



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

BÁRBARA BEATRIZ CAXILÉ COSTA

ESTUDO DO POTENCIAL ANTIOXIDANTE DO EXTRATO ETANÓLICO
DA *AMBURANA CEARENSIS* COMO FATOR DETERMINANTE NA
ESTABILIDADE OXIDATIVA DO BIODIESEL DE SOJA

SÃO LUÍS, MA

2026

BÁRBARA BEATRIZ CAXILÉ COSTA

ESTUDO DO POTENCIAL ANTIOXIDANTE DO EXTRATO ETANÓLICO
DA *AMBURANA CEARENSIS* COMO FATOR DETERMINANTE NA
ESTABILIDADE OXIDATIVA DO BIODIESEL DE SOJA

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em CIÊNCIAS &
TECNOLOGIA AMBIENTAL da Universidade
Federal do Maranhão como requisito à
obtenção do título de MESTRE.

Orientador(a): Dra. Ionara Nayana Gomes Passos

Coorientador(a): Dr. Adriano Gomes de Castro

Linha de pesquisa: Biotecnologia e Tecnologias Aplicadas ao Meio Ambiente

SÃO LUÍS, MA

2026

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Caxilé Costa, Bárbara Beatriz.

ESTUDO DO POTENCIAL ANTIOXIDANTE DO EXTRATO ETANÓLICO
DA AMBURANA CEARENSIS COMO FATOR DETERMINANTE NA
ESTABILIDADE OXIDATIVA DO BIODIESEL DE SOJA / Bárbara
Beatriz Caxilé Costa. - 2026.

55 p.

Coorientador(a) 1: Adriano Gomes de Castro.

Orientador(a): Ionara Nayana Gomes Passos.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Ciência e Tecnologia Ambiental/ccet, Universidade Federal
do Maranhão, São Luís - Ma, 2026.

1. Biodiesel. 2. Antioxidante Natural. 3. Amburana
Cearensis. 4. Estabilidade Oxidativa. 5. Extrato
Etanólico. I. Gomes Passos, Ionara Nayana. II. Gomes de
Castro, Adriano. III. Título.

BÁRBARA BEATRIZ CAXILÉ COSTA

**ESTUDO DO POTENCIAL ANTIOXIDANTE DO EXTRATO ETANÓLICO DA
AMBURANA CEARENSIS COMO FATOR DETERMINANTE NA ESTABILIDADE
OXIDATIVA DO BIODIESEL DE SOJA**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em CIÊNCIAS &
TECNOLOGIA AMBIENTAL da Universidade
Federal do Maranhão como requisito à
obtenção do título de MESTRE.

Aprovada em 27/02/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Ionara Nayana Gomes Passos
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Harvey Alexander Villa Vélez
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Jardes Figuerêdo do Rêgo
Centro Universitário AFYA – Teresina – Piauí

SÃO LUÍS, MA

2026

AGRADECIMENTOS

A Deus por me sustentar e me levantar todos os dias, em que a força humana mandava eu parar.

A Universidade Federal do Maranhão - UFMA, Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGC&Tamb, CAPES, pela oportunidade e suporte necessário durante esse trajeto, a Universidade Federal do Piauí pelo laboratório de química e ao Laboratório Matsens de Engenharia de Materiais, empresa BIOPAR, EMBRAPA meio norte, Prefeitura Municipal de Bacabal - MA, através da Secretaria Municipal de Meio Ambiente, a empresa Analysis, ao Laboratório Biopolmat da Uniara - Araraquara SP.

As minhas amigas incentivadoras desde o início do projeto Klenne Novais Vilanova e Jennifer da Cruz Arouche Silva, aos colegas, familiares e ao meu pai Gerardo Magela da Costa por financiar meus estudos e pesquisas fora do meu domicílio. Ao meu tio materno Vitorino Fontenele Freire pelo apoio e conselhos. E não poderia deixar de mencionar, que mesmo não estando presente em vida, mas sentindo a presença constante e ouvindo sua voz me aconselhando: “Não desista Bia, você vai longe, minha filha” – minha querida mãe (*in memoriam*).

RESUMO

O presente trabalho de dissertação de mestrado visa mostrar o estudo da estabilidade à oxidação do biodiesel pelo uso do extrato etanólico obtido do exsudato da *Amburana cearensis* como aditivo antioxidante natural. A incorporação de antioxidantes é uma estratégia amplamente empregada para mitigar a degradação oxidativa do biodiesel; entretanto, os antioxidantes sintéticos estão frequentemente associados a alto custo, potencial toxicidade e baixa biodegradabilidade a descoberta de novas substâncias químicas tem se tornado uma área de grande avanço científico. Os resultados experimentais do extrato etanólico da *Amburana cearensis* mostraram eficiência antioxidante conforme determinado pelo ensaio de sequestro de radical ABTS •⁺, que mostrou alta atividade antioxidante mesmo com perda de massa em relação ao tempo. Na análise termogravimétrica e térmica diferencial (TG/DTA) revelou sua estabilidade térmica em altas temperaturas começando a se degradar a partir de 281°C. A caracterização química por HPLC e o DI-ESI-IT-MSⁿ identificaram os compostos responsável pela atividade antioxidante, o metabólito predominante foi associado a cumarinas, flavonoides e ácidos fenólicos. Fragmentos de 5 compostos foram identificados como buteina, calicosina, cirsimaritina, 3,5,3'-tri-hidroxi-7,4-dimetoxiflavona e nevadensina. A eficácia do extrato como antioxidante no biodiesel foi avaliada pelo método Rancimat (EN 14112). A amostra tratada apresentou um tempo de indução de 11,03 h, com 3000 ppm do extrato etanólico, aproximando-se bastante dos limites estabelecidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). De modo geral, os fitoquímicos presentes no exsudato da *Amburana cearensis* evidenciam relevante potencial científico, ambiental e socioeconômico, apoiando seu uso como alternativa verde e regional aos antioxidantes sintéticos.

Palavras-Chave: Biodiesel; Antioxidante Natural; *Amburana cearensis*; Estabilidade Oxidativa; Extrato Etanólico.

ABSTRACT

This master's thesis aims to investigate the oxidative stability of biodiesel through the use of an ethanolic extract obtained from the exudate of *Amburana cearensis* as a natural antioxidant additive. The incorporation of antioxidants is a widely used strategy to mitigate the oxidative degradation of biodiesel; however, synthetic antioxidants are often associated with high cost, potential toxicity, and low biodegradability, making the discovery of new chemical substances an area of significant scientific advancement. Experimental results for the ethanol extract of *Amburana cearensis* demonstrated antioxidant efficacy as determined by the ABTS •⁺ radical scavenging assay, which showed high antioxidant activity even with mass loss over time. Thermogravimetric and differential thermal analysis (TG/DTA) revealed its thermal stability at high temperatures, with degradation beginning at 281°C. Chemical characterization by HPLC and DI-ESI-IT-MSⁿ identified the compounds responsible for the antioxidant activity; the predominant metabolite was associated with coumarins, flavonoids, and phenolic acids. Fragments of five compounds were identified as butein, calicosin, cirsimaritin, 3,5,3-trihydroxy-7,4-dimethoxyflavone, and nevadensiv. The extract's efficacy as an antioxidant in biodiesel was evaluated using the Rancimat method (EN 14112). The treated sample exhibited an induction time of 11.03 h with 3000 ppm of the ethanolic extract, coming very close to the limits established by the National Agency of Petroleum, Natural Gas, and Biofuels (ANP). Overall, the phytochemicals present in the exudate of *Amburana cearensis* demonstrate significant scientific, environmental, and socioeconomic potential, supporting its use as a green and regional alternative to synthetic antioxidants.

