



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS  
CURSO DE FARMÁCIA

RAYANA FALCÃO LIMA RÉGIS

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE NANOEMULSÃO DE ÓLEO DE  
CASCA DE PUPUNHA (*Bactris gasipaes*)**

RECIFE

2025

RAYANA FALCÃO LIMA RÉGIS

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE NANOEMULSÃO DE ÓLEO DE  
CASCA DE PUPUNHA (*Bactris gasipaes*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Farmácia da Universidade Federal de  
Pernambuco como requisito parcial para obtenção  
do título de Bacharel em Farmácia.

**Orientador(a):** Prof. Dr. Pedro José Rolim  
Neto

**Coorientador(a):** Dra. Larissa Pereira Alves

RECIFE

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Régis, Rayana Falcão Lima.

Desenvolvimento e caracterização de nanoemulsão de óleo de casca de pupunha (*Bactris gasipaes*). / Rayana Falcão Lima Régis. - Recife, 2025.  
52 : il., tab.

Orientador(a): Pedro José Rolim Neto

Coorientador(a): Larissa Pereira Alves

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências da Saúde, Farmácia - Bacharelado, 2025.  
10.

Inclui referências.

1. Tecnologia Farmacêutica. 2. Nanotecnologia. 3. Caracterização . I. Neto, Pedro José Rolim. (Orientação). II. Alves, Larissa Pereira. (Coorientação). IV. Título.

540 CDD (22.ed.)

RAYANA FALCÃO LIMA RÉGIS

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE NANOEMULSÃO DE ÓLEO DE CASCA  
DE PUPUNHA (*Bactris gasipaes*)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Farmácia da Universidade Federal de  
Pernambuco como requisito parcial para obtenção  
do título de Bacharel em Farmácia.

Aprovado em: 15/08/2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Pedro José Rolim Neto (Orientador)**

**Universidade Federal de Pernambuco**

---

**Mestrando João Guilherme Sabino da Silva**

**Universidade Federal de Pernambuco**

---

**Dra. Laysa Creusa Paes Barreto Barros Silva**

**Universidade Federal de Pernambuco**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a Deus, pela presença constante em minha caminhada e pela força que a fé sempre me proporcionou. À minha família, em especial à minha mãe Rosimar, meu pai Rogério, meus irmãos Rayssa, Otávio e Bil, meu namorado Rafael e minhas tias Rosane, Rilda e Elvira, pelo amor e apoio incondicional. Ao meu orientador, professor Pedro Rolim, e à minha coorientadora, Larissa, pela orientação, paciência e incentivo ao longo desta jornada. A todos do LTM (Laboratório de Tecnologia dos Medicamentos), em especial à Laysa e Natália, pela ajuda e acolhimento desde o início. Aos amigos de graduação, especialmente Andrezza, Eric, Luara, Antonya, Clara e Manu, pela amizade e companheirismo em tantos momentos. E a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, deixo o meu sincero agradecimento.

## RESUMO

O desenvolvimento de sistemas nanoestruturados com insumos naturais tem se mostrado uma estratégia promissora para a formulação de produtos farmacêuticos inovadores. Este estudo experimental teve como objetivo desenvolver e caracterizar uma nanoemulsão a partir do óleo da casca de pupunha (*Bactris gasipaes*), espécie nativa da região amazônica. Inicialmente, avaliou-se a compatibilidade do óleo com os tensoativos não iônicos Span® 80 e Tween® 80 por meio de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), que demonstrou preservação dos grupos funcionais e ausência de interações químicas relevantes. Em seguida, determinou-se o equilíbrio hidrofílico-lipofílico (EHL) e elaboraram-se nove formulações, variando-se a proporção entre os tensoativos, sendo o sistema preparado por inversão de fases assistida por ultrassom. As formulações foram avaliadas quanto ao aspecto macroscópico, estabilidade à centrifugação, tamanho de gotículas, índice de polidispersão e potencial zeta. As três formulações mais estáveis foram selecionadas para análise térmica por termogravimetria (TG), em fase de finalização. Os resultados indicam que o óleo da pupunha é compatível com sistemas emulsionados e apresenta potencial para aplicações tópicas, destacando-se como alternativa sustentável e funcional no desenvolvimento farmacotécnico.

**Palavras-chave:** *Bactris gasipaes*; óleo vegetal; nanoemulsão; caracterização físico-química; estabilidade.

## ABSTRACT

The development of nanostructured systems using natural raw materials has proven to be a promising strategy for the formulation of innovative pharmaceutical products. This experimental study aimed to develop and characterize a nanoemulsion based on the oil extracted from the peel of pupunha (*Bactris gasipaes*), a native Amazonian species. Initially, the compatibility of the oil with the nonionic surfactants Span® 80 and Tween® 80 was evaluated through Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), which demonstrated the preservation of functional groups and the absence of significant chemical interactions. Subsequently, the hydrophilic-lipophilic balance (HLB) was determined and nine formulations were prepared, varying the proportions of the surfactants. The nanoemulsions were produced using phase inversion assisted by ultrasound. The formulations were evaluated for macroscopic characteristics, centrifugation stability, droplet size, polydispersity index, and zeta potential. The three most stable formulations were selected for thermal analysis by thermogravimetry (TG), which is still in progress. The results indicate that pupunha oil is compatible with emulsion systems and shows potential for topical applications, standing out as a sustainable and functional alternative in pharmaceutical development.

**Keywords:** *Bactris gasipaes*; vegetable oil; nanoemulsion; physicochemical characterization; stability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 –</b>	Distribuição da <i>Bactris gasipaes Kunth</i> na América Central e América do Sul tropicais.	17
<b>Figura 2 –</b>	Morfologia da <i>Bactris gasipaes Kunth</i> .	21
<b>Figura 3 –</b>	Esquema de emulsão O/A vs. nanoemulsão com setas explicativas.	26
<b>Figura 4 –</b>	Localização do ponto de coleta	29
<b>Figura 5 –</b>	Espectro de infravermelho dos componentes isolados da nanoemulsão.	35
<b>Figura 6 –</b>	Espectro de infravermelho das misturas dos componentes da nanoemulsão.	37
<b>Figura 7 –</b>	Curvas de Tg das substâncias isoladas, misturas binárias e ternárias.	40
<b>Figura 8 –</b>	Formulações para cálculo do EHL após 24h.	42
<b>Figura 9 –</b>	Tamanho médio de partícula e PDI da nanoemulsão obtidos por DLS.	44
<b>Figura 10 –</b>	Potencial zeta da nanoemulsão avaliado por análise eletroforética.	45



## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1 –</b>	Determinação do EHL do óleo da casca da pupunha.	32
<b>Tabela 2 –</b>	Características desenvolvidas para determinar o EHL.	41

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1 –</b>	Nomes populares da <i>Bactris gasipaes</i> segundo a região.	18
-------------------	--	----

## LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ATR	Reflectância Total Atenuada
DLS	Dispersão Dinâmica de Luz
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
EHL	Equilíbrio Hidrofílico-Lipofílico
EHLA	EHL do Tensoativo Hidrofílico
EHLB	EHL do Tensoativo Lipofílico
EHLf	EHL Final da Emulsão
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
PDI	Índice de Polidispersão
PPO	Polifenoloxidase
TG	Termogravimetria

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
±	Mais ou menos
°C	Grau Celsius (temperatura)
cm <sup>-1</sup>	Número de onda (frequência no FTIR)
g·L <sup>-1</sup>	Gramas por litro
nm	Nanômetro
Rpm	Rotações por minutos
v/v	Volume por volume

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 OBJETIVOS .....	16
1.2 Objetivo geral .....	16
1.2.1 Objetivos específicos .....	16
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 ORIGEM, DOMESTICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DA <i>Bactris gasipaes</i> .....	17
2.2 CARACTERÍSTICAS BOTÂNICAS E TAXONOMIA DA PUPUNHA .....	19
2.2.1 Estrutura Reprodutiva e Diversidade Genética.....	19
2.2.2 Morfologia dos frutos e potencial bioativo da casca .....	20
2.3 APROVEITAMENTO AGROINDUSTRIAL DA PUPUNHA E SEUS RESÍDUOS BIOATIVOS.....	21
2.3.1 Sustentabilidade e economia circular no aproveitamento da pupunha .....	22
2.3.2 Composição funcional da Casca de Pupunha .....	23
2.4 ÓLEO BIOATIVO DA CASCA DA PUPUNHA: EXTRAÇÃO E POTENCIAL TECNOLÓGICO.....	23
2.5 NANOTECNOLOGIA FARMACÊUTICA E SISTEMAS NANOESTRUTURADOS	24
2.5.1 Nanoemulsões: Conceito e propriedades físico-químicas .....	25
2.5.2 Tensoativos e equilíbrio hidrofílico-lipofílico (EHL) .....	26
2.5.3 Métodos de Preparo de Nanoemulsões .....	27
2.5.4 Avaliação físico-química de nanoemulsões.....	27
2.5.5 Técnicas instrumentais de caracterização .....	28
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
3.1 MATERIAL VEGETAL .....	29
3.2 MÉTODOS .....	30
3.2.1 ESTUDO DE COMPATIBILIDADE FRENTE A EXCIPIENTES .....	30

3.2.1.1 Espectroscopia por absorção na região do infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....	30
3.2.1.2 Estudos de Análise Térmica.....	31
3.2.2 PREPARO DA EMULSÃO .....	31
3.2.2.1 Equilíbrio hidrófilo lipofílico .....	31
3.2.2.2 Análise macroscópica .....	32
3.2.2.3 Centrifugação .....	32
3.2.2.4 Medições de potencial Zeta, Índice de polidispersão e Tamanho de gotícula.....	33
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>34</b>
4.1 ESTUDO DE COMPATIBILIDADE FRENTE AOS EXCIPIENTES .....	34
4.1.1 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier – FTIR .....	34
4.1.2 Análise termogravimétrica (TG).....	38
4.2 PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO DAS FORMULAÇÕES .....	40
4.2.1 Determinação do EHL .....	40
4.2.2 Avaliação macroscópica em repouso (T0) .....	42
4.2.3 Avaliação sob estresse mecânico (centrifugação) .....	42
4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA NANOEMULSÃO.....	43
4.3.1 Determinação do tamanho de partícula, índice de polidispersão e potencial zeta.....	43
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A pupunha (*Bactris gasipaes Kunth*) é uma palmeira da família Arecaceae, originária da região amazônica, amplamente cultivada tradicionalmente para palmito e frutos. Seu consumo remonta a práticas alimentares e medicinais de populações indígenas e ribeirinhas, valorizadas por seu elevado valor nutricional e ampla aplicação (Santos *et al.*, 2022).

O fruto é fonte significativa de carboidratos (maioria amilácea), lipídios (5-23 %, com alta proporção de ácidos graxos insaturados), proteínas ( $\approx 2,5$ –4,8 %), fibras e  $\beta$ -caroteno (pró-vitamina A), o que justifica seu interesse crescente na alimentação humana e na indústria de produtos naturais (Moreira-Oliveira *et al.*, 2024; Spacki *et al.*, 2022; Carvalho *et al.*, 2013)

Apesar do amplo cultivo e relevância econômica da pupunha, observa-se que uma grande quantidade de seus subprodutos, como a casca e a polpa remanescente do processamento, são frequentemente descartados. Tal descarte representa um desperdício de biomassa vegetal com elevado potencial bioativo e agrava os impactos ambientais da agroindústria. Nesse sentido, surge a necessidade de estratégias que promovam o reaproveitamento desses resíduos de forma eficiente e sustentável (Spacki *et al.*, 2022).

Estudos recentes indicam que a casca da pupunha é fonte de diversos compostos fitoquímicos de interesse farmacológico, como ácidos graxos essenciais, carotenoides e polifenóis. Esses constituintes estão relacionados a propriedades antioxidantes, antimicrobianas e anti-inflamatórias, tornando o óleo extraído dessa parte do fruto uma alternativa viável para o desenvolvimento de formulações cosméticas e terapêuticas (Santos *et al.*, 2022).

A caracterização físico-química do óleo de pupunha tem confirmado sua estabilidade e compatibilidade com sistemas emulsionados, além de apontar um perfil lipídico adequado para aplicações tópicas. Essas propriedades reforçam seu potencial como excipiente funcional ou ativo em formulações farmacêuticas inovadoras (Santos *et al.*, 2022)

Diante desse cenário, a nanotecnologia surge como uma abordagem eficaz para a incorporação de óleos vegetais bioativos, como o da pupunha, em sistemas de liberação controlada. As nanoemulsões, em particular, são sistemas estáveis, capazes de encapsular compostos lipofílicos, aumentar sua solubilidade e biodisponibilidade, e prolongar sua ação no local de aplicação, com potencial de atuação em áreas como dermatologia, fitoterapia e cosmética (Santos *et al.*, 2022; Giombelli *et al.*, 2020).

Além disso, o uso da casca da pupunha como matéria-prima para formulações nanotecnológicas contribui para a valorização de resíduos agrícolas, integrando princípios da economia circular e da sustentabilidade ambiental. Dessa forma, novas possibilidades se abrem

para o fortalecimento da agroindústria por meio da inovação científica e tecnológica (Spacki *et al.*, 2022).

