minolta, com porta de abertura de 30 mm. Para o cálculo dos índices de cor foram utilizados o iluminante D65, ângulo do observador de 10°, reflectância especular excluída (RSEX) e o sistema de cor CIELAB. Foram determinados os parâmetros L* (luminosidade), a*

(vermelho-verde), b* (amarelo-azul), C* (cromaticidade) e h* (ângulo de tonalidade), além de brilho, comprimento de onda dominante, pureza e força da cor. A polpa (gel) foi acondicionada em placa de Petri e as leituras foram realizadas em triplicata para cada amostra (Figura 2), totalizando nove leituras por variedade de palma.



Figura 2. Análise colorimétrica do gel de palma forrageira em espectrofotômetro.

A análise de textura foi realizada em texturômetro TA.XT Plus da Stable Micro Systems, utilizando o programa computacional Exponent Connect. Foram conduzidos dois testes distintos nos cladódios: teste de perfuração, com o objetivo de avaliar a força necessária para perfurar os cladódios, e teste de tensão da casca, para avaliar a elasticidade da casca da planta (Figura 3). Para a análise de perfuração foi utilizada a probe P/5, com os seguintes parâmetros: modo de teste compressão, velocidade de teste de 1 mm/s e distância de perfuração de 30 mm. A perfuração foi realizada até a completa passagem da probe através do cladódio, sendo efetuadas medições em 15 pontos distribuídos ao longo da palma.

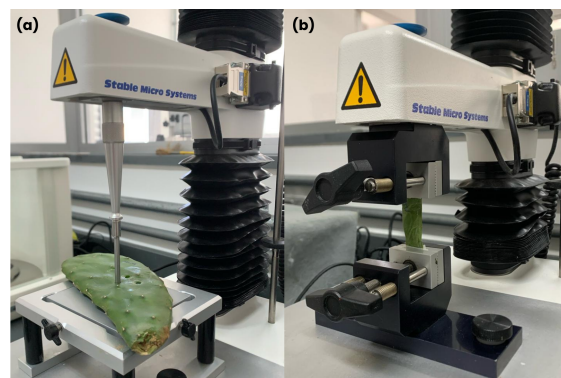


Figura 3. Análises de textura realizadas em palma forrageira: (a) teste de perfuração do cladódio com probe P/5; (b) teste de tensão da casca com probe A/TGR.

Para o teste de tensão da casca, foram realizados cortes de aproximadamente 6 cm de comprimento por 2 cm de largura. A polpa foi removida, permanecendo apenas a casca. Em seguida, os cortes da casca foram acondicionados em estufa de incubação BOD por 48 horas a 2 °C para secagem parcial. Posteriormente, utilizando a probe A/TGR e os parâmetros modo de teste tensão, velocidade de pré-teste de 1 mm/s, velocidade de teste de 2 mm/s, velocidade de pós-teste de 10 mm/s e distância de 40 mm entre as probes, realizou-se o teste de tensão até o ponto de ruptura da casca. As análises foram realizadas em triplicata para cada variedade.

Para a microscopia, foram preparados dois tipos de amostras: amostras da casca e da polpa da palma, para todas as variedades avaliadas. As amostras foram submetidas à observação em Microscópio Binocular Axio Scope.A1 (Carl Zeiss, Oberkochen, Alemanha), sendo realizadas análises com ampliações de 10x para análise de imagens. As análises superficiais e a caracterização microestrutural das cascas foram realizadas por meio de microscopia óptica metalográfica. Para a observação e captura das imagens das polpas, utilizou-se a técnica de microscopia por luz refletida.

Os dados obtidos nas análises de cor e textura foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa Statistical Analysis Systems (SAS), versão 9.2.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na análise de perfuração (Tabela 1) demonstram diferenças significativas entre as variedades avaliadas. A variedade Sertânia apresentou a maior força de perfuração (4320,808 g), indicando maior resistência à penetração da quando comparada às demais espécies. Além disso, apresentou a maior profundidade de perfuração (11,255 mm), evidenciando maior resistência à deformação antes da ruptura do tecido. Em contrapartida, as variedades Gigante (2610,563 g), Miúda (2029,557 g) e Orelha de Elefante Mexicana (2608,272 g) apresentaram valores de força de perfuração estatisticamente semelhantes entre si e inferiores aos observados para a Sertânia. Em relação à profundidade de perfuração, as variedades Gigante (2,5175 mm) e Miúda (3,55667 mm) apresentaram os menores valores, enquanto a Orelha de Elefante Mexicana (10,75 mm) apresentou comportamento semelhante ao da Sertânia, demonstrando maior capacidade de deformação antes da ruptura.