Keywords: Biodiesel; Natural Antioxidant; *Amburana cearensis*; Oxidative Stability; Ethanolic Extract.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1 Biodiesel	8
2.2 Estabilidade do Biodiesel	12
3.3 Gomas Naturais	14
3. OBJETIVOS	17
3.1 Geral	17
3.2 Específicos	17
REFERÊNCIAS (Introdução)	18
4. APRESENTAÇÃO DO ARTIGO	19
ARTIGO	20
5. CONTRIBUIÇÕES ATRELADAS A DISSERTAÇÃO	46
5.1 Importância social	46
5.2 Importância econômica	46
5.3 Importância ambiental	47
NORMA DA REVISTA	48

1 INTRODUÇÃO

O biodiesel é um biocombustível obtido por meio da transesterificação de óleos e gorduras, amplamente reconhecido por sua origem renovável e por sua contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a instabilidade oxidativa permanece como um dos principais desafios técnicos e comerciais para sua produção e uso eficiente. Tal limitação decorre da suscetibilidade dos ésteres metílicos de ácidos graxos à oxidação durante as etapas de armazenamento e transporte, o que pode resultar em alterações indesejáveis nas propriedades físico-químicas do combustível, como aumento da acidez e da viscosidade, além da formação de sedimentos, comprometendo o desempenho de motores a diesel (David; Kopac, 2023).

Com o objetivo de assegurar a qualidade e a competitividade do biodiesel brasileiro, a Resolução ANP nº 920, de 4 de abril de 2023, estabeleceu as especificações técnicas para o biodiesel comercializado no País, incluindo requisitos relacionados à estabilidade à oxidação. Essa normativa define o aditivo antioxidante como uma substância capaz de retardar a oxidação lipídica de óleos e gorduras, determinando que o biodiesel em circulação contenha aditivos com essa função. Além disso, o tipo e a concentração do antioxidante utilizado devem constar no certificado de qualidade do produto (Brasil, 2023).

Diversos estudos relatam que antioxidantes sintéticos, como o butil-hidroxitolueno (BHT), o butil-hidroxianisol (BHA) e a tert-butil-hidroquinona (TBHQ), são tradicionalmente empregados para aumentar a estabilidade oxidativa do biodiesel, atuando na interrupção das reações em cadeia responsáveis pela degradação do combustível. Entretanto, esses compostos apresentam limitações relevantes, tais como impactos ambientais negativos, restrições de desempenho em baixas temperaturas e baixa biodegradabilidade, o que tem estimulado a busca por alternativas mais sustentáveis e alinhadas aos princípios da Química Verde (David; Kopac, 2023).

Nesse contexto, antioxidantes naturais extraídos de fontes vegetais têm emergido como alternativas promissoras, em razão de sua menor toxicidade, maior biodegradabilidade e ampla disponibilidade de compostos fenólicos com reconhecida

atividade antioxidante. As principais fontes naturais de polissacarídeos incluem fungos, celulose, exsudatos vegetais e algas (De Paula *et al.*, 1998; De Oliveira Farias *et al.*, 2025). Estudos envolvendo extratos vegetais demonstram que compostos fenólicos naturais podem atuar como doadores de elétrons ou de hidrogênio para radicais livres, interrompendo as cadeias reativas de oxidação, de maneira semelhante àquela observada em sistemas lipídicos como o biodiesel.

A goma de *Amburana cearensis* (GAmb) é um polissacarídeo de caráter polieletrólito, obtido a partir do exsudato do tronco dessa espécie, e tem sido amplamente investigada devido à sua composição fitoquímica rica em cumarinas e outros compostos fenólicos com atividade antioxidante relevante. Estudos etnobotânicos e fitoquímicos indicam que extratos etanólicos e frações da *Amburana cearensis* apresentam significativa atividade antioxidante em ensaios com radicais livres, atribuída principalmente à presença de flavonoides e fenóis, evidenciando seu potencial como fonte de antioxidantes naturais para aplicações tecnológicas (De Oliveira Farias *et al.*, 2025). Diante desse perfil fitoquímico, o extrato etanólico da *Amburana cearensis* surge como candidata potencial para aplicação como aditivo antioxidante em sistemas lipídicos, incluindo o biodiesel.

Considerando a necessidade da adição de antioxidantes ao biodiesel para aumentar sua estabilidade oxidativa, em razão da presença de sítios reativos associados aos carbonos metilênicos adjacentes às insaturações, os quais são suscetíveis ao processo de auto-oxidação, torna-se relevante o desenvolvimento de alternativas aos antioxidantes sintéticos atualmente utilizados. Nesse sentido, esta pesquisa avalia o extrato etanólico obtido a partir da goma da *Amburana cearensis* como um antioxidante de origem natural uma abordagem inovadora ao destacar o potencial científico, ambiental e socioeconômico de antioxidantes naturais aplicados à estabilização oxidativa do biodiesel.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Biodiesel

A Lei nº 11.097 sancionada em 2005 apresenta o biodiesel como sendo qualquer combustível proveniente de biomassa a partir de fontes renováveis para uso em motores que dependem do ciclo do diesel para seu funcionamento. O artigo 2 da Resolução da ANP nº 45/2014, estabelece que biodiesel é todo combustível que em sua composição contém alquil ésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa, produzido a partir do processo de transesterificação e/ou esterificação de matérias graxas, de gorduras de origem vegetal ou animal (ANP, 2014).

A pressão mundial sobre o uso de combustíveis provenientes de fontes não renováveis obrigou alguns países industrializados durante a Convenção de Kyoto a assumirem propostas, a fim de auxiliar na redução de emissão de gases poluentes na atmosfera, por meio de novas fontes de energias alternativas (Wendt, 2021).

No ano de 2019, a ANP iniciou levantamentos para validar a utilização de biocombustíveis a partir de óleos vegetais. O biodiesel é reconhecido pelas propriedades que o compõem, independentemente de processo produtivo pelo qual passa durante sua fabricação, devendo obedecer aos padrões determinados na norma técnica da ANP RAMP 798/2019 que altera a Resolução ANP nº 45, de 25 de agosto de 2014, as quais determinam as propriedades que o produto (Tabela 1) deverá apresentar para ser aceito no mercado de combustíveis e segue os padrões nacionais da Organização Nacional de Normalizações do Brasil (ABNT), da American Society for Testing and Materials (ASTM), International Organization for standardization (ISO) e do Comitê Europeu de Normalização (CEN) (ANP, 2019; Cruz *et al.*, 2022).

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas do biodiesel

Propriedade físico-química	Limite	Normas de procedimentos
Ponto de fulgor (°C)	100min	NBR14598; ISSO/CD3679
Viscosidade cinemática a 40°C	3,0 — 6,0	NBR10441; D445; EM/ISO31
Teor de água (mg/kg)	500,0 máx.	ASTM D 6304; EM ISSO 12937
Cinzas sulfatadas (% m/m)	0,02 máx.	NBR9842; D874; IS3987
Enxofre total (mg/kg)	50,0 máx.	D5453; EN/ISO14596

Corrossividade ao cobre por 3h a 50°C	No 1 máx.	NBR15342; D130; EN/ISO2160
Teor de éster (% m/m)	96,5 mín.	NBR15342; EN14103
Número de cetano	Anotar	D613; EN/ISO5165
Resíduo de carbono (%m/m)	0,05 máx.	D4530; EN/ISO10370
Índice de acidez (mg KOH/g)	0,50 máx.	NBR14448; D664; EN10104
Glicerina livre (%m/m)	0,02 máx.	D6854; EN14105-6
Glicerina total (%m/m)	0,25 máx.	D6854; EN14105
Fósforo (mg/kg)	Anotar	D4951; EN14107
Massa específica a 20°C (kg/m³)	850-900	NBR7148/14065; D1298/4052
Metanol ou etanol, Max (%m/m)	0,20 máx.	NBR15343; EN14110
Número de iodo	Anotar	EN14111
Monoglicerídeos (%m/m)	Anotar	D6584; EN14105
Diglicerídeos (%m/m)	Anotar	D6584; EN14105
Triglicerídeos (%m/m)	Anotar	D6584; EN14105
Sódio e potássio (mg/kg)	5 máx.	EN14108-9
Estabilidade à oxidação a 110°C, min	12 hs	EN 14112; EN 15751

Fonte: ANP (2019), adaptada pela autora (2022).