Neste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento e a caracterização de uma nanoemulsão à base de óleo de casca de pupunha, com vistas à avaliação de suas propriedades físico-químicas e à sua aplicação potencial em produtos farmacotécnicos. A investigação busca não apenas validar as características do óleo como ativo biofuncional, mas também promover o reaproveitamento de subprodutos vegetais como estratégia para inovação sustentável no setor de fitofármacos e cosméticos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.2 Objetivo geral

Desenvolver e caracterizar uma nanoemulsão à base de óleo extraído da casca de pupunha (*Bactris gasipaes*).

#### 1.2.1 Objetivos específicos

- Avaliar a compatibilidade do óleo com tensoativos não iônicos por meio de espectroscopia infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e análise termogravimétrica (TG);
- Determinar o equilíbrio hidrofílico-lipofílico (EHL) ideal para formação da nanoemulsão;
- Caracterizar físico-quimicamente a nanoemulsão desenvolvida, determinando tamanho médio das gotículas, índice de polidispersão (PDI) e potencial zeta..

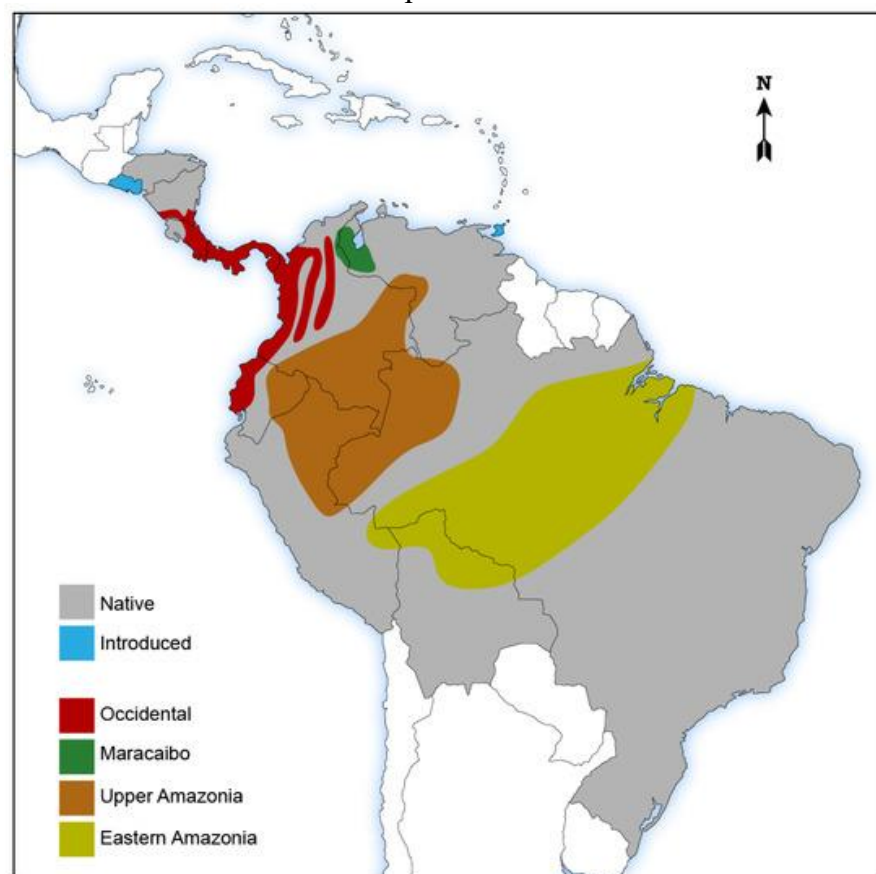


## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ORIGEM, DOMESTICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DA *Bactris gasipaes*

A *Bactris gasipaes* Kunth é uma palmeira tropical pertencente à família Arecaceae, amplamente cultivada na região amazônica. Considerada uma planta domesticada, acredita-se que sua origem esteja relacionada aos povos indígenas da América do Sul, especialmente da região que compreende o atual território do Brasil, Peru, Colômbia e Equador. Ao longo dos séculos, essa palmeira passou por processos seletivos naturais e culturais, dando origem às variedades cultivadas conhecidas atualmente (Galluzzi *et al.*, 2015; González-Jaramillo *et al.*, 2022).

Figura 1 - Distribuição da *Bactris gasipaes* Kunth na América Central e América do Sul tropicais.



Fonte: González-Jaramillo *et al.*, 2022.

Evidências arqueológicas e etnobotânicas indicam que a domesticação da pupunha ocorreu há cerca de 4.000 anos, com forte valorização de seus atributos nutricionais e simbólicos. Os frutos eram amplamente consumidos e considerados fonte importante de

energia, enquanto as demais partes da planta eram empregadas em práticas medicinais, culturais e econômicas pelos povos originários. Relatos de cronistas espanhóis do século XVI destacam sua relevância na dieta e nos costumes das comunidades mesoamericanas, revelando um uso tradicional consolidado e multifuncional (González-Jaramillo *et al.*, 2022).

O cultivo da pupunha concentra-se na produção de palmito e frutos, sendo uma das poucas palmeiras totalmente domesticadas nas Américas com finalidades alimentares. A espécie apresenta alta adaptabilidade a diferentes solos e climas tropicais, o que favoreceu sua disseminação por países da América Central e do Sul. Foi também introduzida na Oceania e em partes da Ásia como alternativa sustentável a outras palmeiras predadoras, e seu crescimento cespitoso facilita práticas agroflorestais (Galluzzi *et al.*, 2015; González-Jaramillo *et al.*, 2022).

Quadro 1 – Nomes populares da *Bactris gasipaes* segundo a região.

País	Nomes Comuns
Brasil	<i>Papunha; Pupunha; Pupunheira; Popunha</i>
Bolívia	Chonta; Palma de Castilla; Tembe; Chima; Anua; Mue; Huanima; Pupuría; Tembi; Eat; Tempe
Colômbia	Cachipay; Chantaduro; Chenga; Chonta; Chontaduro; Chichagai; Pijiguay; Pupunha; Pupurá; Pejibá; Jijirre; Macanilla; Contaurro; Have; Pípip
Costa Rica	Pejibaye; Pejivalle
Equador	Chonta; Chonta dura; Chontaduro; Chonta palm; Palmito; Chantaduro; Puka chunta; Shalin chuntá
Guiana	Paripe; Parepon
Peru	<i>Chonta; Ruru; Pejwao; Pifuao; Chonta Duro; Joó; Uyaj; Mee; Pijuao; Pisho-Guayo; Sara-Pifuao</i>
Suriname	Amana; Paripe; Paripoe
Venezuela	Bobí; Cachipaes; Macana; Peach; Pijiguao; Pixabay; Rancanilla; Gachipaes; Pichíguao; Piriguao; Cachipay; Pachigaro

Fonte: Adaptado de González-Jaramillo *et al.*, 2022.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS BOTÂNICAS E TAXONOMIA DA PUPUNHA

A família Arecaceae, anteriormente conhecida como Palmae, compreende cerca de 251 gêneros e mais de 2.800 espécies distribuídas predominantemente em regiões tropicais e subtropicais. Essas plantas se destacam pelo caule geralmente não ramificado, folhas pinadas ou palmadas e frutos do tipo drupa, ricos em óleos e compostos funcionais. As características morfológicas dessa família conferem grande potencial para uso alimentício, cosmético e farmacêutico, principalmente em espécies nativas de países tropicais como o Brasil (Miranda *et al.*, 2025)

Entre as espécies pertencentes a essa família, destaca-se a *Bactris gasipaes* Kunth, conhecida popularmente como pupunha. Trata-se de uma palmeira de porte médio a alto, que apresenta crescimento cespitoso, formando touceiras com múltiplos estipes, geralmente de coloração marrom a verde e recobertos por espinhos dispostos em anéis ao longo do tronco. As folhas são pinadas, grandes e arqueadas, com bainhas foliares espinhosas e coloração variável conforme o estágio de desenvolvimento. Elas se distribuem na porção apical dos estipes, formando uma copa densa (Kramer *et al.*, 2023). Além disso, a planta é monoica, apresentando flores masculinas e femininas em uma mesma inflorescência, o que favorece sua reprodução e cultivo em diferentes regiões tropicais da América Latina (González-Jaramillo *et al.*, 2022).

### 2.2.1 Estrutura Reprodutiva e Diversidade Genética

A *Bactris gasipaes* é uma palmeira monoica que apresenta flores femininas e masculinas em uma mesma inflorescência, organizadas de forma distinta. Normalmente, as flores femininas estão posicionadas na base, enquanto as masculinas se localizam na porção superior da espádice. Essa disposição floral, associada ao amadurecimento diferencial entre os sexos, favorece a polinização cruzada, embora a autopolinização também possa ocorrer em situações de baixa diversidade genética. A fecundação é predominantemente entomófila, sendo realizada por insetos, com destaque para besouros e abelhas nativas atraídos por compostos voláteis liberados pelas flores (Clement *et al.*, 2017).

A diversidade genética encontrada nas populações de *Bactris gasipaes* está diretamente ligada ao processo histórico de domesticação da espécie, conduzido por comunidades indígenas e agricultores tradicionais. Com base em análises morfológicas e moleculares, pesquisadores reconhecem duas principais variedades da espécie: var. *gasipaes*, que corresponde à forma domesticada e amplamente cultivada, e var. *chichagui*, considerada silvestre e restrita a áreas de floresta nativa. Enquanto a variedade cultivada apresenta frutos grandes, com polpa espessa

e alto rendimento, a forma silvestre se caracteriza por frutos pequenos, o que facilita sua dispersão em ambientes naturais (Clement *et al.*, 2017).

Além das duas principais variedades de *Bactris gasipaes*, conhecidas como var. *gasipaes* (forma domesticada) e var. *chichagui* (forma silvestre), há registros de populações intermediárias que surgem a partir do cruzamento natural entre esses dois grupos. Essas populações híbridas apresentam ampla diversidade morfológica, incluindo variações no tamanho e na coloração dos frutos, na espessura e quantidade de estipes, bem como na produtividade e resistência a fatores bióticos. Essa diversidade tem sido observada tanto em regiões onde os dois tipos coexistem quanto em análises genéticas que revelam proximidade entre eles (Couvreur *et al.*; 2005).

Essa ampla variabilidade genética é considerada um recurso valioso em programas de melhoramento da pupunha. Por meio da seleção de indivíduos com características desejáveis, como frutos com maior concentração de  $\beta$ -caroteno, menor presença de estruturas espinhosas e maior resistência a patógenos, torna-se possível otimizar o cultivo da espécie. Além disso, essa diversidade também pode ser aplicada em diferentes contextos industriais e tecnológicos, fortalecendo o uso sustentável e multifuncional da planta (Chia *et al.*, 2017).

## 2.2.2 Morfologia dos frutos e potencial bioativo da casca

Os frutos da *Bactris gasipaes* são classificados como drupas e se organizam em inflorescências compactas, que podem conter de dezenas a centenas de unidades, variando conforme a variedade cultivada e as condições de cultivo. A coloração da casca externa (epicarpo) apresenta tonalidades que vão do amarelo ao vermelho intenso, sendo essa característica relacionada ao conteúdo de pigmentos naturais, como os carotenoides, especialmente o  $\beta$ -caroteno, presentes tanto na casca quanto na polpa (Ordoñez-Santos *et al.*, 2019; Chisté *et al.*, 2019).

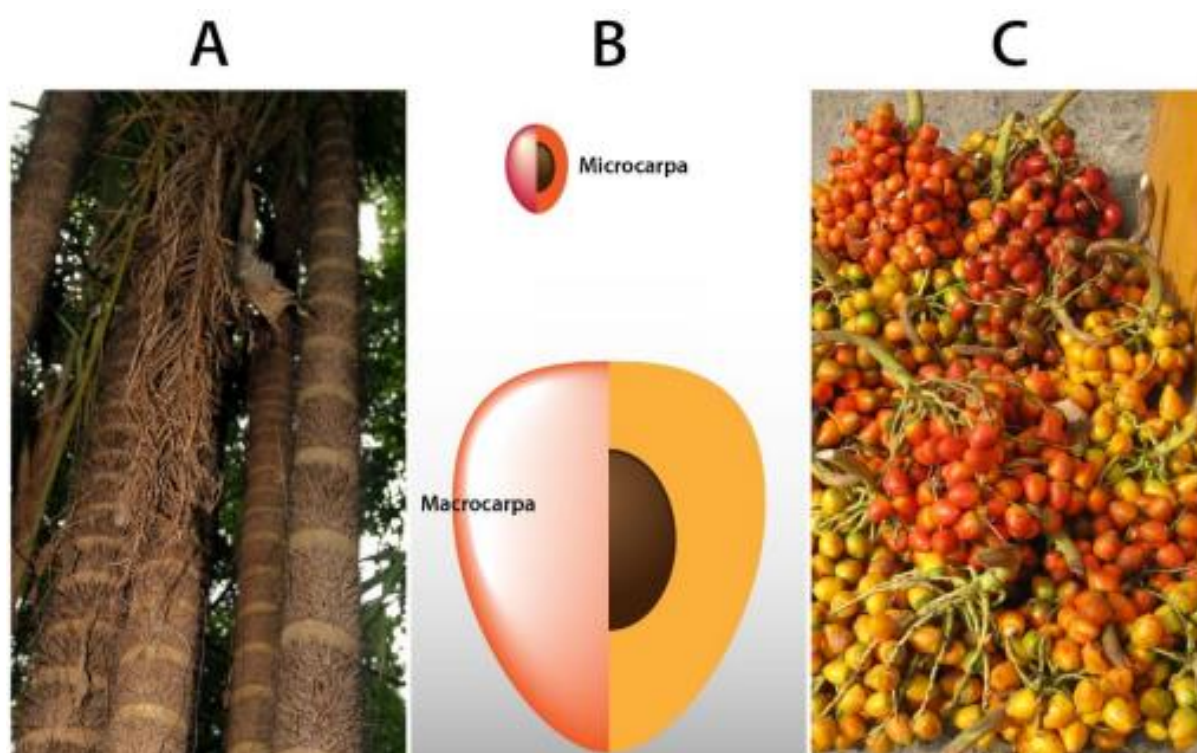
Anatomicamente, cada fruto é composto por três partes: o epicarpo, que possui textura fibrosa e coloração viva; o mesocarpo, espesso e de natureza farinácea, reconhecido por seu valor nutricional; e o endocarpo, que envolve uma amêndoa rica em óleo e compostos bioativos. Essa composição estrutural favorece o aproveitamento integral do fruto para diferentes fins alimentares, tecnológicos e industriais (Spacki *et al.*, 2022).