Tabela 1. Parâmetros de textura obtidos pelo teste de perfuração em diferentes variedades de palma forrageira.

Variedade	Força de perfuração (g)	Profundidade de perfuração (mm)
Gigante	2610,563 ^a	2,517 ^a
Miúda	2029,557 ^a	3,556 ^a
Sertânia	4320,808 ^b	11,255 ^b
Orelha de Elefante Mexicana	2608,272 ^a	10,750 ^b

Fonte: Autores, 2026

Médias nas colunas seguidas de letras distintas diferem entre si ao nível de significância de 5%.

A resistência à perfuração é um importante indicador da integridade estrutural dos tecidos vegetais, estando diretamente relacionada à composição e à organização da parede celular. Segundo Quintero-García *et al.* (2021), a presença de polissacarídeos estruturais, como celulose, hemicelulose e pectinas, influencia significativamente as propriedades mecânicas dos cladódios de palma, contribuindo para sua resistência à deformação e ruptura. Além disso, Procacci *et al.* (2021) destacam que a mucilagem presente nos cladódios atua como um hidrocolóide natural capaz de modificar as propriedades reológicas e mecânicas dos tecidos vegetais, aumentando sua capacidade de retenção de água e influenciando seu comportamento frente a esforços mecânicos.

Os resultados obtidos por Chaves *et al.* (2026) demonstram que as variedades avaliadas apresentam diferenças marcantes em suas propriedades físicas, evidenciando a influência da espécie sobre a estrutura dos cladódios. A superioridade da Sertânia quanto à força de perfuração sugere uma estrutura celular mais compacta e resistente, capaz de suportar maiores tensões antes da ruptura. Por outro lado, a elevada profundidade de perfuração observada tanto para a Sertânia quanto para a Orelha de Elefante Mexicana indica que essas variedades apresentam maior elasticidade tecidual, permitindo maior deformação antes da falha estrutural. Em contraste, os menores valores observados para Gigante e Miúda sugerem tecidos mais suscetíveis à ruptura sob aplicação de força.

Resultados semelhantes foram relatados por Bağırsakçı *et al.* (2025), que verificaram que a força de perfuração e a deformação dos cladódios constituem importantes indicadores da qualidade física e da integridade estrutural da palma forrageira. De forma complementar, Lahmidi *et al.* (2023)

observaram que diferenças anatômicas e físico-químicas entre variedades de *Opuntia* influenciam diretamente suas propriedades mecânicas. Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo indicam que a variedade Sertânia apresenta maior resistência mecânica à perfuração, enquanto a Orelha de Elefante Mexicana se destaca pela elevada capacidade de deformação, características que podem influenciar o comportamento dessas matérias-primas durante o processamento, armazenamento e desenvolvimento de novos produtos à base de palma forrageira.

Os resultados da análise de resistência da casca demonstraram diferenças significativas entre as variedades avaliadas (Tabela 2). A variedade Gigante apresentou a maior força de ruptura (0,846 MPa) e a maior resistência até a ruptura (0,063 MJ/m³), indicando maior capacidade de suportar tensões mecânicas antes da falha estrutural da casca. As variedades Sertânia (0,665 MPa), Orelha de Elefante Mexicana (0,554 MPa) e Miúda (0,530 MPa) apresentaram valores inferiores de força, diferindo estatisticamente entre si. Entretanto, para a resistência até a ruptura, as variedades Miúda (0,0266 MJ/m³), Sertânia (0,029833 MJ/m³) e Orelha de Elefante Mexicana (0,0276 MJ/m³) não diferiram estatisticamente, indicando comportamento semelhante quanto à capacidade de absorção de energia antes da ruptura da estrutura.

Tabela 2. Parâmetros de textura da casca obtidos pelo teste de tensão em diferentes variedades de palma forrageira.

Variedade	Força (MPa)	Resistência (MJ/m ³)
Gigante	0,846	0,063 ^a
Miúda	0,530	0,026 ^b
Sertânia	0,665	0,030 ^b
Orelha de Elefante Mexicana	0,554	0,027 ^b
<i>Média</i>	<i>0,665</i>	

Fonte: Autores, 2026

Médias nas colunas seguidas de letras distintas diferem entre si ao nível de significância de 5%.