Essas especificações têm sido aprimoradas constantemente com as normas internacionais e retificação da sua qualidade às condições do mercado brasileiro, garantindo segurança e previsibilidade aos agentes econômicos. Dentre estes parâmetros, a estabilidade oxidativa do biodiesel refere-se ao comportamento do biocombustível no que tange à durabilidade na presença de luz, calor, umidade e outros fatores envolvidos no transporte e estocagem do biocombustível a matéria-prima (ANP, 2023).

O Uso de óleos vegetais como substituto ao óleo diesel tem sido alvo de pesquisas mundiais há muitos anos. Por possuírem alto índice de cetano e um poder calorífico elevado, teoricamente, seu uso in natura se presta bem para a queima em motores de ciclo diesel, como presssupunha o próprio inventos deste motor, Rudolf Diesel, que em 1900 apresentou na Alemanha um modelo capaz de queimar óleo de amendoim. (Leite, 2018).

O uso direto de óleos vegetais e animais como combustível foi superado pelo uso de óleo diesel derivado do petróleo, tanto por fatores econômicos quanto técnicos. A

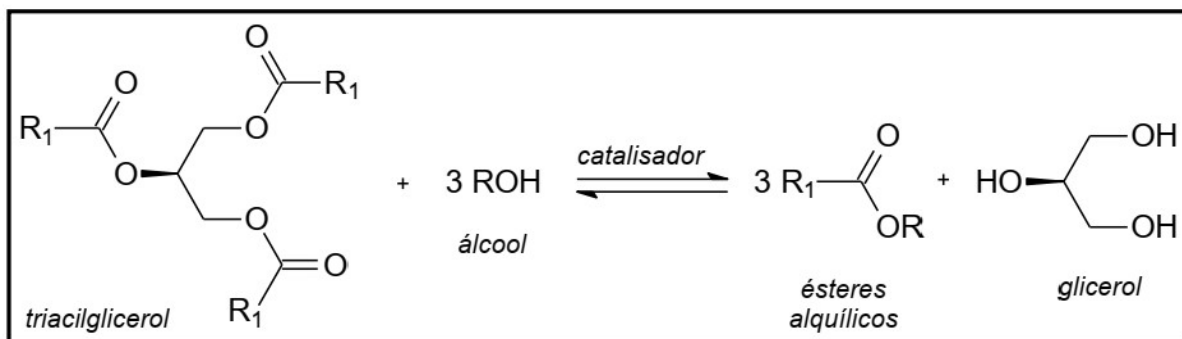
utilização direta do óleo in natura pode causar danos aos motores de ciclo diesel, com a ocorrência de excessivos depósitos de carbono, obstrução nos filtros de óleo e bicos injetores, a diluição parcial do combustível no lubrificante e comprometimento da durabilidade do motor (Ribeiro *et al.*, 2007).

Devido ao seu alto ponto de fusão e viscosidade, as gorduras não podem ser usadas diretamente nos motores, nem mesmo misturadas com combustível diesel (Duarte *et al.*, 2022).

Na transesterificação de óleos vegetais, um triacilglicerol reage com um álcool na presença de uma base ou ácido forte, produzindo uma mistura de ésteres de ácidos graxos e glicerol, conforme esquematizado na figura 1. O processo geral é uma sequência de três reações consecutivas, na qual mono e diacilglicerol são formados como intermediários (Schuchardt *et al.*, 1998). Para uma transesterificação estequiometricamente completa, uma proporção molar 3:1 de álcool por molécula de triacilglicerol é necessária (Meher *et al.*, 2006).

Entretanto, devido ao caráter reversível da reação, o agente transesterificante (álcool) geralmente é adicionado em excesso contribuindo, assim, para aumentar o rendimento do éster, bem como permitir a sua separação do glicerol formado (Meher *et al.*, 2006).

Figura 1 – Esquema de reação química para obtenção do biodiesel.



Uma grande variedade de óleos vegetais pode ser utilizada para preparação de biodiesel. Entre os mais estudados encontram-se os óleos de soja, girassol, palma e babaçu (Schuchardt *et al.*, 1998) e a composição diversificada de seus ácidos graxos é um fator que influencia nas propriedades do biodiesel (Pinto, 2005).

Óleos vegetais usados, também são considerados como uma fonte promissora

para obtenção do biocombustível, por envolver reciclagem de resíduos e baixo custo (Costa *et al.*, 2021). O produto obtido é comparável com o biodiesel a partir do óleo refinado (Felizardo *et al.*, 2006).

Com relação ao agente transesterificante, o processo reacional ocorre preferencialmente com álcoois de baixa massa molecular, como por exemplo, metanol, etanol, propanol, butanol e álcool amílico (Ferrari *et al.*, 2005), porém o metanol e o etanol são os mais empregados. O metanol é o mais utilizado devido o seu baixo custo na maioria dos países e às suas vantagens físicas e químicas que inclui uma maior polaridade e por ser um álcool de cadeia mais curta, reage rapidamente com o triacilglicerol e dissolve facilmente o catalisador básico (Ma; Hanna, 1999). Além disso, permite a separação simultânea do glicerol (Schuchardt *et al.*, 1998).

A mesma reação usando etanol é mais complicada, pois a ligação O-H do etanol (pK_a 15,9) é mais forte do que aquela do metanol (pK_a 15,5), por sua vez, o efeito indutivo de repulsão de elétrons do grupamento etila é maior que do grupo metila, isto faz com que a disponibilidade dos elétrons do oxigênio $s+01$ seja reduzida na rota etílica, e a reação torna-se mais lenta (Holanda, 2004). Além disso, a presença de água (4 – 6%) existente no etanol retarda a reação, sendo necessária a utilização de etanol anidro para minimizar este inconveniente (Ramos, 2003).

O processo de transesterificação pode ser realizado tanto em meio ácido como em meio básico ou até mesmo utilizando enzimas. Entre os catalisadores básicos estão os hidróxidos de metais alcalinos, carbonatos e alcóxidos de metais alcalinos (metóxido de sódio, etóxido de sódio, propóxido de sódio e butóxido de sódio) (Ma; Hanna, 1999). Sendo que a maior parte dos trabalhos descritos na literatura emprega catalisadores básicos, tais como KOH e NaOH onde foram observados maior rendimento e seletividade (Freedman *et al.*, 1986).

No entanto, outros catalisadores básicos não iônicos podem ser usados na transesterificação dos triacilgliceróis, evitando a formação de subprodutos indesejáveis como os sabões, dentre eles destaca-se a trietilamina, piperidina e guanidinas (Schuchardt *et al.*, 1998).

No processo de transesterificação, a velocidade de reação, quando se utiliza

catalisador básico é de 4000 vezes mais rápida, se comparado com uma mesma quantidade de catalisador ácido (Fukuda *et al.*, 2001), isso acontece porque o ânion alcóxido é um nucleófilo muito mais poderoso do que o metanol, o que facilita o ataque ao grupo éster. Por esta razão, e aliado ao fato dos catalizadores alcalinos serem menos corrosivos, este processo é o mais comumente utilizado pelas indústrias.