A casca, em especial, tem se mostrado uma matéria-prima promissora devido ao seu elevado teor de fibras insolúveis, carotenoides e fenólicos, que conferem propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e fotoprotetoras. Esses atributos justificam seu uso crescente

em formulações cosméticas e farmacotécnicas voltadas para a proteção celular e o envelhecimento cutâneo (Ordoñez-Santos *et al.*, 2019).

Outro aspecto importante observado nos frutos da pupunha é a baixa atividade da enzima polifenoloxidase (PPO), quando comparada a outras frutas tropicais. Esse fator reduz o escurecimento enzimático durante o processamento, contribuindo para a manutenção da aparência, estabilidade química e aceitação dos produtos finais, como extratos, emulsões e snacks funcionais (Spacki *et al.*, 2022).

Figura 2 - Morfologia da *Bactris gasipaes* Kunth.



Legenda:(A): Estipe com entrenós cobertos por espinhos; (B): Diferença entre frutos das variedades macrocarpa e microcarpa; (C): Fruto da variedade microcarpa, coletado em Cali, Colômbia.

Fonte: González-Jaramillo *et al.*, 2022.

### 2.3 APROVEITAMENTO AGROINDUSTRIAL DA PUPUNHA E SEUS RESÍDUOS BIOATIVOS

A *Bactris gasipaes*, conhecida como pupunha, é uma palmeira com importância econômica crescente, amplamente empregada na alimentação humana devido ao valor nutricional de seus frutos. Esses frutos são especialmente ricos em amido, fibras dietéticas e carotenoides, como o  $\beta$ -caroteno, responsável pela coloração intensa da polpa e por suas propriedades funcionais (Yuyama e Cozzolino, 1996; Matos *et al.*, 2019). No entanto, os

resíduos gerados durante o processamento agroindustrial, particularmente a casca, têm ganhado destaque como fontes alternativas de compostos bioativos com potencial aplicação em diversas áreas.

Pesquisas indicam que o óleo obtido da casca da pupunha possui um perfil lipídico composto por ácidos graxos insaturados, fitoesteróis e tocoferóis. Esses constituintes conferem ao óleo propriedades antioxidantes, emolientes e fotoprotetoras, tornando-o um insumo promissor para o desenvolvimento de formulações cosméticas e dermatológicas (dos Santos *et al.*, 2020). Além disso, a incorporação desse óleo em sistemas nanoestruturados, como as nanoemulsões, tem sido explorada com o objetivo de aumentar a estabilidade e a eficácia na liberação de compostos bioativos na pele (dos Santos *et al.*, 2020).

O aproveitamento integral da pupunha, incluindo seus resíduos, reflete uma abordagem alinhada aos princípios da economia circular. Essa estratégia contribui para o uso sustentável dos recursos naturais e para o desenvolvimento de produtos com valor agregado, com potencial de aplicação nas indústrias alimentícia, cosmética e farmacêutica.

### 2.3.1 Sustentabilidade e economia circular no aproveitamento da pupunha

A adoção de estratégias pautadas na sustentabilidade e na economia circular tem impulsionado o aproveitamento integral de matérias-primas vegetais na agroindústria, especialmente no contexto de espécies nativas como a pupunha (*Bactris gasipaes*). O processamento convencional do palmito resulta em um volume expressivo de resíduos, correspondendo a aproximadamente 83,6% da biomassa total da planta, entre casca externa, bainha interna e porção basal, os quais são frequentemente descartados sem destinação tecnológica adequada (Arantes *et al.*, 2024).

Estudos recentes têm demonstrado que esses subprodutos apresentam composição rica em compostos de interesse funcional. A casca externa, por exemplo, possui alto teor de fibras alimentares, com valores entre 59,2% e 68,1%, superando os teores presentes nas porções comestíveis, o que a torna uma fonte potencial para formulações alimentícias enriquecidas (Arantes *et al.*, 2024). Além disso, a bainha interna e a porção basal apresentam teores proteicos expressivos, variando de 8,40% a 11,8%, atendendo aos critérios legais para uso como ingrediente alimentar (Arantes *et al.*, 2024).

### 2.3.2 Composição funcional da Casca de Pupunha

No que se refere à composição bioativa, a biomassa residual da pupunha contém substâncias como ácido succínico, mio-inositol e ácido gálico, associadas a propriedades antioxidantes, anti-inflamatórias e funcionais, com aplicações promissoras nas indústrias de alimentos, cosméticos e farmacêutica (Arantes *et al.*, 2024). Complementando esses dados, Spacki *et al.* (2022) destacam que o óleo extraído da casca do fruto apresenta perfil lipídico favorável e é rico em compostos fenólicos, além de demonstrar potencial fotoprotetor e ação contra radicais livres, sendo indicado para formulações dermocosméticas.

Do ponto de vista tecnológico, a casca da pupunha também apresenta elevado teor de celulose (cerca de 39,6%), o que a torna apta para aplicação na produção de nanocelulose e biomateriais, dentro de um modelo de biorrefinaria voltado à agregação de valor por meio da conversão de resíduos em insumos industriais (Arantes *et al.*, 2024). O aproveitamento da lignocelulose pode incluir desde a fabricação de filmes biodegradáveis e biossorventes até sua utilização como substrato para o cultivo microbiano ou fúngico (Spacki *et al.*, 2022).

Esse panorama reforça a importância de se desenvolver cadeias produtivas que valorizem os resíduos agroindustriais de forma sistematizada. O reaproveitamento da biomassa de pupunha não apenas mitiga impactos ambientais, como também favorece a inovação em setores estratégicos, promovendo uma agroindústria mais eficiente, diversificada e ambientalmente responsável (Arantes *et al.*, 2024; Spacki *et al.*, 2022).

## 2.4 ÓLEO BIOATIVO DA CASCA DA PUPUNHA: EXTRAÇÃO E POTENCIAL TECNOLÓGICO

Óleos vegetais vêm sendo investigados amplamente no campo farmacêutico por sua capacidade de funcionar tanto como ativos quanto como excipientes, especialmente em formulações aplicadas à pele, à cosmética e a sistemas de liberação prolongada de fármacos. Sua composição complexa, rica em compostos como ácidos graxos insaturados, pigmentos antioxidantes, fenóis naturais, tocoferóis e fitoesteróis, atribui a esses óleos efeitos adicionais como proteção contra oxidação, ação anti-inflamatória, regeneradora e fotoprotetora (Poljšak & Kočevár Glavač, 2022).

Devido à sua compatibilidade com a fisiologia cutânea, baixa toxicidade e fácil degradação ambiental, esses óleos são considerados excelentes alternativas para formulações sustentáveis. Eles também auxiliam na solubilização de compostos hidrofóbicos e são

empregados como estabilizantes em diferentes formas farmacêuticas, incluindo emulsões, loções e sistemas coloidais de liberação controlada (Poljšak & Kočevár Glavač, 2022).

Um exemplo promissor é o óleo extraído da casca do fruto da pupunha (*Bactris gasipaes*), que apresenta uma composição funcional relevante, com destaque para a presença de carotenoides como  $\beta$ -caroteno, além de ácidos graxos essenciais e compostos fenólicos. Esses constituintes justificam seu uso em formulações com potencial antioxidante e calmante, voltadas à saúde da pele (Ordóñez-Santos *et al.*, 2019).

A extração desse óleo por meio de ultrassom tem se mostrado eficiente, favorecendo a recuperação de compostos bioativos sensíveis e garantindo maior rendimento, sem comprometer sua integridade funcional (Ordóñez-Santos *et al.*, 2015).

Quando incorporado a sistemas de dispersão coloidal, como nanoemulsões, esse óleo pode melhorar a estabilidade física da formulação e aumentar a biodisponibilidade de substâncias lipofílicas. Evidências recentes indicam que emulsões contendo óleo de casca de pupunha oferecem bons resultados em testes de estabilidade e desempenho antioxidante (Ordóñez-Santos *et al.*, 2019).

Do ponto de vista ambiental, o aproveitamento de resíduos vegetais para obtenção de óleos bioativos representa uma medida coerente com a sustentabilidade. Essa estratégia reduz o descarte de biomassa útil, valoriza a biodiversidade e atende a princípios defendidos por instituições reguladoras como a ANVISA e a OMS (Poljšak e Kočevár Glavač, 2022).

## 2.5 NANOTECNOLOGIA FARMACÊUTICA E SISTEMAS NANOESTRUTURADOS

A nanotecnologia farmacêutica é uma área em crescente desenvolvimento que utiliza materiais em escala nanométrica, geralmente entre 20 e 200 nanômetros, com o propósito de criar sistemas terapêuticos mais eficazes, seletivos e seguros. Esses sistemas apresentam características como maior área de superfície, reatividade aprimorada e capacidade de interação com estruturas celulares específicas, o que os torna superiores às formulações convencionais em diversos aspectos (Mushtaq *et al.*, 2023).

Um dos principais benefícios desses sistemas nanoestruturados está na capacidade de modificar o perfil farmacocinético de substâncias ativas. Através do encapsulamento em estruturas nanométricas, compostos bioativos têm sua solubilidade aumentada, sua absorção e biodisponibilidade melhoradas e sua estabilidade ampliada frente a processos como oxidação e hidrólise. Isso permite, além da liberação controlada, a redução de efeitos colaterais sistêmicos e a entrega mais eficiente ao local de ação (Karamanidou *et al.*, 2016).



No contexto da utilização de óleos vegetais como matérias-primas farmacotécnicas, como o óleo extraído da casca da pupunha (*Bactris gasipaes*), os sistemas em nanoescala oferecem vantagens adicionais. Estruturas como nanoemulsões, nanopartículas lipídicas sólidas e lipossomas têm demonstrado eficácia na incorporação de compostos bioativos lipofílicos, potencializando sua permeação cutânea, retenção dérmica e desempenho biológico em formulações cosméticas e dermatológicas (Tichota *et al.*, 2014).

Além das vantagens clínicas, a nanotecnologia também se destaca como uma aliada da sustentabilidade. A possibilidade de utilizar menores quantidades de ativos e excipientes, associada ao aumento da eficiência terapêutica e à menor geração de resíduos, contribui para práticas mais alinhadas à economia circular e à inovação ambientalmente responsável (Ashaolu, 2025).