A maior resistência mecânica observada para a variedade Gigante pode estar relacionada à composição e à organização dos tecidos dos cladódios. Segundo Koufan *et al.* (2024), as propriedades mecânicas da palma forrageira são fortemente influenciadas pela estrutura da parede celular, pelo conteúdo de fibras e pela organização dos polissacarídeos estruturais presentes nos tecidos vegetais. Além disso, a integridade estrutural dos cladódios está diretamente associada à presença de

mucilagem e de compostos péclicos, que contribuem para a coesão celular e para a resistência aos esforços mecânicos (Razzak *et al.*, 2024).

Embora as variedades Sertânia, Miúda e Orelha de Elefante Mexicana tenham apresentado menores valores de força, a semelhança observada na resistência até a ruptura sugere que essas variedades possuem capacidade semelhante de dissipar energia durante a deformação da casca. De acordo com Lahmidi *et al.* (2023), características anatômicas e o grau de desenvolvimento estrutural do cladódio influenciam diretamente suas propriedades físicas e mecânicas, resultando em distintos comportamentos frente à aplicação de tensões. Adicionalmente, estudos focados nos polissacarídeos da palma, como o de Arias Gorman *et al.* (2025), destacam que a distribuição e o arranjo desses componentes estruturais são altamente responsáveis por conferir resistência mecânica e robustez ao material.

Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo indicam que a variedade Gigante apresenta maior robustez estrutural da casca, enquanto as demais variedades apresentam menor resistência inicial à aplicação de força, porém comportamento semelhante quanto à absorção de energia até a ruptura. Essas diferenças demonstram a influência da espécie sobre as propriedades mecânicas da palma.

Os resultados obtidos na análise de cor (Tabelas 3, 4, 5 e 6) do gel das diferentes variedades de palma forrageira demonstraram diferenças significativas para todos os parâmetros colorimétricos analisados. Em relação à luminosidade (L*), a polpa da variedade Gigante apresentou o maior valor (44,54), indicando uma aparência mais clara, seguida pela Miúda (42,26), Orelha de Elefante Mexicana (37,67) e Sertânia (34,72), que apresentou a menor luminosidade. Segundo Arias Gorman *et al.* (2025), diferenças na luminosidade e no aspecto visual dos cladódios estão relacionadas à composição dos pigmentos fotossintéticos e às características genéticas de cada variedade.

Os valores negativos de a* observados em todas as amostras de gel (-14,11 a -12,59) indicam predominância de tonalidades verdes, característica típica da matriz interna da palma devido à elevada concentração de clorofilas. Por outro lado, os elevados valores positivos de b* (36,82 a 39,77) evidenciam a presença de tonalidades amareladas, resultando em uma coloração verde-amarelada característica das variedades avaliadas. De acordo com Lahmidi *et al.* (2023), a coloração dos tecidos processados de *Opuntia* é fortemente influenciada pela presença de clorofilas e carotenoides, compostos responsáveis pelos tons verdes e amarelos observados. Resultados semelhantes foram reportados por Bağırsakçı *et al.* (2025), que

observaram predominância de valores negativos de a^* e positivos de b^* em cladódios de *Opuntia ficus-indica*, confirmando a manutenção da coloração verde-amarelada mesmo após o processamento.

Tabela 3. Parâmetros de cor obtidos pela análise colorimétrica de diferentes variedades de palma forrageira.

Variedade	L^*	a^*	b^*
Gigante	44,54 ^a	-14,11 ^a	38,94 ^b
Miúda	42,25 ^b	-13,40 ^b	39,77 ^a
Sertânia	34,72 ^d	-12,69 ^c	36,82 ^d
Orelha de Elefante Mexicana	37,67 ^c	-12,59 ^d	38,72 ^c

Fonte: Autores, 2026

Médias nas colunas seguidas de letras distintas diferem entre si ao nível de significância de 5%.

Os valores de cromaticidade (C^*) variaram entre 38,95 e 41,97, indicando elevada saturação das cores no gel. A variedade Miúda apresentou o maior valor de C^* (41,97), enquanto a Sertânia apresentou o menor (38,95), sugerindo diferenças na intensidade visual dos pigmentos presentes na matriz triturada. Segundo Koufan *et al.* (2024), a intensidade da cor dos cladódios está diretamente relacionada à concentração de compostos bioativos, especialmente pigmentos fotossintéticos e antioxidantes naturais, que variam entre espécies e estágios de desenvolvimento.