De acordo com dados da literatura, a transesterificação alcalina pode ser realizada satisfatoriamente à temperatura ambiente, o aquecimento tende a favorecer reações paralelas como a saponificação dos ésteres (Ferrari *et al.*, 2005; Vicente, 2006).

Os ácidos de Brownsted como: sulfúrico, sulfônico, fosfórico e clorídrico, são geralmente empregados como catalisadores na transesterificação para a produção do biodiesel. Esses catalisadores possibilitam um alto rendimento, no entanto, as reações são mais lentas, exigindo altas temperaturas (acima de 100°C) e mais de 3h para completar a conversão (Fukuda *et al.*, 2001; Meher *et al.*, 2006).

Embora a transesterificação catalisada por ácido seja mais lenta do que por catálise básica, a mesma é adequada para óleos vegetais com altos conteúdos de ácidos graxos livres (Fukuda *et al.*, 2001). Os ácidos catalisam a esterificação dos ácidos graxos livres, produzindo ésteres de ácidos graxos aumentando desta forma o rendimento da reação.

2.2 Estabilidade do biodiesel

De acordo com Jain e Sharma (2010) a estabilidade do biodiesel possui três fases distintas conforme sua classificação: térmica (proveniente dos fenômenos de temperatura), armazenamento (referente à estocagem) e oxidativa (associada aos efeitos da oxidação em virtude do calor, luz e microorganismos). Em todas as fases do processo de produção, o biodiesel permanece vulnerável a alteração de suas propriedades físico-químicas, sendo que o efeito desses fatores pode ser variável, conforme a matéria-prima utilizada, bem como estocagem e transporte (Silva, 2017).

Quando se inicia o processo oxidativo ocorre uma reação em cadeia onde os compostos de cadeias pequenas ocasionam a oclusão do filtro de combustível e bico

ejetor, formando precipitados em diversos segmentos do sistema, alterando assim sua coloração, acidez, viscosidade, dentre outros.

A estabilidade oxidativa é a vulnerabilidade do produto ao mecanismo de ação do oxigênio atmosférico. O processo de oxidação é uma reação em cadeia autossustentável que se inicia lentamente, com concentração de hidroperóxido (ROOH) baixa e, inesperadamente, o grau de oxidação aumenta de forma abrupta, determinando o “período de indução” (PI), que define a susceptibilidade relativa à oxidação do TAG ou éster alquílico, e de acordo com as condições sob o qual é estressado (temperatura e exposição ao oxigênio). Uma vez que o PI tenha passado, o nível de ROOH aumenta rapidamente, sinalizando o início da oxidação rápida (Pullen; Saeed, 2012; Rizwanul, 2014).

O método oficial de determinação da estabilidade oxidativa dos óleos e gorduras pela American Oil Chemists' Society (AOCS) é conhecido como método Rancimat. Nessa metodologia a amostra é submetida ao teste em uma temperatura constante pré-estabelecida, a oxidação da amostra é induzida com a adição de ar em taxa constante. A mistura ésteres metílicos de ácidos graxos (FAMES) presentes na amostra são convertidos em produto da oxidação primária, hidroperóxidos, que quando completamente decompostos resultam nos produtos de oxidação secundária. Como resultado do processo de oxidação, ocorre uma liberação de gases juntamente com o ar, que é então direcionado para um recipiente contendo água deionizada. Este recipiente possui um condutivímetro, o qual afere a condutividade da amostra versos o tempo (Yaakob *et al.*, 2014).

A medição contínua dessa condutividade institui uma curva de oxidação, na qual o ponto de inflexão dessa curva é conhecido como período de indução, que vem a ser tempo, até o aumento súbito na condutividade. Após o período de indução, a taxa de oxidação, índice de peróxido, absorção de oxigênio e formação de compostos voláteis, todos rapidamente aumentaram. Quanto maior for o período de indução maior será a estabilidade a oxidação (Silva, 2017).

Com o intuito de diminuir ou retardar a oxidação do biodiesel, comumente e de maneira eficaz a indústria de óleo vegetal e biodiesel vem utilizando como tratamento substâncias conhecidas como antioxidantes (Yang *et al.*, 2018).

Existe uma diversidade de matérias primas com potencial antioxidante provenientes de plantas in natura, processadas ou seus resíduos agroindustriais. Frutas, tubérculos, cascas, sementes entre outros componentes podem apresentar potencial antioxidante (Oliveira, 2009). De acordo com Fernandes (2015) antioxidantes naturais são considerados vantajosos por serem biodegradáveis e não tóxicos.

2.2 Gomas Naturais

As gomas naturais possuem representatividade elevada dentre as matérias-primas disponíveis. Sob o olhar da química, são definidas como polissacarídeos, composto por múltiplas unidades de açúcares, interligados por ligações glicosídicas, para formar um polímero com longa cadeia e alta massa molecular (Rana *et al.*, 2011). Estudos de materiais gomosos mostraram que as suas cadeias de polissacarídeos, aparentemente, interagem entre si, levando a formação de uma rede de baixa entalpia/baixa entropia resultando nas propriedades físico-químicas características das gomas (Gröbl *et al.*, 2005).

As gomas naturais são classificadas de acordo com sua origem, comportamento e estrutura química. Podem ser originadas do endosperma de sementes de plantas (goma guar), de exsudados de plantas (tragaçante), exsudados de arbustos ou árvores (goma arábica, goma karaya, goma de cajueiro), extratos de algas (ágar), bactérias (goma xantana), fonte animal (quitina), além de outras fontes (Laaman, 2011; Nussinovitch, 2011).

As gomas exsudadas são produzidas em células epiteliais confinadas em ductos das árvores e são liberadas espontaneamente ou induzidas como um mecanismo de defesa natural da planta, quando esta é submetida a injúrias mecânica ou microbiológica (Rana *et al.*, 2011). As gomas exsudadas estão entre as mais antigas do mundo: há cerca de 5000 anos atrás elas já eram usadas como agentes espessantes e de estabilidade (Renard *et al.*, 2006), sendo a goma arábica a mais conhecida dentre as gomas naturais. As principais famílias que incluem espécies que produzem gomas na forma de exsudado são *Leguminosae*, *Combretaceae* e *Anacardiaceae* (Cunha *et al.*, 2009).

O interesse em gomas exsudadas de plantas vem crescendo consideravelmente devido às suas propriedades estruturais e às suas funções em produtos alimentares, farmacêuticos, cosméticos, têxtil e biomédicos (Renard *et al.*, 2006). Gomas solúveis em água, também conhecidas como hidrocoloides, são usadas para várias aplicações, como: fibras dietéticas, modificadores de textura, agentes geleificantes, espessantes, estabilizantes, emulsificantes, revestimentos, filmes, agente encapsulante e coadjuvante de secagem (Mirhosseine; Tan, 2010; Martinetti *et al.*, 2014).

Atualmente há uma forte tendência de substituição dos materiais sintéticos pelas gomas naturais, devido a não toxicidade, baixo custo, segurança e disponibilidade (Rana *et al.*, 2011). As gomas mais utilizadas industrialmente são: amido, derivados de celulose, goma guar, arábica, gatti, karaia, tragacanto, gelano e ágar. Entretanto a busca por novas gomas com propriedades especiais tem despertado interesse da comunidade científica, como a de exsudatos de árvores de clima tropical (Cunha *et al.*, 2009).