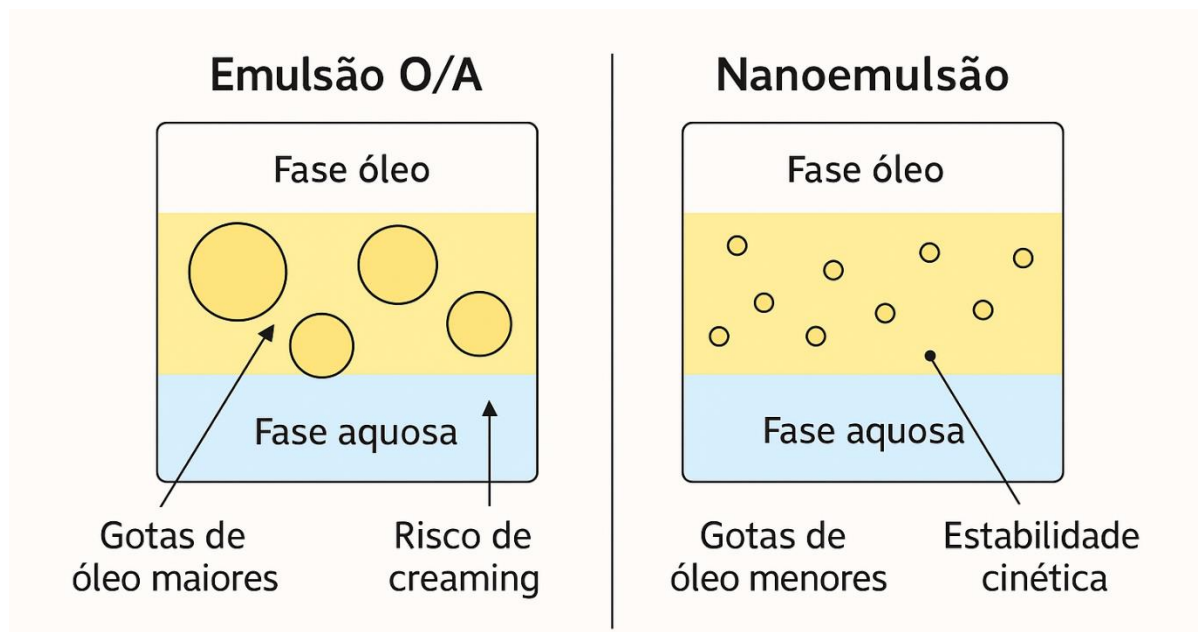
#### 2.5.1 Nanoemulsões: Conceito e propriedades físico-químicas

Nanoemulsões são sistemas coloidais formados por duas fases imiscíveis (geralmente óleo e água) estabilizadas por surfactantes e cosurfactantes, com gotículas normalmente entre 20 e 200 nm. Essas formulações não são termodinamicamente estáveis, mas apresentam excelente estabilidade cinética e formato translúcido ou ligeiramente opalescente, o que as torna adequadas para produtos farmacêuticos, cosméticos e alimentares. O pequeno tamanho das partículas proporciona uma maior área interfacial por unidade de volume, aumentando a solubilização de compostos lipofílicos e, conseqüentemente, sua biodisponibilidade (Gupta *et al.*, 2016)

Em comparação com emulsões convencionais, as nanoemulsões demonstram menor sensibilidade à floculação, sedimentação ou coalescência, resultando em maior estabilidade física ao longo do tempo. Esse comportamento confere vantagens sensoriais, como textura homogênea e sensação leve na aplicação tópica (Shaker *et al.*, 2019). Por conta dessas características, são frequentemente empregadas em produtos de alto padrão cosmético e farmacêutico.

Essas nanoestruturas também facilitam o controle da liberação de substâncias ativas, oferecendo proteção contra degradação oxidativa e direcionamento efetivo de fármacos ao local de ação desejado. As nanoemulsões têm sido utilizadas em diferentes vias de administração (oral, tópica, ocular e nasal) com finos perfis farmacocinético e farmacodinâmico (Musakhanian; Osborne, 2025).

Figura 3 - Esquema de emulsão O/A vs. nanoemulsão com setas explicativas.



Fonte: Autora, 2025.

### 2.5.2 Tensoativos e equilíbrio hidrofílico-lipofílico (EHL)

Tensoativos são moléculas com caráter anfifílico, apresentando uma porção hidrofílica (afinidade com água) e outra hidrofóbica (afinidade com óleo). Essa estrutura permite reduzir a tensão interfacial entre fases imiscíveis, como óleo e água, facilitando a formação de emulsões e nanoemulsões. Ao deslocarem-se espontaneamente para a interface, esses surfactantes formam uma camada estabilizadora que impede a coalescência das gotículas, promovendo estabilidade cinética via barreira estérica e cargas eletrostáticas (Ashaolu, 2021).

O Equilíbrio Hidrofílico-Lipofílico (EHL) expressa numericamente a tendência do surfactante interagir com fases aquosa ou oleosa. Para emulsões tipo óleo-em-água (O/W), são usados surfactantes com EHL na faixa de 8 a 18; valores menores são típicos de sistemas água-em-óleo (W/O). A escolha apropriada do surfactante com base no EHL do óleo utilizado é crucial para a obtenção de emulsões homogêneas, gotículas de tamanho controlado e maior estabilidade física e shelf-life (Chavda *et al.*, 2024).

Combinações de surfactantes principais com co-surfactantes são frequentemente empregadas para melhorar a estabilidade física das formulações. Essa prática permite reduzir a tensão interfacial residual, ajustar a viscosidade e melhorar características sensoriais, o que é particularmente vantajoso em formulações cosméticas e farmacêuticas de alta performance (Elsewedy, 2025).

### 2.5.3 Métodos de Preparo de Nanoemulsões

Diversos métodos têm sido empregados para a produção de nanoemulsões, variando em complexidade e eficiência. Dentre os métodos de baixo consumo energético, destaca-se a inversão de fases, técnica que promove a formação espontânea de nanoemulsões a partir de mudanças controladas na composição ou na temperatura do sistema. Essa inversão pode ocorrer pela modificação na razão óleo-água ou pela indução térmica, alterando a estrutura da interface e permitindo a formação de gotículas com tamanho reduzido e distribuição uniforme. A simplicidade operacional e a não exigência de equipamentos sofisticados tornam essa abordagem atrativa para aplicações industriais em larga escala (Tadros *et al.*, 2004).

Métodos de alta energia, como a ultrassonicação, são amplamente reconhecidos pela capacidade de gerar nanoemulsões estáveis com distribuições de tamanho de gotículas nanométrico. A aplicação de ondas ultrassônicas de alta frequência induz cavitação acústica: microbolhas que colapsam geram cisalhamento intenso e turbulência local, fragmentando a fase oleosa em partículas minúsculas (Song *et al.*, 2021). Esse processo é particularmente indicado para ativos sensíveis ao calor, pois permite controle rigoroso de parâmetros como tempo de sonicação, amplitude e temperatura, influenciando diretamente na eficiência da emulsificação, uniformidade do sistema e estabilidade físico-química da formulação (Song *et al.*, 2021).

Ambos os métodos apresentam vantagens distintas: enquanto a inversão de fases é mais econômica e sustentável, a ultrassonicação oferece maior controle sobre o tamanho das gotículas e permite melhor uniformidade. A escolha da técnica depende das características do ativo incorporado, da aplicação pretendida e dos requisitos de estabilidade físico-química exigidos pela formulação final (Jaiswal *et al.*, 2015).

### 2.5.4 Avaliação físico-química de nanoemulsões

A análise físico-química de nanoemulsões é um passo crucial para verificar a estabilidade e a qualidade da formulação, especialmente em sistemas voltados para aplicações cosméticas ou farmacotécnicas. Entre os parâmetros fundamentais estão o diâmetro médio das partículas, o índice de polidispersão (PDI) e o potencial zeta, os quais fornecem informações importantes sobre a organização e a estabilidade coloidal do sistema.

De modo geral, emulsões com diâmetro inferior a 200 nm favorecem maior transparência e maior biodisponibilidade dos ativos lipofílicos (Zhao *et al.*, 2023). Um PDI com valor inferior a 0,25 é desejável, pois indica distribuição uniforme das gotículas, o que reflete em uma formulação mais estável e previsível em seu comportamento físico-químico (Khalid *et*

*al.*, 2023). Já o potencial zeta, quando superior a  $\pm 30$  mV, aponta para uma boa repulsão eletrostática entre as partículas, o que reduz a possibilidade de agregação e separação de fases (Zhao *et al.*, 2023).

Além desses dados, a avaliação visual da formulação, incluindo homogeneidade, ausência de sedimentos ou cremes e transparência, é fundamental para garantir estabilidade durante o armazenamento. Também são empregadas técnicas instrumentais, como a análise por espalhamento dinâmico de luz (DLS) e testes de centrifugação, que simulam estresses físicos e ajudam a prever a robustez da nanoemulsão ao longo do tempo (Khalid *et al.*, 2023).

#### 2.5.5 Técnicas instrumentais de caracterização

A caracterização físico-química de sistemas nanoestruturados, como as nanoemulsões óleo-em-água, é essencial para o desenvolvimento de formulações farmacotécnicas seguras, eficazes e estáveis. Técnicas instrumentais como a espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e a termogravimetria (TG) são amplamente empregadas para avaliar a estabilidade térmica, a integridade dos componentes e a compatibilidade entre os excipientes e os ativos, aspectos indispensáveis em formulações voltadas à liberação controlada de compostos bioativos (Fernandez-López *et al.*, 2022; Sodré, 2023).

A técnica de FTIR permite identificar os grupos funcionais presentes nos constituintes da nanoemulsão e detectar possíveis interações moleculares entre o óleo, o agente bioativo e os excipientes, por meio de alterações nos espectros vibracionais. Essa análise é essencial para verificar a integridade química da formulação e avaliar a compatibilidade dos ingredientes (Sodré, 2023).

Por sua vez, a termogravimetria (TG) possibilita a avaliação da estabilidade térmica e da composição da amostra, ao monitorar a perda de massa em função do aumento de temperatura. Essa técnica é eficaz na identificação de eventos como volatilização e degradação térmica, permitindo compreender o comportamento da formulação frente a diferentes condições ambientais (Fernandez-López *et al.*, 2022).

A combinação dessas ferramentas analíticas fornece subsídios importantes para a otimização do processo produtivo e a definição de parâmetros críticos de qualidade, contribuindo para a eficácia e segurança de produtos cosméticos e farmacêuticos à base de nanoemulsões (Sodré, 2023).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAL VEGETAL

Frutos de *Bactris gasipaes Kunth* (pupunha) foram coletados pelo grupo INCT-PROBIAM durante o período de safra, compreendido entre dezembro do ano vigente e maio do ano subsequente, nas margens do rio Maguari, área de várzea caracterizada por mata virgem e ausência de interferência antrópica, localizada em zona de preservação permanente (Figura 4). A identificação botânica da espécie foi realizada por especialista, sendo o material devidamente registrado para fins de pesquisa.

Figura 4 - Localização do ponto de coleta



Fonte: Autora, 2025.

Após a coleta, os frutos foram encaminhados ao Laboratório de Tratamento e Processo Térmico de Resíduos Sólidos, onde se procedeu ao pré-tratamento, que consistiu em descascamento, despulpamento e separação manual das sementes e amêndoas. Em seguida, o material foi submetido à secagem em estufa de circulação de ar, com capacidade de 60 L, a  $105 \pm 5$  °C por 24 horas. Após o processo de secagem, as amêndoas foram trituradas em forrageiro

e moinho de bancada, obtendo-se granulometria uniforme. O material processado foi acondicionado em recipientes hermeticamente fechados e armazenado sob refrigeração até as análises subsequentes.

A extração do óleo foi realizada por dois métodos distintos. Na extração por solvente orgânico (Soxhlet), utilizou-se hexano como solvente, na proporção de 1:5 (m/v), sendo aplicados 30 g de amêndoas secas e trituradas para 120 mL de solvente. O processo ocorreu sob temperatura controlada entre 60 e 65 °C, durante aproximadamente 120 minutos, com posterior recuperação parcial do solvente por destilação simples. Na extração por prensagem, as amêndoas foram previamente aquecidas a 60 °C por 30 minutos e, em seguida, submetidas à pressão máxima de 12 Pa em prensa acoplada a corpo cilíndrico. O óleo obtido por ambos os métodos foi filtrado, acondicionado em frascos âmbar hermeticamente vedados e armazenado sob refrigeração até a realização das análises físico-químicas e caracterizações complementares.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 ESTUDO DE COMPATIBILIDADE FRENTE A EXCIPIENTES

Foram preparadas misturas binárias e ternárias na proporção de 1:1 (m:m) do óleo da pupunha e dos excipientes Monooleato de sorbitano (Span® 80) e Polissorbato 80 (Tween® 80), os quais após homogeneização foram analisados por análise termogravimétrica e por Espectroscopia por absorção na região do infravermelho com Transformada de Fourier seguindo a metodologia a seguir.

#### 3.2.1.1 *Espectroscopia por absorção na região do infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)*

O espectro na região do infravermelho foi obtido utilizando-se o equipamento PerkinElmer® (Spectrum 400) com dispositivo de reflectância total atenuada (ATR) com cristal de seleneto de zinco. A amostra analisada foi transferida diretamente para o compartimento do dispositivo de ATR, sendo o resultado obtido da média de 10 varreduras, de 4000 a 650  $\text{cm}^{-1}$ , na resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$ .

### 3.2.1.2 Estudos de Análise Térmica

A análise termogravimétrica TG foi realizada em termobalança, modelo TGA Q60, da marca Shimadzu®, em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50 mL.min<sup>-1</sup>, sendo a massa da amostra de cerca de 3 mg ( $\pm$  0.4 mg), acondicionadas em cadinho de alumina, na faixa de temperatura de 25-600°C, na razão de aquecimento de 10°C.min<sup>-1</sup>.

## 3.2.2 PREPARO DA EMULSÃO

### 3.2.2.1 Equilíbrio hidrófilo lipofílico

A determinação do EHL foi realizada com base na metodologia proposta por Griffin (1979), a qual consistiu na preparação de emulsões seriadas com o óleo da casca de pupunha, por meio de um experimento completo. As emulsões foram compostas pelo óleo e por um par de tensoativos com EHL conhecido, combinados em proporções variáveis, de modo a originarem valores definidos de EHL. O cálculo do EHL ocorreu pela equação:

$$\text{EHLf} = (\text{EHLA} \times 0,01 \times A) + (\text{EHLB} \times 0,01 \times B) \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

EHLf = EHL final da emulsão; EHLA = EHL do tensoativo hidrofílico; EHLB = EHL do tensoativo lipofílico; A = é a quantidade, em porcentagem, utilizada do tensoativo hidrofílico, B = é a quantidade, em porcentagem, utilizada do tensoativo lipofílico; A + B = deve ser igual a 100%.