Os valores do ângulo de tonalidade (h^*) oscilaram entre 108,01 e 109,92, permanecendo na faixa correspondente à transição entre o verde e o amarelo. Esse comportamento é característico de cladódios jovens e fisiologicamente ativos, nos quais a degradação da clorofila ainda é limitada.

Tabela 4. Parâmetros colorimétricos obtidos pela análise colorimétrica de diferentes palma forrageira.

Variedade	C^*	h^*	delta E
Gigante	41,4225 ^a	109,9175 ^a	5,03
Miúda	41,97 ^a	108,62 ^c	10,46
Sertânia	38,94833 ^c	109,0233 ^b	6,71
Orelha de Elefante Mexicana	40,718 ^b	108,014 ^d	4,09

Fonte: Autores, 2026

Médias nas colunas seguidas de letras distintas diferem entre si ao nível de significância de 5%.

Estudos demonstram que as alterações significativas nos parâmetros h^* e C^* estão diretamente associadas ao estágio de maturação e à composição bioquímica do tecido vegetal, uma vez que o envelhecimento dos cladódios promove a degradação dos pigmentos (Lahmidi, 2023).

Em relação aos atributos ópticos, observou-se que o gel da variedade Gigante apresentou maior brilho (3,53), enquanto a Sertânia apresentou o menor valor (1,60), indicando diferenças na capacidade de reflexão da luz pelas amostras avaliadas. O comprimento de onda dominante apresentou baixa variação entre as variedades (562,36 a 562,91 nm), situando-se na região espectral correspondente às tonalidades verde-amareladas. Os elevados valores de pureza da excitação observados para Sertânia (70,69) e Orelha de Elefante Mexicana (70,47) indicam maior pureza cromática, enquanto a Orelha de Elefante Mexicana apresentou a maior força da cor (82,54), refletindo maior intensidade visual da coloração do gel.

Tabela 5. Parâmetros obtidos pela análise colorimétrica de diferentes variedades de palma forrageira.

Variedade	Brilho	Comprimento de onda dominante
Gigante	3,53 ^a	562,36 ^b
Miúda	2,80 ^a	562,80 ^a
Sertânia	1,60 ^s	562,36 ^b
Orelha de Elefante Mexicana	1,93 ^c	562,90 ^a

Fonte: Autores, 2026

Médias nas colunas seguidas de letras distintas diferem entre si ao nível de significância de 5%.

Tabela 6. Parâmetros obtidos pela análise colorimétrica de diferentes variedades de palma forrageira.

Variedade	Pureza da excitação	Força
Gigante	63,98 ^c	77,15 ^b
Miúda	67,37 ^b	57,92 ^d
Sertânia	70,69 ^a	66,87 ^c
Orelha de Elefante Mexicana	70,47 ^a	82,53 ^a

Fonte: Autores, 2026

Médias nas colunas seguidas de letras distintas diferem entre si ao nível de significância de 5%.

A análise microscópica da superfície da casca das diferentes variedades de palma forrageira revelou diferenças estruturais na organização epidérmica, bem como na distribuição e evidência dos estômatos (Figura 4). Em todas as variedades avaliadas, foi possível observar estruturas compatíveis com estômatos distribuídos ao longo da epiderme, sendo estas mais evidentes na variedade Sertânia.