As plantas apresentam a capacidade excêntrica de produzir substâncias químicas e biológicas ativas como um mecanismo de autodefesa contra microorganismos patogênicos. Um exemplo dessas substâncias são os exsudatos, também conhecidos como hidrocoloides são polissacarídeos (gomas), classificados como heteropolissacarídeos complexos, ramificados e polidispersos (Dantas Júnior, 2015).

Polissacarídeos de exsudatos têm sido amplamente estudados devido à sua disponibilidade a partir de fontes renováveis, baixo custo, biodegradabilidade e versatilidade de aplicações. A goma arábica (*Acacia senegal*) é tradicionalmente utilizada tanto na indústria alimentícia (Lopez-Torres, 2015), como nos setores industriais (Mothé; Rao, 2000). A goma do cajueiro (*Anacardium occidentale*) é um bom substituto da goma arábica em diversas aplicações, como emulsificantes (Porto; Cristianini, 2014). Além disso, o uso dessa goma em aplicações mais sofisticadas, como matriz de encapsulamento para extratos (Silva *et al.*, 2018) e óleos essenciais é bem difundida na literatura (De Oliveira *et al.*, 2014).

Para ampliar as aplicações dessas gomas, modificações estruturais podem ser realizadas, como a inserção de grupos carboxilatos, oxidação de grupos hidroxilas e ácidos, bem como a enxertia com acrilamida (De Paula; Rodrigues, 1995).

Além disso, a esterificação com anidridos tem sido reportada com o objetivo de melhorar as propriedades antimicrobianas de gomas contra cepas de bactérias Gram-positivas e Gram-negativas (Barreiras, 2020).

A busca por novos polissacarídeos é necessária, devido às suas propriedades físico-químicas, estruturais e reológicas que podem variar de acordo com a fonte de produção, bem como fatores regionais e climáticos (De Paula et al., 1998).

Amburana cearensis AC Smith é uma das duas espécies do gênero *Amburana* e pertence à família *Fabaceae*. É conhecida popularmente como “amburana-de-cheiro”, cerejeira, “cumarú”, entre outras denominações, tendo ainda como sinonímia científica *Torres cearensis* A. sua ocorrência estende-se desde a região Nordeste até o Brasil central, predominantemente, em regiões de caatinga e na floresta pluvial de Minas Gerais, no Vale do Rio Doce, podendo também ser encontrada em outros países da América do Sul, como Argentina, Paraguai e Bolívia (Araújo; Dantas, 2018).

Essa árvore apresenta porte regular, podendo atingir até 10 m de altura nas regiões de caatinga e até 20 m na zona da mata (Cunha; Ferreira, 2003). Seu tronco é revestido por uma casca castanho escuro e geralmente está presente na forma de camadas finas, que caem durante os períodos de seca (Silva *et al.*, 2015). Por outro lado, as principais informações sobre a espécie são escassas e dispersas, particularmente sobre sua biologia e ecologia, visto que ainda não é uma espécie domesticada e sua extração é quase que exclusivamente extrativista (Leite, 2005). Sua flora ocorre em setembro e, nos dois meses seguintes, apresenta uma boa produção de frutos (vagens curtas). As sementes estão distribuídas em número de uma por fruto, as quais são achatadas, oleaginosas, manchadas de marrom e branco e têm aroma forte agradável. Este mesmo aroma, embora mais fraco, pode ser encontrado em todas as outras partes da planta, o que facilita sua identificação.

3. OBJETIVOS

3.1 Geral

Apresentar a viabilidade do uso do extrato etanólico obtido da goma natural da *Amburana cearensis* como um antioxidante natural adicionado ao biodiesel comercial de soja, no sentido de obter valores relevantes para mostrar seu potencial como tecnologia ambiental de baixo custo, maior biodegradabilidade e valorização regional de um produto natural.

3.2 Específicos

1. Comprovar o potencial antioxidante do Extrato Etanólico da *Amburana cearensis* através da parte experimental do estudo.
2. Extrair a substância do exsudado bruto preparando-a para os demais testes.
3. Realizar o experimento de Atividade Antioxidante com o intuito de mostrar seu potencial antioxidante, através de ensaios em triplicata.
4. Realizar a análise Termogravimétrica objetivando comprovar a durabilidade de seus compostos em altas temperaturas. Realizar a análise HPLC-DAD para comprovar a existência de compostos fenólicos, antioxidantes e os identificar.
5. Realizar o teste Rancimat EN14112 com o Extrato Etanólico adicionado ao biodiesel comercial de soja na expectativa de apresenta boa estabilidade oxidativa, alcançando um tempo de prateleira considerável para os parâmetros nacional e internacional.

REFERÊNCIAS (Introdução)

BRASIL. Resolução ANP nº 920, de 4 de abril de 2023. Estabelece a especificação do biodiesel e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializem o produto em território nacional. **ANP** - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-920-2023>.

DAVID, E.; KOPAC, J. Survey on Antioxidants Used as Additives to Improve Biodiesel's Stability to Degradation through Oxidation. **Molecules**, 2023, 28, 7765. doi.org/10.3390/molecules28237765.

DE OLIVEIRA FARIAS, E. A. *et al.* Screen-printed electrode modified with a composite based on *Amburana cearensis* gum, multi-walled carbon nanotubes, and gold nanoparticles for electrochemical determination of total isoflavones in soybean cultivars. **J Solid State Electrochem**, 29, 2025, 1121–1137. Disponível em: doi.org/10.1007/s10008-024-05963-x.

DE PAULA, R. C. M. *et al.* Characterization of anacardium occidentale exudate polysaccharide. **Polymer International**, v. 45, n. 1, 1998.

4. APRESENTAÇÃO DO ARTIGO

Título do artigo:

Estudo do potencial antioxidante do extrato etanólico da *Amburana cearensis* como fator determinante na estabilidade oxidativa do biodiesel de soja.

Artigo submetido: 25/02/2026.

Nome da revista: Natural Product Research (Taylor & Francis)

QUALIS da Capes para a área de Geociências: A3

Fator de Impacto da Revista: Atualmente (2024/2025), o periódico tem impacto contínuo (FI 1.6 - WoS), mantendo sua relevância no campo de produtos naturais.

 sucupira-legado.capes.gov.br +4

Objetivos Específicos da Dissertação atrelados ao artigo:

Mostrar o potencial inovador de um produto natural como o extrato etanólico do exsudado bruto da *Amburana cearensis* sendo utilizado como antioxidante no biodiesel comercial de soja, visto que, atualmente são utilizados pela indústria apenas antioxidantes sintéticos e de alto custo, gerando um grande impacto ambiental negativo e elevada toxicidade.

6. ARTIGO (Formato de Submissão)

Estudo do potencial antioxidante do extrato etanólico da *Amburana cearensis* como fator determinante na estabilidade oxidativa do biodiesel de soja.

Bárbara Beatriz Caxilé Costa¹, Patricia Gabrielle Costa Andrade Macilon^{2,3}, Alyne Rodrigues de Araujo-Nobre^{7,8}, Thaís Danielle Santos Araújo^{7,8}, Carla Eiras⁴, Hernane da Silva Barud⁹, Gerardo Magela Vieira Júnior¹⁰, Renato Pinto de Sousa¹⁰, Francisco Cardoso Figueiredo⁶, Adriano Gomes de Castro⁵, Ionara Nayana Gomes Passos¹.