Os tensoativos utilizados foram o Monooleato de Sorbitano (Tego® SMO V – Span 80), de EHL 4,3 e Polissorbato 80 (Tween® 80), de EHL 15,0, os quais somados representam 10% da formulação, variando-se apenas a proporção destes nessa concentração. O óleo foi mantido na concentração de 10% e a água em 80% da formulação. As proporções de cada componente da formulação, além de suas variações estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Determinação do EHL do óleo da casca da pupunha.

Formulações	Óleo (%m/m)	Span 80 (%)	Tween 80 (%)	Água (%)
1	10	90	10	80
2	10	80	20	80
3	10	70	30	80
4	10	60	40	80
5	10	50	50	80
6	10	40	60	80
7	10	30	70	80
8	10	20	80	80
9	10	10	90	80

Fonte: Autora, 2025.

As nanoemulsões foram preparadas pelo método de inversão de fases, no qual ocorreu aquecimento das fases aquosa e oleosa separadamente, até  $75^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , onde a fase aquosa foi vertida lentamente sobre a fase oleosa e mantidas por 4 minutos, a uma potência de 40% em aparelho ultrasonificador (Ecosonics®).

### 3.2.2.2 Análise macroscópica

A análise macroscópica foi avaliada no T0 (24h após o preparo), observando aspecto, cor e odor das formulações (Ribeiro *et al.*, 2015) e fenômenos de instabilidade de nanoemulsões creme ou separação de fases.

### 3.2.2.3 Centrifugação

As amostras foram avaliadas no T0 (24h após o preparo), submetidas a centrifugação a 3.500 rpm durante 30 minutos. A fim de avaliar a instabilidade da nanoemulsão (creme ou separação de fases) observadas visualmente (Mohamadi Saani; Abdolalizadeh; Zeinali Heris, 2019). O valor de EHL da emulsão mais estável corresponde ao do óleo em ensaio.



#### 3.2.2.4 *Medições de potencial Zeta, Índice de polidispersão e Tamanho de gotícula*

As análises de tamanho das gotículas, índice de polidispersão e potencial zeta, foram avaliados após 24h. O tamanho das gotículas e o índice de polidispersão foram medidos por espalhamento dinâmico da luz, enquanto o potencial zeta foi medido por mobilidade eletroforética. As nanoemulsões foram diluídas com água miliq (1:5 v/v) antes da análise para evitar múltiplos efeitos de espalhamento. As medições foram realizadas em um Zetasizer (ZEN3690, Malvern Instruments®) usando ângulo de espalhamento de 90 °.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ESTUDO DE COMPATIBILIDADE FRENTE AOS EXCIPIENTES

As técnicas de análise térmica (TG) e espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) são amplamente reconhecidas por sua eficácia na investigação da compatibilidade entre substâncias em formulações farmacêuticas. Esses métodos permitem identificar alterações nas propriedades físico-químicas dos materiais, como transições de fase, degradação térmica, fusão e possíveis interações moleculares. O uso combinado dessas ferramentas contribui significativamente para o entendimento das interações entre o fármaco e os excipientes, auxiliando na concepção de sistemas mais estáveis e seguros, especialmente no desenvolvimento de nanoemulsões voltadas para a liberação de medicamentos. A ocorrência de incompatibilidades, como reações químicas entre os componentes da formulação, pode comprometer a estabilidade, a eficácia terapêutica e a biodisponibilidade do produto, além de representar riscos toxicológicos potenciais (Pires *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2020).

#### 4.1.1 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier – FTIR

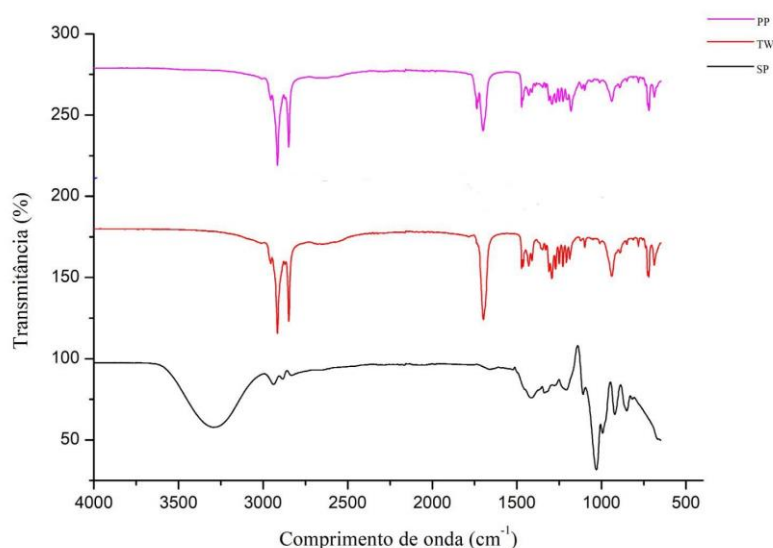
A análise por espectroscopia FTIR foi utilizada para investigar as interações moleculares entre os componentes do óleo da casca da pupunha, isoladamente e em combinação com os tensoativos, com vistas à sua aplicação em formulações tópicas. A Figura 5 mostra os espectros FTIR do óleo puro e dos tensoativos isoladamente. As bandas mais proeminentes para o óleo da casca da pupunha são de grupos metileno ( $-\text{CH}_2$ ), assimétrico em  $2915\text{ cm}^{-1}$  e simétrico em  $2849\text{ cm}^{-1}$ , típicos de ácidos graxos e cadeias alifáticas longas (presença de lipídios). Essas bandas são comuns em óleos vegetais e indicam a natureza lipofílica da matriz. Em  $1700\text{ cm}^{-1}$  observa-se o estiramento do grupo carbonila ( $\text{C}=\text{O}$ ) de ésteres, característico de triacilgliceróis (lipídeos presentes em óleos vegetais), confirmando a presença de componentes graxos esterificados. A banda em  $1694\text{ cm}^{-1}$  pode estar associada ao estiramento de  $\text{C}=\text{O}$  livre (não esterificado) ou a ácidos graxos livres. Em  $1476\text{ cm}^{-1}$  ocorre deformação angular de  $\text{CH}_2/\text{CH}_3$  (dobramento do tipo scissoring ou bending). Já em  $1173\text{ cm}^{-1}$  há vibração de estiramento de  $\text{C}-\text{O}$  em ésteres, refletindo a presença de ligações ésteres (mais uma vez associada aos triacilgliceróis).

Com o Tween 80, bandas evidentes aparecem em  $2911\text{ cm}^{-1}$  e  $2845\text{ cm}^{-1}$ , relacionadas aos estiramentos  $\text{C}-\text{H}$  dos grupos  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$  das cadeias alifáticas da porção oleato. Em  $1711\text{ cm}^{-1}$ , nota-se o estiramento do grupo carbonila ( $\text{C}=\text{O}$ ) presente nos ésteres (monooleato). Em

1459  $\text{cm}^{-1}$  observam-se deformações angulares de  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$ , compatíveis com o padrão das cadeias graxas, podendo aparecer ligeiramente deslocadas por conta da interação com os grupos etoxilados. Já em 1298  $\text{cm}^{-1}$  há estiramento  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  (éter) dos polioxietilenos, registrado da parte hidrofílica do Tween 80, como descrito por Assanvo *et al.* (2015). Essa banda é importante para identificar interações com a fase aquosa em sistemas emulsionados. A banda em 712  $\text{cm}^{-1}$ , em especial, é típica de cadeias longas saturadas, podendo indicar uma organização mais ordenada na cauda graxa, como corroborado por Bora *et al.* (2014) e Nazari *et al.* (2015).

Para o Span 80, observou-se em 3284  $\text{cm}^{-1}$  o estiramento de  $\text{O}-\text{H}$  (álcoois ou fenóis), amplo e característico de grupos hidroxila associados à estrutura do sorbitano (molécula derivada da glicose com grupos  $-\text{OH}$ ), conforme observado por Nazari *et al.* (2015). Já em 2932  $\text{cm}^{-1}$  e 2885  $\text{cm}^{-1}$  surgem estiramentos assimétrico e simétrico de  $\text{C}-\text{H}$  dos grupos  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$ , como em cadeias alifáticas da parte lipofílica (oleato), confirmando a presença da cauda graxa, essencial para a função anfifílica do Span 80. Em 1412  $\text{cm}^{-1}$  há deformações (bending) de  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$ , também típicas de cadeias alifáticas, podendo indicar organização ou conformação da cadeia hidrocarbonada. Já em 1038  $\text{cm}^{-1}$  aparece o estiramento de  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  (éter) e  $\text{C}-\text{O}$  em álcoois ou ésteres, associado à parte hidrofílica da molécula (sorbitano), e em 919  $\text{cm}^{-1}$  e 845  $\text{cm}^{-1}$  surgem bandas que podem estar associadas a deformações fora do plano de grupos olefínicos ( $=\text{C}-\text{H}$ ) ou a características da estrutura cíclica do sorbitano, indicando modos de vibração específicos da molécula úteis para identificar alterações conformacionais.

Figura 5 – Espectro de infravermelho dos componentes isolados da nanoemulsão.



Legenda: PP (Óleo de pupunha); TW(Tween 80); SP (Span 80).

Fonte: Dados da pesquisa.

Na mistura binária entre o óleo da casca da pupunha e o emulsificante Tween 80, o espectro FTIR revelou bandas em 2920 e 2850  $\text{cm}^{-1}$ , características do estiramento assimétrico e simétrico de ligações C–H em cadeias alifáticas, comuns em ácidos graxos e tensoativos não iônicos. Observou-se também uma banda em 1737  $\text{cm}^{-1}$ , atribuída ao estiramento da carbonila (C=O). A banda em 1693  $\text{cm}^{-1}$ , associada possivelmente a carbonilas conjugadas ou impurezas oxidativas residuais, manteve-se presente, indicando estabilidade das funcionalidades principais da matriz oleosa. As bandas em 1476  $\text{cm}^{-1}$  (deformação de C–H), 1170  $\text{cm}^{-1}$  (possível C–O–C) e 940  $\text{cm}^{-1}$  (vibração fora do plano de grupos metileno ou alquenos) foram preservadas, reforçando a compatibilidade entre os componentes e ausência de reações químicas relevantes.

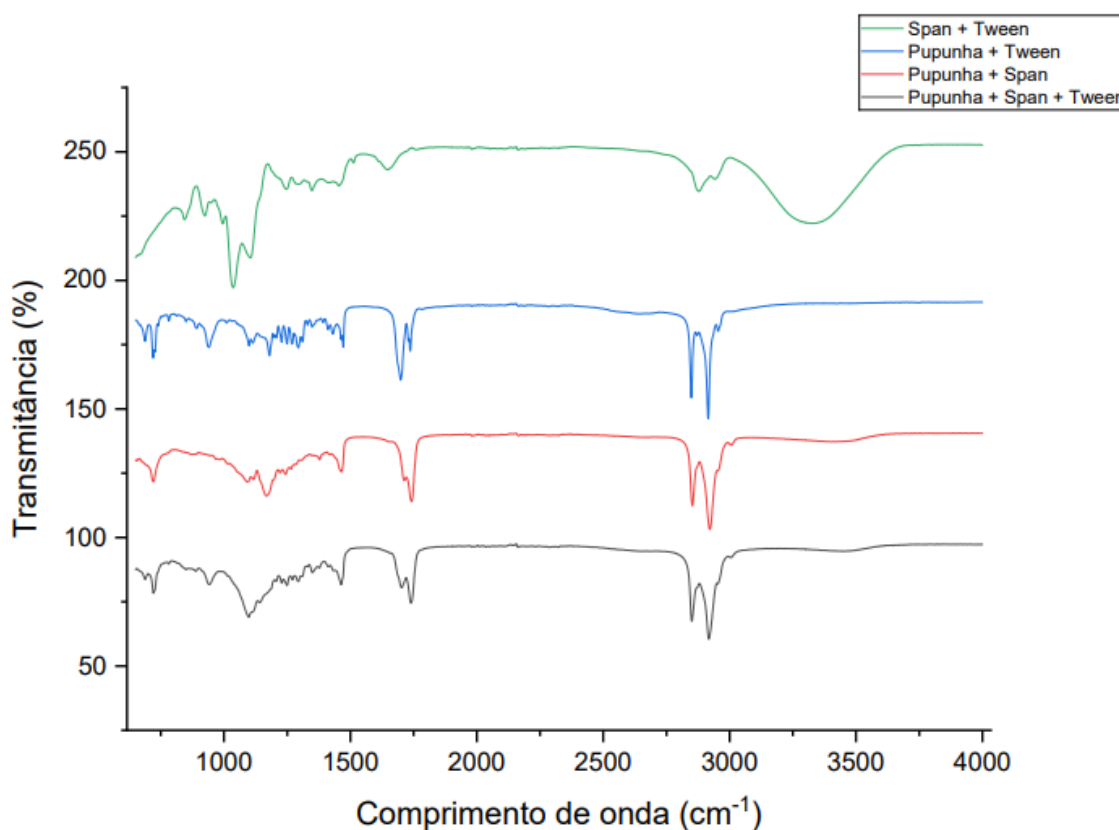
Na mistura entre o óleo da casca da pupunha e o tensoativo Span 80, o espectro FTIR revelou bandas em 2920 e 2856  $\text{cm}^{-1}$ , correspondentes ao estiramento assimétrico e simétrico dos grupos metileno ( $-\text{CH}_2-$ ), indicando a presença de cadeias alifáticas longas em ambos os componentes. A banda de estiramento da carbonila (C=O) foi observada em 1737  $\text{cm}^{-1}$ . A banda em 1463  $\text{cm}^{-1}$ , associada à deformação angular de C–H, manteve-se presente, indicando conservação das estruturas hidrocarbonadas. Já a banda em 1170  $\text{cm}^{-1}$ , atribuída a estiramentos de C–O ou C–O–C, e a banda em 722  $\text{cm}^{-1}$ , relacionada a vibrações fora do plano de longas cadeias alifáticas (possivelmente indicando cristalização ou empacotamento ordenado das cadeias), reforçam a compatibilidade entre os componentes da mistura.