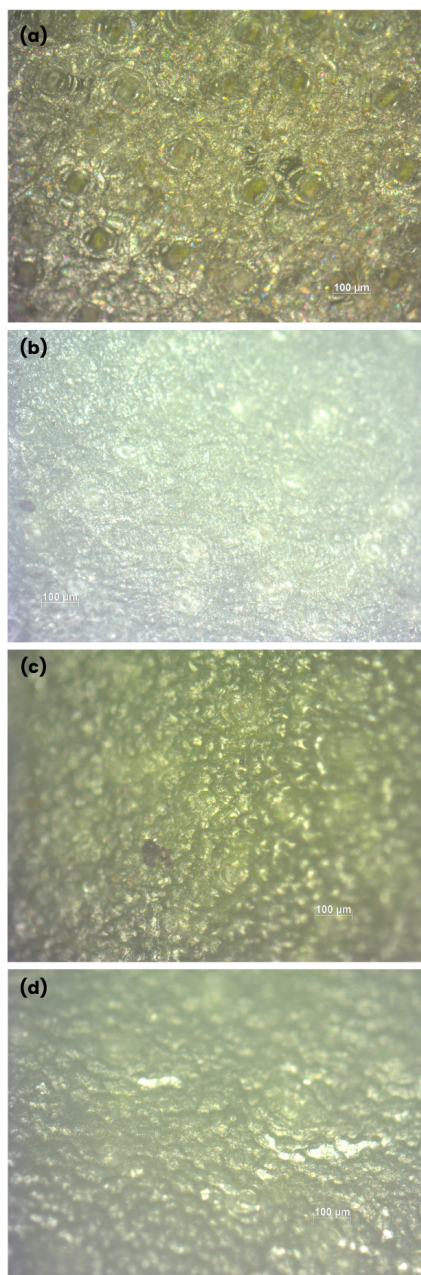


Figura 4. Micrografias da superfície da casca de diferentes variedades de palma forrageira obtidas em microscópio óptico com aumento de 10x. (a) Sertânia; (b) Orelha de Elefante Mexicana; (c) Miúda; (d) Gigante. Barra de escala = 100 µm.

Os estômatos constituem estruturas especializadas responsáveis pelas trocas gasosas entre a planta e o ambiente, desempenhando papel fundamental na regulação hídrica e fotossintética das cactáceas (Martins *et al.*, 2023). Além da presença dos estômatos, observou-se variação na textura superficial entre as variedades avaliadas. Algumas apresentaram superfície mais rugosa e irregular, enquanto outras exibiram aspecto mais homogêneo e liso. Essas diferenças podem estar relacionadas à espessura da cutícula, ao grau de deposição de ceras epicuticulares e à organização das células epidérmicas. Segundo Arias Gorman *et al.* (2025), a cutícula das cactáceas desempenha importante função protetora, atuando como barreira física contra a perda excessiva de água e contra agentes externos, sendo considerada uma das principais adaptações estruturais dessas espécies aos ambientes áridos e semiáridos. A presença de superfícies mais rugosas pode indicar maior desenvolvimento de estruturas epidérmicas e depósitos cuticulares, características frequentemente associadas à redução da transpiração e ao aumento da resistência ao estresse ambiental. Por outro lado, superfícies mais lisas podem estar relacionadas a diferenças genéticas entre as variedades ou a estágios distintos de desenvolvimento dos cladódios (Koufan *et al.*, 2024). Os resultados observados corroboram estudos anatômicos realizados com palmas forrageiras, os quais descrevem uma epiderme constituída por células compactamente organizadas, revestidas por uma camada cuticular que atua na redução da perda de água e contendo estômatos distribuídos na superfície dos cladódios. Essas características anatômicas desempenham papel fundamental na conservação hídrica e na adaptação das cactáceas às condições de deficiência de água, favorecendo sua sobrevivência e produtividade em ambientes semiáridos (Koufan *et al.*, 2023; Arias Gorman *et al.*, 2025).

Os resultados obtidos por microscopia óptica da polpa das diferentes variedades de palma forrageira evidenciaram uma estrutura heterogênea composta por fibras vegetais, partículas dispersas, agregados celulares e formações cristalinas distribuídas na matriz mucilaginosa (Figura 5). A presença dessas estruturas demonstra a complexidade microestrutural dos cladódios, que são constituídos por elevados teores de água, fibras alimentares, mucilagem e compostos minerais.

Foram observadas numerosas estruturas alongadas e transparentes, muitas delas organizadas em feixes ou agrupamentos. Essas estruturas podem estar associadas a fibras vegetais provenientes da parede celular e dos tecidos vasculares dos cladódios. Segundo Arias Gorman *et al.* (2025), os cladódios de

palma apresentam quantidades significativas de fibras insolúveis, compostas principalmente por celulose, hemicelulose e pectinas estruturais, responsáveis pela sustentação dos tecidos e pela elevada capacidade de retenção de água. A presença dessas fibras contribui diretamente para as propriedades funcionais e tecnológicas da palma, especialmente quanto à viscosidade e estabilidade de sistemas alimentares.