¹*Postgraduate Program in Environmental Science and Technology (PPGC&TAmb), Federal University of Maranhão (UFMA).Brazil.*

²*Postgraduate Program in Chemical Engineering, Technology Center, Federal University of Rio Grande do Norte, Av. Prof. Sen. Salgado Filho, 3000, Natal, Rio Grande do Norte, 59072-970, Brazil.*

³*GPIMN - Micro and Nanotechnologies Innovation Research Group, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil*

⁴*Federal University of Piauí – UFPI - Department of Materials Engineering*

⁵*Federal University of Piauí, Brazil, - Department of Chemistry*

⁶*CTT – Technical College of Teresina – Piauí, Brazil.*

⁷*Federal University of the Parnaíba Delta - UFDPAr*

⁸*Center for Research in Biodiversity and Biotechnology – BIOTEC - Microbiology Laboratory*

⁹*University of Araraquara - São Paulo, Brazil – UNIARA - BioPolMat Group*

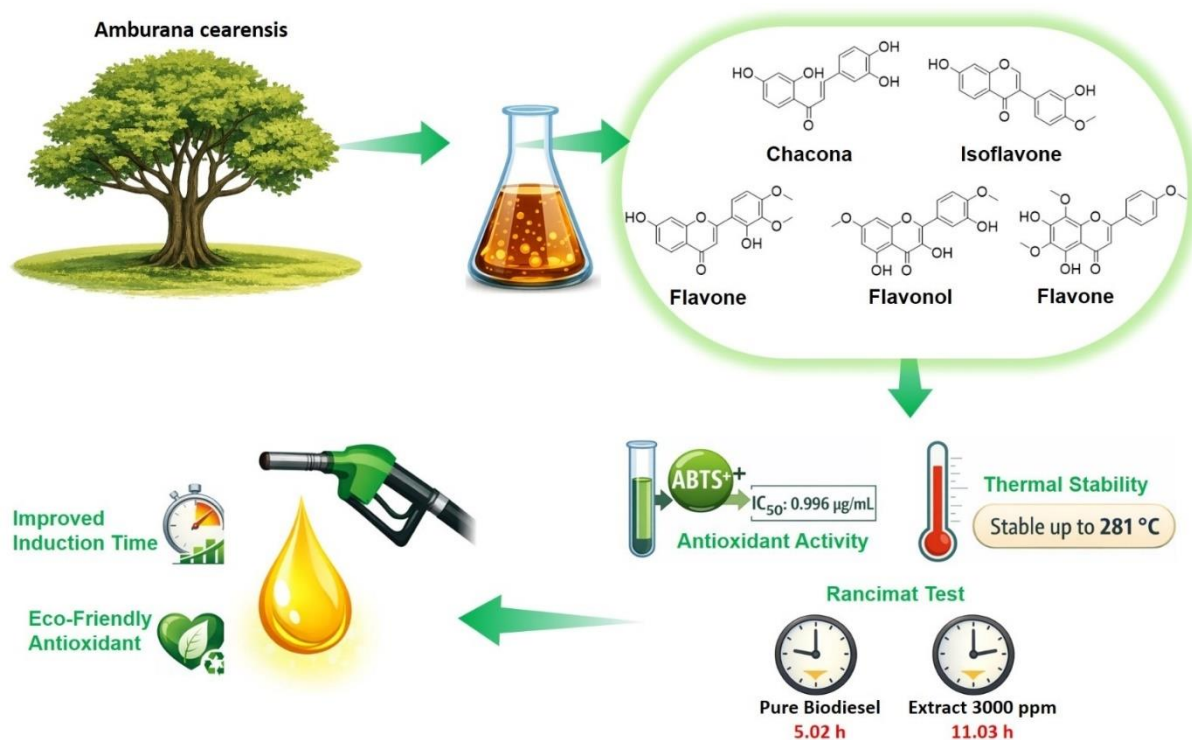
¹⁰*Federal University of Piauí – UFPI - Graduate Program in Chemistry – PPGQ - Center for Natural Sciences – CCN - Natural Products Laboratory – LPN/UFPI*

Corresponding author: caxileb@gmail.com

Resumo

O presente artigo visa mostrar o estudo da estabilidade à oxidação do biodiesel pelo uso do extrato etanólico obtido do exsudato da *Amburana cearensis* como aditivo antioxidante natural. A incorporação de antioxidantes é uma estratégia amplamente empregada para mitigar a degradação oxidativa do biodiesel; entretanto, os antioxidantes sintéticos estão frequentemente associados a alto custo, potencial toxicidade e baixa biodegradabilidade a descoberta de novas substâncias químicas tem se tornado uma área de grande avanço científico. Os resultados experimentais do extrato etanólico da *Amburana cearensis* mostraram eficiência antioxidante conforme determinado pelo ensaio de sequestro de radical ABTS •⁺, que mostrou alta atividade antioxidante mesmo com perda de massa em relação ao tempo. Na análise termogravimétrica e térmica diferencial (TG/DTA) revelou sua estabilidade térmica em altas temperaturas começando a se degradar a partir de 281°C. A caracterização química por HPLC e o DI-ESI-IT-MSⁿ identificaram os compostos responsável pela atividade antioxidante, o metabólito predominante foi associado a cumarinas, flavonoides e ácidos fenólicos. Fragmentos de 5 compostos foram identificados como buteina, calicosina, cirsimaritina, 3,5,3'-tri-hidroxi-7,4-dimetoxiflavona e nevadensina. A eficácia do extrato como antioxidante no biodiesel foi avaliada pelo método Rancimat (EN 14112). A amostra tratada apresentou um tempo de indução de 11,03 h, com 3000 ppm do extrato etanólico, aproximando-se bastante dos limites estabelecidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). De modo geral, os fitoquímicos presentes no exsudato da *Amburana cearensis* evidenciam relevante potencial científico, ambiental e socioeconômico, apoiando seu uso como alternativa verde e regional aos antioxidantes sintéticos.

Palavras-Chave: Biodiesel; Antioxidante Natural; *Amburana cearensis*; Estabilidade Oxidativa; Extrato Etanólico.



Resumo gráfico

1. Introdução

O biodiesel é um biocombustível obtido por meio da transesterificação de óleos e gorduras, amplamente reconhecido por sua origem renovável e por sua contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a instabilidade oxidativa permanece como um dos principais desafios técnicos e comerciais para sua produção e uso eficiente. Tal limitação decorre da suscetibilidade dos ésteres metílicos de ácidos graxos à oxidação durante as etapas de armazenamento e transporte, o que pode resultar em alterações indesejáveis nas propriedades físico-químicas do combustível, como aumento da acidez e da viscosidade, além da formação de sedimentos, comprometendo o desempenho de motores a diesel (David; Kopac, 2023).

Com o objetivo de assegurar a qualidade e a competitividade do biodiesel brasileiro, a Resolução ANP nº 920, de 4 de abril de 2023, estabeleceu as especificações técnicas para o biodiesel comercializado no País, incluindo requisitos relacionados à estabilidade à oxidação. Essa normativa define o aditivo antioxidante como uma

substância capaz de retardar a oxidação lipídica de óleos e gorduras, determinando que o biodiesel em circulação contenha aditivos com essa função. Além disso, o tipo e a concentração do antioxidante utilizado devem constar no certificado de qualidade do produto (Brasil, 2023).

Diversos estudos relatam que antioxidantes sintéticos, como o butil-hidroxitolueno (BHT), o butil-hidroxianisol (BHA) e a tert-butil-hidroquinona (TBHQ), são tradicionalmente empregados para aumentar a estabilidade oxidativa do biodiesel, atuando na interrupção das reações em cadeia responsáveis pela degradação do combustível. Entretanto, esses compostos apresentam limitações relevantes, tais como impactos ambientais negativos, restrições de desempenho em baixas temperaturas e baixa biodegradabilidade, o que tem estimulado a busca por alternativas mais sustentáveis e alinhadas aos princípios da Química Verde (David; Kopac, 2023).