Na amostra contendo a mistura dos tensoativos Tween 80 e Span 80, o espectro FTIR apresentou bandas em 3339 e 3328  $\text{cm}^{-1}$ , compatíveis com os estiramentos da ligação O–H, relacionados à presença de grupos hidroxila, possivelmente provenientes das unidades polioxietilênicas do Tween 80 ou do grupo sorbitano. A banda em 2878  $\text{cm}^{-1}$  foi atribuída ao estiramento dos grupos metileno ( $-\text{CH}_2-$ ), característicos das cadeias hidrocarbonadas dos tensoativos não iônicos utilizados. A presença da banda em 1455  $\text{cm}^{-1}$ , associada à deformação angular de C–H, reforça a manutenção da estrutura lipofílica da matriz. Já as bandas em 1104 e 1036  $\text{cm}^{-1}$  correspondem ao estiramento das ligações éter (C–O–C), presentes na estrutura do poliéter do Tween 80. Por fim, a banda observada em 659  $\text{cm}^{-1}$  é atribuída a vibrações fora do plano de ligações C–H em cadeias alifáticas longas, indicando a preservação das estruturas acíclicas da formulação.

Na amostra contendo a mistura ternária do óleo da casca da pupunha com os tensoativos Span 80 e Tween 80, o espectro FTIR apresentou bandas em 2920 e 2842  $\text{cm}^{-1}$ , compatíveis com os estiramentos assimétrico e simétrico dos grupos metileno ( $-\text{CH}_2-$ ), característicos das cadeias hidrocarbonadas presentes nos óleos vegetais e nos tensoativos não iônicos utilizados.

A banda em  $1737\text{ cm}^{-1}$ , correspondente ao estiramento da carbonila ( $\text{C}=\text{O}$ ), permaneceu inalterada em relação às misturas binárias, indicando estabilidade estrutural dos grupos ésteres e ausência de reações químicas entre os constituintes. A presença da banda em  $1469\text{ cm}^{-1}$ , associada à deformação angular de  $\text{C}-\text{H}$ , reforça a manutenção da estrutura lipofílica da matriz, enquanto as bandas em  $932$  e  $715\text{ cm}^{-1}$  são atribuídas a vibrações fora do plano de grupos metileno ou de ligações  $\text{C}-\text{H}$  em cadeias longas.

Figura 6 - Espectro de infravermelho das misturas dos componentes da nanoemulsão.



Legenda: PP (Óleo de pupunha); TW (Tween® 80); SP (Span® 80).

Fonte: Autora, 2025.

De modo geral, a análise espectroscópica das misturas binárias e ternárias revelou que os principais grupos funcionais do óleo e tensoativos foram mantidos após a combinação dos componentes, indicando ausência de reações químicas significativas para a preparação das nanoemulsões.

#### 4.1.2 Análise termogravimétrica (TG)

Neste estudo, análise termogravimétrica (TG) foi aplicada para avaliar as variações nas perdas de massa associadas aos processos de decomposição térmica dos compostos isolados, bem como de suas respectivas misturas físicas binárias e da formulação completa. A mistura total foi composta por todos os excipientes utilizados na preparação das nanoemulsões investigadas, conforme ilustrado na Figura 7.

A avaliação das misturas físicas compostas pelas combinações de óleo de pupunha com Tween® 80, óleo de pupunha com Span® 80 e Tween® 80 com Span® 80, juntamente com a mistura total contendo todos os componentes da formulação, permitiu analisar as interações específicas entre os constituintes e identificar possíveis efeitos sinérgicos ou antagonistas. Além disso, essa análise possibilitou verificar a compatibilidade térmica entre os excipientes, aspecto essencial para assegurar a estabilidade da formulação durante o processamento e o armazenamento (Iqbal *et al.*, 2013; Pires *et al.*, 2017).

Inicialmente, as curvas TG dos tensoativos isolados revelaram comportamentos térmicos típicos de compostos orgânicos anfifílicos. O Tween® 80, avaliado de forma individual, apresentou uma perda de massa gradativa, com início de decomposição térmica relevante a partir de aproximadamente 250 °C, intensificando-se entre 300 °C e 430 °C, com perda total superior a 90%. Já o Span® 80 isolado apresentou perfil semelhante, com perda significativa entre 290 °C e 420 °C, também ultrapassando 85% de perda de massa. Em ambos os casos, não foram observados múltiplos eventos térmicos bem definidos, indicando que a degradação ocorre de forma contínua ao longo do aquecimento, sem transições térmicas abruptas. Em ambos os casos, não foram observados múltiplos eventos térmicos bem definidos, indicando que a degradação ocorre de forma contínua ao longo do aquecimento, sem transições térmicas abruptas. Esses perfis são consistentes com os dados descritos na literatura para polissorbatos, os quais se decompõem de forma progressiva a partir de 200–250 °C, sem formação de subprodutos intermediários (Kishore *et al.*, 2011; Bharti *et al.*, 2021).

A curva TG do óleo de pupunha isolado apresentou três eventos térmicos principais: o primeiro evento leve abaixo de 100 °C, com perda associada à umidade (~1%); o segundo evento, mais pronunciado, entre aproximadamente 200 °C e 320 °C, com perda de massa atribuída à degradação de componentes voláteis (~8%); e um terceiro evento principal, entre 330 °C e 470 °C, com perda superior a 85%, correspondente à degradação da matriz lipídica. A decomposição total da amostra ultrapassou 90%, indicando um perfil típico de degradação térmica de óleos vegetais.

Já em relação às misturas, observou-se que a mistura binária entre o óleo de pupunha e Span® 80 apresentou início de decomposição térmica por volta de 190 °C, com um evento principal entre 300 °C e 470 °C, totalizando uma perda de massa superior a 90%, o que indica que a estabilidade térmica do Span foi mantida mesmo em presença do óleo. A decomposição foi progressiva, porém não completa abaixo de 500 °C, sugerindo boa compatibilidade térmica entre os componentes.

Para a mistura binária entre óleo de pupunha e Tween® 80, a primeira perda de massa significativa ocorreu em torno de 200–310 °C, com uma perda parcial (~10–15%), seguida de um evento de maior intensidade entre 320 °C e 480 °C, com perda total superior a 85%. Esses resultados mostram que não há interação significativa entre o Tween® e o óleo que altere a temperatura de degradação típica do tensoativo, como também apontado por estudos anteriores (Kishore *et al.*, 2011; Sagiri *et al.*, 2012).

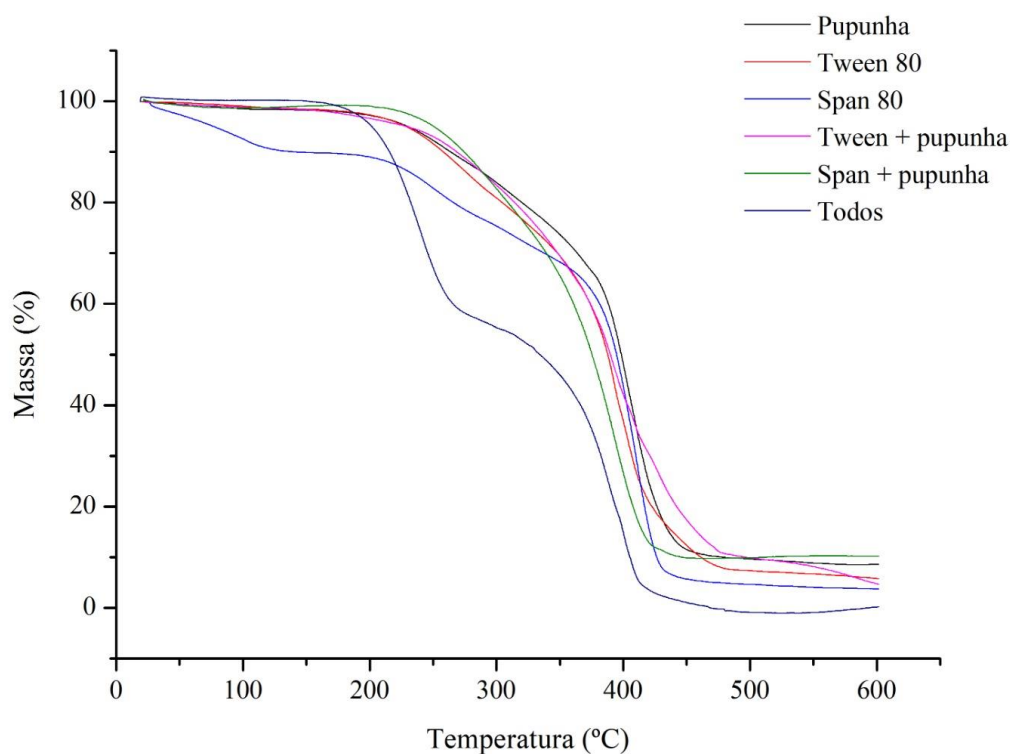
Na mistura binária entre Tween® 80 e Span® 80, a análise termogravimétrica revelou dois eventos térmicos principais. A primeira perda de massa significativa foi observada entre aproximadamente 150 °C e 250 °C, com uma perda parcial em torno de 10–12%, atribuída à evaporação de compostos voláteis ou à degradação inicial de frações mais instáveis dos tensoativos. A segunda etapa, mais intensa, ocorreu entre 260 °C e 460 °C, resultando em uma perda acumulada superior a 85%, correspondente à decomposição térmica das cadeias principais dos surfactantes. Essa sequência de eventos é compatível com os perfis descritos para sistemas que combinam Span e Tween, em que as propriedades térmicas da mistura refletem predominantemente as características individuais dos componentes, sem formação de novos produtos intermediários (Sagiri *et al.*, 2012; Jiang *et al.*, 2022).

Na mistura ternária (óleo de pupunha + Span® 80 + Tween® 80), a decomposição ocorreu em três estágios principais: o primeiro, de baixa intensidade, abaixo de 170 °C, com perda atribuída à liberação de umidade ou compostos voláteis; o segundo entre 280 °C e 350 °C, com perda de cerca de 10–12%; e o terceiro, entre 360 °C e 500 °C, com uma perda expressiva superior a 80%, totalizando cerca de 93% de perda de massa ao final do processo térmico. A sobreposição dos eventos térmicos dos tensoativos e do óleo indica que as misturas não causaram alterações relevantes na estabilidade térmica dos componentes individuais.

Portanto, os perfis térmicos das misturas indicam que as etapas de decomposição típicas do óleo de pupunha são preservadas, mesmo na presença dos tensoativos. No entanto, observa-se um leve deslocamento da faixa de degradação principal para temperaturas mais elevadas nas misturas, especialmente na formulação ternária. Esse comportamento sugere um possível efeito estabilizante proporcionado pelos tensoativos, que pode atrasar o início da degradação térmica

da matriz lipídica. Tal efeito é desejável do ponto de vista tecnológico, pois contribui para maior robustez térmica da formulação final, favorecendo sua estabilidade durante o processamento ou armazenamento. Além disso, o comportamento semelhante entre os eventos térmicos dos sistemas binários e da mistura total reforça a ausência de interações químicas degradativas entre os excipientes e o óleo.

Figura 7 - Curvas de Tg das substâncias isoladas, misturas binárias e ternárias



Fonte: Autora, 2025.

## 4.2 PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO DAS FORMULAÇÕES

### 4.2.1 Determinação do EHL

A determinação do EHL da fase oleosa da nanoemulsão, composta pela mistura dos óleos de pupunha e tensoativos foi realizada por meio do desenvolvimento de formulações contendo tensoativos com valores de EHL previamente estabelecidos. Tensoativos com baixo EHL favorecem a formação de emulsões do tipo água em óleo, enquanto aqueles com alto EHL promovem a formação de emulsões do tipo óleo em água.



A combinação de tensoativos contribui para a estabilidade da nanoemulsão, uma vez que a diferença no tamanho dos grupos principais das moléculas gera um efeito sinérgico entre eles. Esse efeito promove a formação de um revestimento protetor ao redor das gotículas, facilitando sua fragmentação durante o processo de homogeneização e reduzindo a tendência de agregação. Além disso, essa combinação melhora a dispersibilidade e a solubilidade na fase contínua (Komaiko e McClements, 2016; Chong et al., 2018; Koroleva, Nagovitsina e Yurtov, 2018).