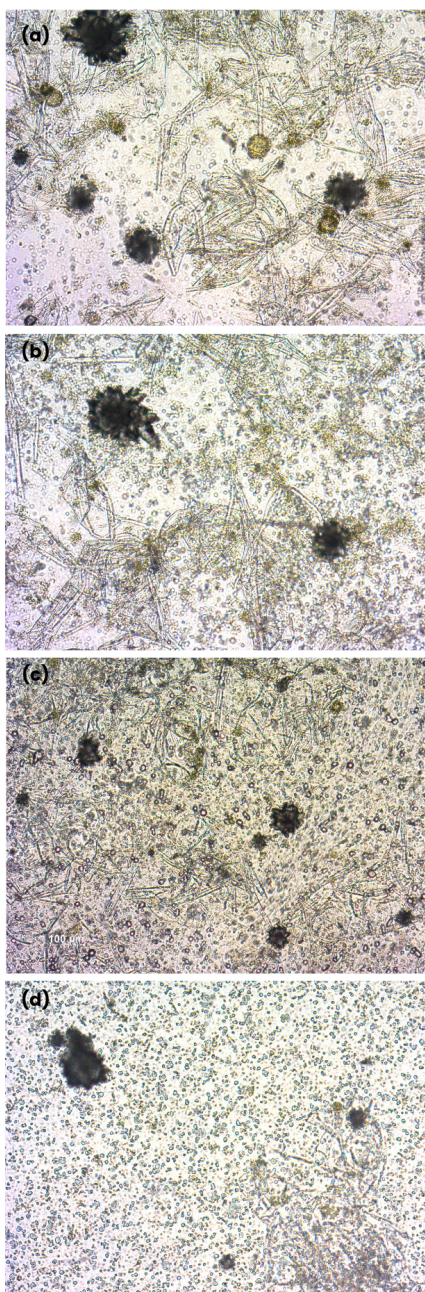


Figura 5. Micrografias do gel de diferentes variedades de palma forrageira obtidas por microscopia óptica com aumento de 10x. (a) Sertânia; (b) Orelha de Elefante Mexicana; (c) Miúda; (d) Gigante. Barra de escala = 100 μm .

Também foram observadas formações cristalinas com aspecto acicular e agrupamentos organizados em estruturas semelhantes a feixes ou rosetas. Essas estruturas são compatíveis com cristais de oxalato de cálcio, frequentemente encontrados em espécies dos gêneros *Opuntia* e *Nopalea* (Martins *et al.*, 2023). Koufan *et al.* (2024) relatam que os cladódios apresentam diferentes formas de biominerais de cálcio distribuídos nos tecidos vegetais, desempenhando funções relacionadas ao equilíbrio mineral da planta, armazenamento de cálcio e mecanismos de defesa contra herbívoros. A elevada presença dessas estruturas nas micrografias sugere que parte dos cristais permaneceu dispersa no gel após o processamento das amostras.

Os pequenos agregados amarelados observados na preparação podem estar relacionados à presença de fragmentos celulares contendo pigmentos vegetais, como clorofilas e carotenoides, ou ainda a regiões de concentração de mucilagem associadas a resíduos celulares. Estudos recentes demonstram que a mucilagem da palma é composta por polissacarídeos complexos capazes de formar sistemas coloidais altamente hidratados, favorecendo a retenção de partículas e compostos intracelulares dispersos na matriz (Arias Gorman *et al.*, 2025; Koufan *et al.*, 2024). Dessa forma, a coloração amarelada observada pode ser decorrente da associação entre pigmentos naturais e material mucilaginoso liberado durante a trituração do cladódio.

Além disso, foram observadas estruturas escuras e irregulares distribuídas pela amostra. Embora a microscopia óptica não permita sua identificação precisa, essas formações podem estar relacionadas a agregados de compostos fenólicos, concentrações localizadas de mucilagem ou fragmentos celulares mais densos provenientes do tecido vegetal. Segundo Benhissoune *et al.* (2022), os cladódios de cactáceas apresentam quantidades expressivas de compostos fenólicos e metabólitos secundários que podem permanecer associados à matriz vegetal após o processamento, formando agregados visíveis ao microscópio.

De maneira geral, as micrografias demonstram que o gel da palma forrageira apresenta uma microestrutura complexa composta por fibras vegetais, mucilagem, possíveis cristais minerais e partículas celulares dispersas. Essa organização estrutural está diretamente relacionada às propriedades tecnológicas da palma, especialmente sua elevada viscosidade, capacidade de retenção de água e potencial aplicação como ingrediente funcional na indústria alimentícia e farmacêutica. As diferenças observadas entre as variedades podem refletir variações genéticas na composição dos cladódios, particularmente quanto

aos teores de fibras, mucilagem e constituintes minerais.