Nesse contexto, antioxidantes naturais extraídos de fontes vegetais têm emergido como alternativas promissoras, em razão de sua menor toxicidade, maior biodegradabilidade e ampla disponibilidade de compostos fenólicos com reconhecida atividade antioxidante. As principais fontes naturais de polissacarídeos incluem fungos, celulose, exsudatos vegetais e algas (De Paula *et al.*, 1998; De Oliveira Farias *et al.*, 2025). Estudos envolvendo extratos vegetais demonstram que compostos fenólicos naturais podem atuar como doadores de elétrons ou de hidrogênio para radicais livres, interrompendo as cadeias reativas de oxidação, de maneira semelhante àquela observada em sistemas lipídicos como o biodiesel.

A goma de *Amburana cearensis* (GAmb) é um polissacarídeo de caráter polieletrólito, obtido a partir do exsudato do tronco dessa espécie, e tem sido amplamente investigada devido à sua composição fitoquímica rica em cumarinas e outros compostos fenólicos com atividade antioxidante relevante. Estudos etnobotânicos e fitoquímicos indicam que extratos etanólicos e frações da *Amburana cearensis* apresentam significativa atividade antioxidante em ensaios com radicais livres, atribuída principalmente à presença de flavonoides e fenóis, evidenciando seu potencial como fonte de antioxidantes naturais para aplicações tecnológicas (De Oliveira Farias *et al.*, 2025). Diante desse perfil fitoquímico, o extrato etanólico da *Amburana cearensis* surge

como candidata potencial para aplicação como aditivo antioxidante em sistemas lipídicos, incluindo o biodiesel.

Considerando a necessidade da adição de antioxidantes ao biodiesel para aumentar sua estabilidade oxidativa, em razão da presença de sítios reativos associados aos carbonos metilênicos adjacentes às insaturações, os quais são suscetíveis ao processo de auto-oxidação, torna-se relevante o desenvolvimento de alternativas aos antioxidantes sintéticos atualmente utilizados. Nesse sentido, esta pesquisa avalia o extrato etanólico obtido a partir da goma da *Amburana cearensis* como um antioxidante de origem natural uma abordagem inovadora ao destacar o potencial científico, ambiental e socioeconômico de antioxidantes naturais aplicados à estabilização oxidativa do biodiesel.

2. Metodologia

2.1 Obtenção do exsudado bruto da *Amburana cearensis*

A coleta do exsudato da *Amburana cearensis* foi realizada nos meses de julho a setembro de 2022, período de estiagem na região, considerado melhor época para estimulação e coleta do material. O exsudado bruto foi coletado na região de Cocal da Estação-PI, Brasil (Latitude: 3°28'33" S; Longitude: 41°33'28" W). Após a coleta, o material vegetal foi seco ao sol por um período de duas semanas, ou até a completa solidificação da resina. Em seguida, o exsudato bruto foi obtido por meio da remoção de resíduos macroscópicos, tais como fragmentos de casca do tronco e galhos. O material foi então triturado e peneirado em peneira com granulometria de 425 µm.

2.2 Obtenção do extrato etanólico de *Amburana cearensis*

O material peneirado foi submetido ao processo de extração etanólica, conforme metodologia descrita por Samrot *et al.* (2019). Para isso, 10,0 g do exsudato foram pesados em balança analítica (Sartorius ED124s Extend) e transferidos para um béquer de 150 mL, ao qual foram adicionados 50,0 mL de etanol (ACS Dinâmica, P.A., 95%). A mistura foi mantida sob agitação magnética, à temperatura ambiente, por um período de

2 horas. Após esse intervalo, o sistema permaneceu em repouso para decantação, sendo a fase líquida cuidadosamente separada e armazenada para posterior utilização.

O extrato obtido foi concentrado por evaporação do solvente, realizada por gotejamento em béquer sob placa de aquecimento em temperatura constante de 70°C. Após a completa secagem do material em dessecador, procedeu-se à pesagem do sólido resultante em balança analítica, obtendo-se, assim, o extrato etanólico do exsudato da *Amburana cearensis*.

2.3 Atividade antioxidante

A atividade antioxidante do extrato etanólico do exsudato da *Amburana cearensis* foi determinada pelo ensaio de sequestro do radical catiônico ABTS^{•+} [2,2'-azino-bis(ácido 3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico)], conforme metodologia descrita por Gião *et al.* (2007), com adaptações. A análise estatística foi realizada por meio de análise de variância de uma via (one-way ANOVA), seguida do teste de comparações múltiplas de Tukey (Gião *et al.*, 2007). Os ensaios foram realizados em triplicata, e os resultados foram expressos como média de desvio padrão, adotando-se nível de significância de $p < 0,05$.

O extrato foi solubilizado em etanol e preparado em uma série de diluições, com concentrações variando de 31,25 a 0,24 $\mu\text{g mL}^{-1}$. A solução do radical ABTS^{•+} foi preparada previamente e mantida em repouso ao abrigo da luz. Alíquotas das soluções do extrato foram adicionadas à solução do radical, e a mistura foi incubada no escuro por 6 min.

A capacidade de sequestro do radical ABTS^{•+} pelo extrato foi monitorada em três tempos de reação (6, 30 e 60 min), utilizando um leitor de microplacas do tipo ELISA (SpectraMax, Molecular Devices, EUA). A atividade antioxidante foi expressa como porcentagem de inibição do radical em relação ao controle, e os valores de concentração inibitória média (CI₅₀) foram determinados a partir das curvas de inibição em função da concentração do extrato.

2.4 Análise termogravimétrica (TG)

As análises térmicas foram realizadas utilizando um analisador térmico Shimadzu DTG-60H. Aproximadamente 5–10 mg da amostra foram colocados em cadinhos de alumina (ou platina), previamente limpos e secos. Foi utilizada a Norma ASTM E2550 Método Padrão para Estabilidade Térmica por Termogravimetria. Foram aplicadas duas condições atmosféricas: uma atmosfera inerte de árgon e uma atmosfera oxidativa de oxigénio, ambas com uma taxa de fluxo de 100 mL min⁻¹ e uma taxa de aquecimento de 20 °C min⁻¹ da temperatura ambiente até 600 °C. Os dados foram adquiridos utilizando um SDT Q600 V20.9 Build 20 Module: analisador térmico padrão DSC-TGA.

2.5 HPLC-DAD do extrato etanólico

O extrato etanólico de *Amburana* foi analisado por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE/HPLC) em sistema analítico equipado com desgaseificador (DGU-20A5R), bomba (LC-20AT), válvula LPGE kit, injetor automático (SIL-20AHT), forno de coluna (CTO-20A), detector de arranjo de diodos (DAD, SPD-M20A) e controlador (CBM-20A), todos da marca Shimadzu. O controle instrumental e a aquisição dos dados foram realizados por meio do software LabSolutions (Shimadzu).

A separação cromatográfica foi conduzida em coluna C18 (Luna®, Phenomenex; 250,0 × 4,6 mm; 5 µm). Previamente à análise, a amostra foi submetida a um procedimento de limpeza (*clean-up*) por extração em fase sólida (SPE). Para isso, uma alíquota de 10 mg do extrato foi dissolvida em 2,0 mL de metanol (MeOH) e aplicada em cartucho C18 previamente condicionado com o mesmo solvente. A eluição foi realizada com 20,0 mL de MeOH. Após a secagem, 5 mg do material eluído foram redissolvidos em 2,0 mL de uma mistura MeOH/H₂O (1:1, v/v) e filtrados em membrana de nylon (47 mm de diâmetro e porosidade de 0,22 µm, Chromafil® Xtra).