A escolha dos tensoativos baseou-se nas características lipofílicas do Span 80 e hidrofílicas do Tween 80, que, além de proporcionarem equilíbrio hidrofílico-lipofílico, favorecem a formação de gotículas menores em comparação a outros polissorbatos da mesma classe. Quando utilizados em conjunto, esses tensoativos diminuem a pressão de Laplace, reduzindo a tensão interfacial e, conseqüentemente, a energia necessária para o processo de emulsificação (Karami, Khoshkam e Hamidi, 2019; Komaiko e McClements, 2016).

Os tensoativos escolhidos foram misturados em proporções variáveis, de modo a originarem valores definidos e escalonados de EHL, conforme pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Características desenvolvidas para determinar o EHL.

<b>Experimento</b>	<b>EHL</b>	<b>Característica macroscópica</b>
1	5,37	Creaming
2	6,44	Creaming
3	7,51	Creaming
4	8,58	Homogênea
5	9,65	Homogênea
6	10,72	Homogênea
7	11,79	Homogênea
8	12,86	Homogênea
9	13,93	Homogênea

Fonte: Autora, 2025.

#### 4.2.2 Avaliação macroscópica em repouso (T0)

As formulações preparadas foram mantidas em repouso por 24h a temperatura ambiente, em recipiente de vidro e hermeticamente fechado, conforme pode ser observado na Figura 8. Após esse período, foi realizada a observação macroscópica dos experimentos, com o objetivo de identificar sinais iniciais de instabilidade, como alterações na coloração, formação de cremes ou separação de fases.

Figura 8 – Formulações para cálculo do EHL após 24h.



Fonte: Autora, 2025.

Nos experimentos 1 a 3, cujos valores de EHL foram inferiores a 7,5, observou-se a ocorrência de *creaming*, fenômeno caracterizado pelo acúmulo da fase dispersa na superfície da emulsão. Esse comportamento ocorre devido à menor densidade da fase oleosa em relação à fase contínua, favorecendo a migração das gotículas para o topo sob a ação da gravidade. Apesar disso, as gotículas permaneceram intactas, mantendo-se na forma de glóbulos, o que permite sua redispersão mediante agitação (Aulton; Taylor, 2016).

Por outro lado, as formulações com EHL entre 8,5 e 13,9 (experimentos 4 a 9) apresentaram aparência homogênea, coloração uniforme e ausência de separação de fases visível, indicando maior estabilidade macroscópica. Além disso, todas as amostras desse grupo mantiveram odor e coloração compatíveis com os ingredientes utilizados, sugerindo ausência de degradação ou oxidação perceptível do óleo.

#### 4.2.3 Avaliação sob estresse mecânico (centrifugação)

Com o objetivo de aprofundar a avaliação da estabilidade física das formulações desenvolvidas, foi realizada uma etapa de centrifugação, que permite antecipar a manifestação de instabilidades que poderiam não ser observadas em condições de repouso. Foram selecionadas para este teste as formulações 4 a 9, as quais se mantiveram estáveis por 24 horas

sem apresentar separação de fases. As amostras foram submetidas à rotação de 3.500 rpm por 30 minutos, a fim de simular um estresse mecânico intenso.

Dentre todas as formulações testadas, apenas a formulação 8 (EHL = 12,86) manteve-se completamente estável após a centrifugação, sem apresentar separação de fases, formação de sedimentos ou ruptura da emulsão. Esse resultado sugere que a proporção dos tensoativos empregada nessa formulação gerou um valor de EHL mais próximo do ideal para o óleo da pupunha, favorecendo a afinidade entre as fases e a formação de um sistema coloidal mais coeso e resistente.

Esses achados reforçam a importância de se definir adequadamente o valor de EHL ao desenvolver emulsões estáveis, uma vez que esse parâmetro influencia diretamente na interação entre os tensoativos e a fase oleosa. Formulações cujos EHLs são compatíveis com as características da fase lipofílica tendem a apresentar maior estabilidade termodinâmica e melhor desempenho físico-visual. Com base nos resultados obtidos, recomenda-se a continuidade do desenvolvimento com a formulação 8, que se destacou entre as demais (Komaiko e McClements, 2016; Mohamadi Saani, Abdolalizadeh e Zeinali Heris, 2019).

#### 4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA NANOEMULSÃO

A caracterização físico-química é uma etapa fundamental no desenvolvimento de sistemas nanoestruturados, pois permite avaliar parâmetros que influenciam diretamente na estabilidade, na eficácia e na aplicabilidade da formulação. Dentre esses parâmetros, destacam-se o tamanho das partículas, o índice de polidispersão (PDI) e o potencial zeta, que fornecem informações cruciais sobre a uniformidade, dispersão e estabilidade eletrocinética do sistema coloidal (Souza *et al.*, 2021).

A formulação selecionada para esta etapa foi aquela que apresentou maior estabilidade macroscópica e comportamento favorável no teste de centrifugação, com valor de EHL 12,86. Essas formulações foram analisadas após 24 horas de preparo, utilizando-se métodos baseados no espalhamento dinâmico de luz (DLS) e na mobilidade eletroforética, conforme metodologia previamente descrita.

##### 4.3.1 Determinação do tamanho de partícula, índice de polidispersão e potencial zeta

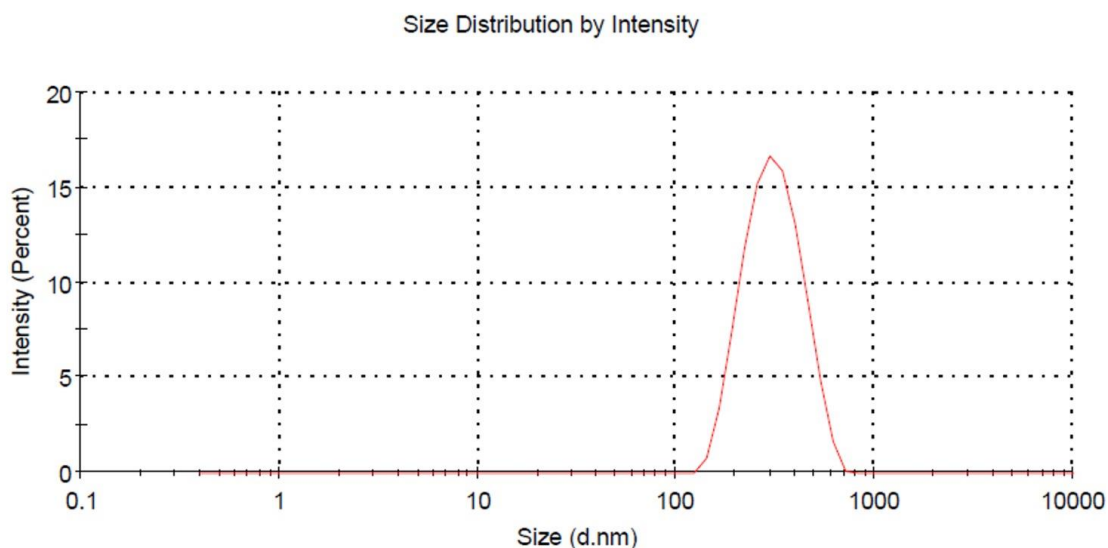
A caracterização da nanoemulsão foi realizada por meio da técnica de Dispersão Dinâmica de Luz (DLS) e análise eletroforética, a fim de avaliar o tamanho médio das

partículas, o índice de polidispersão (PDI) e o potencial zeta, parâmetros fundamentais para prever a estabilidade e a qualidade do sistema coloidal. A técnica de DLS baseia-se na análise do movimento Browniano das partículas dispersas em meio líquido, sendo o tamanho hidrodinâmico estimado a partir da equação de Stokes-Einstein (Moraes *et al.*, 2020).

Na formulação avaliada, observou-se um tamanho médio hidrodinâmico (Z-Average) de 286,1 nm, com um único pico de distribuição em 319,2 nm, indicando um perfil monomodal. O índice de polidispersão (PDI) foi de 0,098, o que evidencia uma distribuição de tamanho altamente homogênea. Segundo Souza *et al.* (2021), valores de PDI inferiores a 0,1 são característicos de sistemas monodispersos e indicam boa uniformidade, o que contribui diretamente para a estabilidade físico-química do sistema.

Figura 9 – Tamanho médio de partícula e PDI da nanoemulsão obtidos por DLS.

<b>Z-Average (d.nm):</b> 286,1	<b>Peak 1:</b>	319,2	100,0	103,0
<b>Pdi:</b> 0,098	<b>Peak 2:</b>	0,000	0,0	0,000
<b>Intercept:</b> 0,884	<b>Peak 3:</b>	0,000	0,0	0,000
<b>Result quality</b> Good				

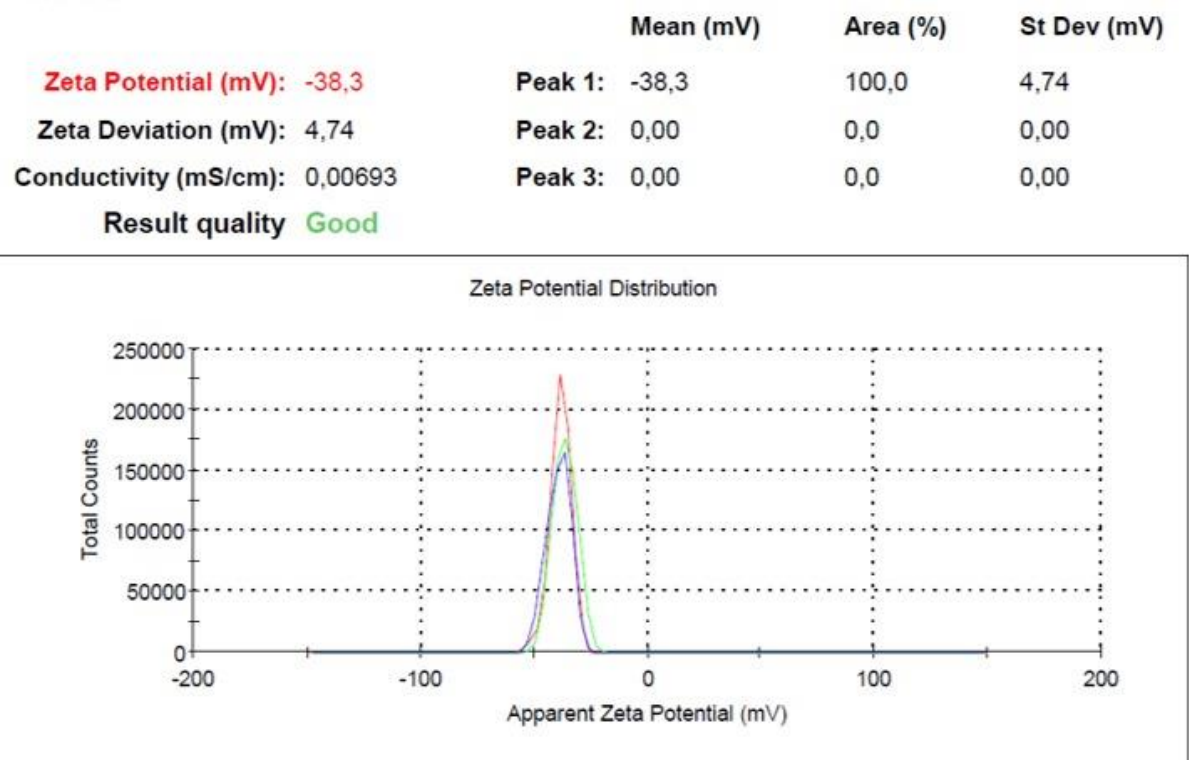


Fonte: Autora, 2025.

O potencial zeta foi determinado por microeletroforese a laser Doppler, com aplicação da equação de Smoluchowski a 25 °C. O valor médio obtido foi de -38,3 mV, com desvio padrão de  $\pm 4,74$  mV, além de condutividade de 0,00693 mS/cm. De acordo com Ghaderi *et al.* (2021), valores absolutos de potencial zeta superiores a  $\pm 30$  mV são considerados satisfatórios

para garantir estabilidade eletrocinética, pois promovem repulsão entre partículas e minimizam o risco de agregação.

Figura 10 – Potencial zeta da nanoemulsão avaliado por análise eletroforética.



Fonte: Autora, 2025.

Portanto, os resultados obtidos confirmam que a nanoemulsão desenvolvida apresenta tamanho nanométrico adequado, alta homogeneidade e excelente estabilidade coloidal, características desejáveis para sistemas destinados a aplicações farmacêuticas, cosméticas ou alimentícias (Santos e Lima, 2023).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que ele apresenta caráter inovador, uma vez que contribui com dados inéditos sobre a avaliação da compatibilidade entre o óleo extraído da casca de pupunha (*Bactris gasipaes*) e os tensoativos Span® 80 e Tween® 80, inexistentes em compêndios oficiais, farmacopeias ou artigos científicos. As análises por FTIR e TG indicaram a preservação dos principais grupos funcionais e padrões térmicos dos componentes nas misturas binárias e ternária, evidenciando ausência de interações químicas degradativas e, portanto, compatibilidade físico-química satisfatória entre os constituintes. A determinação do valor de EHL requerido pelo óleo contribuiu para subsidiar a escolha e proporção dos tensoativos, garantindo equilíbrio hidrofílico-lipofílico adequado para a formação e estabilidade de nanoemulsões. Esses achados são fundamentais para o desenvolvimento seguro e eficiente de nanoemulsões, demonstrando que o óleo de casca de pupunha é compatível com os excipientes avaliados e assegurando estabilidade durante o preparo, armazenamento e aplicação da formulação.