CONCLUSÃO

Conclui-se que as diferentes variedades de palma forrageira avaliadas apresentam diferenças significativas em seus parâmetros de textura e cor, evidenciando a influência do genótipo sobre as propriedades físicas dos cladódios. A variedade Sertânia destacou-se pela maior resistência à perfuração, enquanto a variedade Gigante apresentou maior resistência mecânica da casca. Em relação à colorimetria, todas as variedades apresentaram predominância de tonalidades verde-amareladas, porém com diferenças significativas nos parâmetros avaliados. Por outro lado, as análises microscópicas revelaram características estruturais semelhantes entre as variedades, com presença de estômatos na epiderme, fibras vegetais, estruturas compatíveis com cristais de oxalato de cálcio, partículas celulares e mucilagem dispersas na matriz do gel. Dessa forma, embora existam diferenças físicas entre as variedades, suas características microscópicas mostraram-se relativamente semelhantes, refletindo a organização estrutural típica dos cladódios de palma forrageira.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo financiamento do projeto APQ-04646-25; ao Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (ICT/UFVJM), pelo apoio institucional; e ao Laboratório de Matérias-Primas e Análises Físicas (LabMAFIS), pela infraestrutura disponibilizada para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ARIAS GORMAN, A. M.; MONZON, C. M.; LA CAVA, E. L.; SGROPPO, S. C. Interesting properties of *Opuntia*'s cladodes: an updated review. *International Journal of Food Science and Technology*, [S. l.], v. 60, n. 1, e-vvaf046, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1093/ijfood/vvaf046>.

BENHISSOUNE, S. *et al.* Nutritional composition, phytochemical profile and biological activities of cactus pear cladodes: a review. *Plants*, [S. l.], v. 11, n. 21, p. 2903, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11212903>.

CHAVES, K. A. A. *et al.* Estudo das propriedades físicas de diferentes variedades de palma forrageira *in natura*. In: SCHMIELE, M.; LIMA, R. R.; BENASSI, V. M. (org.). *Ebook do V SICIAL – Simpósio de Ciência e Tecnologia de Alimentos*:

Produção de alimentos na era digital: soluções tecnológicas para o futuro. Diamantina:

UFVJM/Even3, 2026. Disponível em:

<https://www.even3.com.br/ebook/v-sicial-simposio-ciencia-tecnologia-alimentos/1543500-ESTUDO-DAS-PROPRIEDADES-FISICAS-DE-DIFERENTES-VARIETADES-DE-PALMA-FORRAGEIRA-IN-NATURA>. Acesso em: 14 jul. 2026.

KOUFAN, M.; CHOUKRANE, B.; MAZRI, M. A. Structure-function relationships and health-promoting properties of the main nutraceuticals of the cactus pear (*Opuntia* spp.) cladodes: a review. *Molecules*, [S. l.], v. 29, n. 19, p. 4732, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules29194732>.

LAHMIDI, S.; HOMRANI BAKALI, A.; HARRAK, H. Physical and physicochemical characteristics, bioactive compounds, and antioxidant activity of cladodes from erect prickly pear *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. *Journal of Food Quality*, [S. l.], v. 2023, p. 3028552, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/3028552>.

MARTINS, M.; RIBEIRO, M. H.; ALMEIDA, C. M. M. Physicochemical, nutritional, and medicinal properties of *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. and its main agro-industrial use: a review. *Plants*, [S. l.], v. 12, n. 7, p. 1512, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12071512>.

MONTEIRO, S. S. *et al.* New functional foods with cactus components: sustainable perspectives and future trends. *Foods*, [S. l.], v. 12, n. 13, p. 2494, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12132494>.

OLIVEIRA, B. P. M. *et al.* Caracterização morfológica de acessos de palma forrageira dos gêneros *Opuntia* e *Nopalea*. *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, Curitiba, v. 23, n. 12, p. 1-22, 2025. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv23n12-154>.

RAZZAK, S. *et al.* Nutritional composition, functional and chemical characterization of Moroccan *Opuntia ficus-indica* cladode powder. *International Journal of Food Properties*, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 1167-1179, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2024.2382877>.

RODRIGUES, C. *et al.* *Opuntia* spp.: an overview of the bioactive profile and food applications of this versatile crop adapted to arid lands. *Foods*, [S. l.], v. 12, n. 7, p. 1465, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12071465>.