O estudo também evidenciou a viabilidade do uso do óleo da casca de pupunha como fase oleosa em formulações nanotecnológicas, especialmente em função de sua compatibilidade com os tensoativos e de seu potencial bioativo. Contudo, para consolidar sua aplicação em produtos farmacêuticos ou cosméticos, é necessário aprofundar investigações sobre a estabilidade físico-química da nanoemulsão ao longo do tempo, o perfil de liberação *in vitro* e a eficácia biológica, incluindo atividades antioxidante, antimicrobiana e cicatrizante. Também se torna relevante realizar ensaios de citotoxicidade e segurança, explorar a incorporação de fármacos lipofílicos e avaliar o desempenho da nanoemulsão como sistema carreador. Por fim, o escalonamento do processo e a validação da reprodutibilidade em escala piloto representam etapas essenciais para viabilizar a aplicação industrial da formulação desenvolvida.

## REFERÊNCIAS

ADAMU, H. M.; MOHAMMED-DANJUMA, A.; IBRAHIM, A. D. Synthesis and characterization of yellow oleander (*Thevetia peruviana*) seed oil-based alkyd resin. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 25, n. 3, p. 503–508, 2016. DOI: 10.1016/j.ejpe.2015.07.001.

ARANTES, M. S. T. et al. Composition and potential utilization strategies of by-products from the Brazilian peach palm industry. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 48, e006224, 2024. DOI: 10.1590/1413-7054202448006224.

ASHAOLU, T. J. Nanoemulsions for health, food, and cosmetics: a review. **Environmental Chemistry Letters**, 19, 3381–3395, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01216-9>.

ASHAOLU, T. J. Recent advances in nanoemulsion-based therapeutics: emerging trends and applications. **Applied Nanoscience**, v. 15, n. 2, p. 459–471, 2025. DOI: 10.1007/s40883-025-00459-0.

ASSANVO, E. F.; GOGOI, P.; DOLUI, S. K.; BARUAH, S. D. Synthesis, characterization, and performance characteristics of alkyd resins based on *Ricinodendron heudelotii* oil and their blending with epoxy resins. **Scientific African**, v. 14, e01042, 2021. DOI: 10.1016/j.sciaf.2021.e01042.

AULTON, M. E.; TAYLOR, K. M. G. *Delineamento de Formas Farmacêuticas*. 4. ed. Elsevier, 855 p., 2016.

BHARTI, B. et al. Effect of biodegradable hydrophilic and hydrophobic surfactants on crystallization behavior of hydrated salts. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 17438, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-96992-z.

CARVALHO, A. C. G. et al. Peach palm fruit presents high nutritional value, rich in fat, fiber, starch and total carotenoids. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 2024.

CHAVDA, V. P. et al. Nanoemulsions: Summary of a decade of research and recent advances. **Nanomedicine**, v. 19, n. 6, p. 519–536, 2024. <https://doi.org/10.2217/nnm-2023-0199>.

CHISTÉ, R. C. et al. Carotenoid and phenolic composition of cooked orange and yellow *Bactris gasipaes* pulp fruits. **Food Chemistry**, v. 272, p. 216–224, 2019. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.08.155.

CHONG, W. T. et al. Optimization of process parameters in preparation of tocotrienol-rich red palm oil-based nanoemulsion stabilized by Tween 80-Span 80 using response surface methodology. **PLoS ONE**, v. 13, n. 8, 2018.

CLEMENT, C. R. et al. Origin and dispersal of domesticated peach palm. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 5, art. 148, p. 1–13, 2017. DOI: 10.3389/fevo.2017.00148.

COUVREUR, T. L. P. et al. Molecular phylogenetics reveal multiple tertiary vicariance origins of the African rain forest trees. **BMC Biology**, v. 3, p. 1–13, 2005. <https://doi.org/10.1186/1741-7007-3-5>.

DOS SANTOS, O. V. et al. Chromatographic profile and bioactive compounds found in the composition of pupunha oil (*Bactris gasipaes* Kunth): implications for human health. **Revista de Nutrição**, v. 33, p. e190146, 2020. DOI: 10.1590/1678-9805202033e190146.

ELSEWEDY, H. S. Insights of Nanoemulsion as a Drug Delivery System: An Overview of Current Trends and Applications. **Indian Journal of Pharmaceutical Education and Research**, v. 59, n. 2, p. 472–492, 2025. <https://doi.org/10.5530/ijper.20250937>.

FAROOQ, A. et al. Enhanced stability of bio-oil and diesel fuel emulsion using Span 80 and Tween 60 emulsifiers. **Fuel**, v. 319, p. 123734, 2022. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123734.

FERNANDEZ-LÓPEZ, C. et al. Thermal and spectroscopic analysis of essential oil nanoemulsions by FTIR and TG. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, p. 4977–4988, 2022. DOI: 10.1007/s10973-022-10672-8.

GALLUZZI, G. et al. An integrated hypothesis on the domestication of *Bactris gasipaes*. **PLoS ONE**, v. 10, n. 12, e0144644, 2015. DOI: 10.1371/journal.pone.0144644.

GHARIBZAHEDI, S. M. T.; MOHAMMADNABI, S. Characterizing the novel surfactant-stabilized nanoemulsions of stinging nettle essential oil: Thermal behaviour, storage stability,



antimicrobial activity and bioaccessibility. **Journal of Molecular Liquids**, v. 224, p. 1332–1340, 2016.

GIOMBELLI, C. et al. Valorization of peach palm by-product through subcritical water extraction of soluble sugars and phenolic compounds. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 165, art. 104985, 2020. DOI: 10.1016/j.supflu.2020.104985.

GONZÁLEZ-JARAMILLO, N. et al. Peach Palm (*Bactris gasipaes* Kunth.): ancestral tropical staple with future potential. **Plants**, v. 11, n. 22, art. 3134, 2022. DOI: 10.3390/plants11223134.

GUPTA, A. et al. Nanoemulsions: formation, properties and application. **Soft Matter**, v. 12, n. 11, p. 2826–2841, 2016. <https://doi.org/10.1039/C5SM02958A>.

IQBAL, Mohammad S. et al. Thermal analysis of some natural polysaccharide materials by isoconversional method. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 140, n. 1–2, p. 178–182, 2013.

JAISWAL, M.; DUDHE, R.; SHARMA, P. K. Nanoemulsion: an advanced mode of drug delivery system. **3 Biotech**, v. 5, p. 123–127, 2015. <https://doi.org/10.1007/s13205-014-0214-0>.

JIANG, X. et al. Characterization of the addition of lipophilic Span 80 to the hydrophilic Tween 80-stabilized emulsions. **Pharmaceuticals**, Basel, v. 15, n. 11, p. 1357, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph15111357>.

KARAMANIDOU, T. et al. Lipid-based nanocarriers for the oral administration of biopharmaceutics: a review of characterization and in vivo evidence. **Nanomedicine**, v. 11, n. 17, p. 2325–2344, 2016. DOI: 10.2217/nnm-2016-0265.

KISHORE, R. S. K. et al. Degradation of polysorbates 20 and 80: studies on thermal autoxidation and hydrolysis. **Journal of Pharmaceutical Sciences**, [S.l.], v. 100, n. 2, p. 721–731, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/jps.22386>. Acesso em: 6 ago. 2025.

KHALID, A. et al. Development, stabilization, and characterization of nanoemulsion of vitamin D<sub>3</sub>-enriched canola oil. **Frontiers in Nutrition**, v. 10, p. 1205200, 2023. DOI: 10.3389/fnut.2023.1205200.

KOMAIKO, J. S.; MCCLEMENTS, D. J. Formation of food-grade nanoemulsions using low-energy preparation methods: a review of available methods. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 15, p. 331–352, 2016. DOI: 10.1111/1541-4337.12189.

KOROLEVA, M.; NAGOVITSINA, T.; YURTOV, E. Nanoemulsions stabilized by nonionic surfactants: stability and degradation mechanisms. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 20, n. 15, p. 10369–10377, 2018. DOI: 10.1039/c7cp07626f.

KRAMER, Y. V. et al. Understanding the technical-scientific gaps of underutilized tropical species: The case of *Bactris gasipaes* Kunth. **Plants**, v. 12, n. 2, p. 337, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12020337>.

MATOS, K. A. et al. Peels of tucumã (*Astrocaryum vulgare*) and peach palm (*Bactris gasipaes*) are by-products classified as very high carotenoid sources. **Food Chemistry**, v. 272, p. 216–224, 2019. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.08.053.

MIRANDA, F. et al. Species Diversity of the Family Arecaceae: What Are the Implications of Their Biogeographical Representation? **Forests**, v. 16, n. 1, p. 76, 2025. DOI: 10.3390/f16010076.

MUSAKHANIAN, J.; OSBORNE, D. W. Understanding microemulsions and nanoemulsions in (trans)dermal delivery. **AAPS PharmSciTech**, v. 26, n. 1, p. 31, 2025. DOI: 10.1208/s12249-024-02997-2.

MUSHTAQ, A. et al. Recent insights into nanoemulsions: their preparation, properties and applications. **Food Chemistry: X**, v. 19, art. 100684, 2023. DOI: 10.1016/j.fochx.2023.100684.

NAZARI; ZHANG, J. et al. Hydrothermal liquefaction of woody biomass in hot-compressed water: catalyst screening and comprehensive characterization of bio-crude oils. **Energy**, v. 95, p. 38–46, 2016. DOI: 10.1016/j.energy.2015.11.051.

ORDOÑEZ-SANTOS, L. E. et al. Extraction of total carotenoids from peach palm fruit (*Bactris gasipaes* Kunth) peel by means of ultrasound application and vegetable oil. **DYNA**, v. 86, n. 209, p. 91–96, 2019. DOI: 10.15446/dyna.v86n209.74840.

ORDOÑEZ-SANTOS, L. E. et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of total carotenoids from peach palm fruit (*Bactris gasipaes*) by-products with sunflower oil using response surface methodology. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 27, p. 560–566, 2015. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2015.04.010.

PIRES, Felipe Q. et al. Use of mixture design in drug-excipient compatibility determinations: Thymol nanoparticles case study. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, [s. l.], v. 137, p. 196–203, 2017.

POLJŠAK, N.; KOČEVAR GLAVAČ, N. Vegetable butters and oils as therapeutically and cosmetically active ingredients for dermal use: a review of clinical studies. **Frontiers in Pharmacology**, v. 13, art. 868461, 2022. DOI: 10.3389/fphar.2022.868461.

RIBEIRO, R. C. D. et al. Production and characterization of cosmetic nanoemulsions containing *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill extract as moisturizing agent. **Molecules**, v. 20, n. 2, p. 2492–2509, 2015.

SAGIRI, S. S. et al. Effect of composition on the properties of Tween-80–Span 80 mixtures. **Journal of Surfactants and Detergents**, New York, v. 15, n. 4, p. 495–505, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11743-011-1322-4>.

SHAKER, D. S. et al. Nanoemulsion: A Review on Mechanisms for the Transdermal Delivery of Hydrophobic and Hydrophilic Drugs. **Scientia Pharmaceutica**, v. 87, n. 3, art. 17, 2019. <https://doi.org/10.3390/scipharm87030017>.

SODRÉ, R. A. R. Obtenção e caracterização de nanoemulsão óleo-em-água contendo óleo de açaí e agente antifúngico por meio de análises FTIR e TG. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências Farmacêuticas) – Universidade Federal do Pará, Belém. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br>. Acesso em: 27 jul. 2025.

SONG, R.; LIN, Y.; LI, Z. Ultrasonic-assisted preparation of eucalyptus oil nanoemulsion: process optimization, in vitro digestive stability, and anti-*Escherichia coli* activity. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 82, art. 105904, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105904>.

SPACKI, K. C. et al. Full exploitation of Peach Palm (*Bactris gasipaes* Kunth): state of the art and perspectives. **Plants**, v. 11, n. 22, art. 3175, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11223175>.

TADROS, T. et al. Formation and stability of nano-emulsions. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 108–109, p. 303–318, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2003.10.023>.

TICHOTA, D. M. et al. Design, characterization and clinical evaluation of argan oil nanostructured lipid carriers to improve skin hydration. **International Journal of Nanomedicine**, v. 9, p. 3855–3864, 2014. DOI: 10.2147/IJN.S64008.

YUYAMA, L. K. O.; COZZOLINO, S. M. F. Composição química de alimentos da Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 26, n. 3, p. 193–198, 1996. DOI: 10.1590/fst.82721.

ZHAO, S. et al. Characterization of nanoemulsions stabilized with different emulsifiers and their encapsulation efficiency for oregano essential oil. **Foods**, v. 12, n. 17, p. 3183, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12173183>.