A análise cromatográfica do extrato etanólico da *Amburana* (2,5 mg mL⁻¹) foi realizada em modo de eluição gradiente, conforme o seguinte programa: 0–50 min, 5–100% de solvente B; 50–60 min, 100% de solvente B. A fase móvel foi composta por água ultrapura (solvente A) e metanol (solvente B), com vazão de 1,0 mL min⁻¹, volume de

injeção de 10 μL e temperatura da coluna mantida a 40 °C. A detecção foi realizada na faixa espectral de 200 a 800 nm.

2.6 DI-ESI-IT-MSⁿ do extrato etanólico

O extrato etanólico foi dissolvido em álcool metílico a uma concentração de 0,1 mg/mL e filtrada por uma membrana de politetrafluoroetileno (PTFE) com porosidade de 0,22 μm antes da análise espectrométrica. Os espectros de massa foram adquiridos por inserção direta (DI) em um espectrômetro de massas equipado com analisador do tipo armadilha de íons (IT/MS, AmaZon X, Bruker Daltonics, Bremen, Alemanha) e fonte de ionização por eletrospray (ESI), operando no modo DI-ESI-IT-MSⁿ.

As análises foram conduzidas no modo de íons negativos [ESI(-)], com faixa de varredura de m/z entre 100 e 1500 Da, vazão da seringa ajustada para 3,0 $\mu\text{L min}^{-1}$, tensão capilar de 4,5 kV, vazão do gás de secagem (N_2) de 5,0 L min^{-1} , pressão de nebulização de 8,0 psi e temperatura da fonte mantida a 250 °C. Para os experimentos de MSⁿ, a energia de colisão, a amplitude do sinal, o tempo de aquisição e os parâmetros de radiofrequência foram otimizados individualmente para cada íon precursor, a fim de maximizar a qualidade das informações espectrais obtidas.

A aquisição e o processamento dos dados foram realizados utilizando o software Bruker Compass Data Analysis (versão 4.3), fornecido pelo fabricante.

2.7 Método Rancimat

O método analítico atende às especificações internacionais para comercializar biodiesel, aceitação na Europa, nos Estados Unidos e no Brasil, onde faz parte das especificações EN 14112 (2003) e Regulamento Técnico ANP n°920/2023. O método normatizado pela EN 14112 onde a oxidação é induzida por meio de uma corrente de ar injetada na amostra de biodiesel a uma vazão de 10 L.h^{-1} , mantida à temperatura constante de 110°C. A condutividade da solução é monitorada de forma contínua e uma curva de oxidação é obtida, cujo ponto de inflexão pode ser calculado pelo ponto de

intersecção das duas tangentes. O período de indução foi obtido pelo ponto de intersecção das duas tangentes da curva de condutividade (Jain & Sharma, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Processamento do exsudado e obtenção do extrato etanólico de *Amburana cearensis*

A sequência apresentada na Figura 1 evidencia a evolução visual e física do exsudado de *Amburana cearensis* ao longo do processo de obtenção do extrato etanólico. O exsudado bruto apresenta-se na forma de agregados sólidos irregulares, com coloração característica e elevada rigidez, aspectos que refletem o processo natural de exsudação e solidificação do material vegetal (Figura 1A). Após o processamento físico, observa-se uma redução significativa do tamanho das partículas e maior homogeneidade do material, o que favorece a liberação dos compostos bioativos presentes na matriz polissacarídica (Figuras 1B e 1C).

A interação do exsudado com o solvente etanólico resulta em mudanças visíveis no sistema, destacando-se a coloração da fase líquida, indicativa da solubilização de compostos orgânicos, possivelmente associados a fenóis, flavonoides e cumarinas previamente reportados na literatura para a espécie (Figura 1D). Esse comportamento sugere uma extração eficiente dos constituintes de interesse, corroborando estudos que apontam o etanol como um solvente adequado para a obtenção de antioxidantes naturais a partir de matrizes vegetais.

Dessa forma, o material apresentado na Figura 1F corresponde ao extrato etanólico seco do exsudato de *Amburana cearensis*, caracterizado pela sua aparência homogênea e estabilidade física, indicando boa conduta do processo de extração e a sua adequação para análises subsequentes e aplicações tecnológicas propostas neste estudo. No estudo comparativo de obtenção do extrato etanólico obtido do exsudado da *Amburana Cearensis* a outros extratos etanólicos de diferentes fontes, foram constatadas quantidades diferentes para realização do processo, enquanto o extrato da *Amburana* utilizou 10g do exsudado macerado em 50 ml de etanol gerando em média 3,8g de extrato, outros estudos como o extrato etanólico das folhas da *Annona squamosa* (ATA)

exigiu uma quantidade muito maior e mais tempo de preparo para obtenção de um extrato líquido. Informando usar 245g de folhas secas em recipiente de vidro adicionados a 1400ml de álcool etílico a 96%. Masserado por 15 dias e depois sendo filtrado duas vezes por gase e por filtro de papel. (Brito et al., 2007), não sendo informada quantidade e concentração final do extrato obtido. Diversos outros estudos envolvendo extrato etanólico das mais diferentes fontes não informaram o processo de obtenção do extrato.

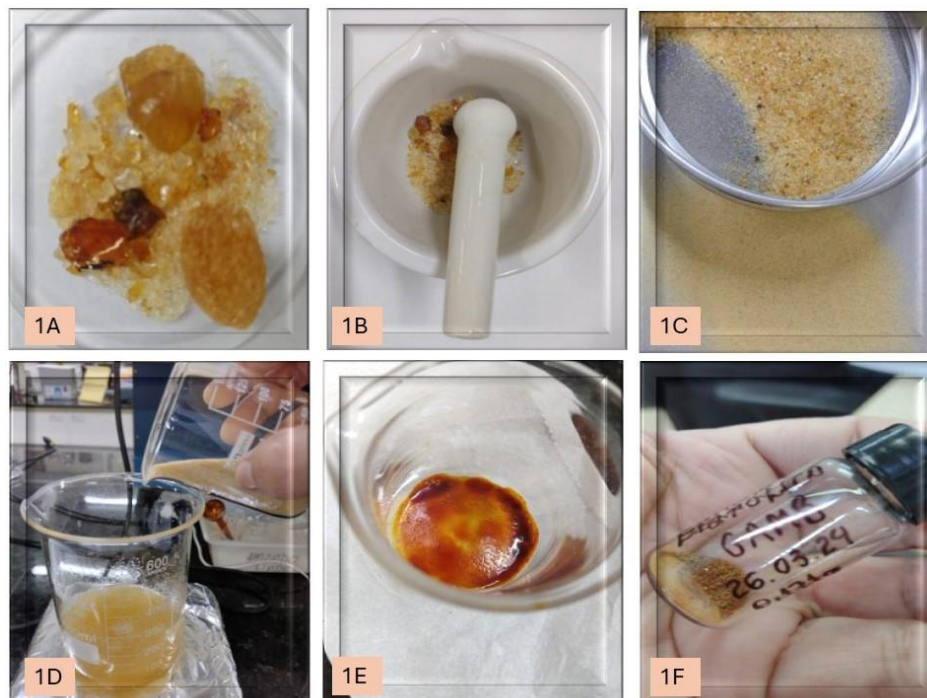


Figura 1. Extração e purificação do extrato etanólico do exsudado da *Amburana cearensis*.

3.2 Atividade antioxidante do extrato etanólico do exsudado da *Amburana cearensis*

A atividade antioxidante do extrato etanólico do exsudado de *Amburana cearensis* foi avaliada por meio do ensaio de sequestro do radical ABTS•+, com análise estatística realizada por ANOVA de uma via, seguida do teste de comparações múltiplas de Tukey. Os resultados evidenciaram elevada capacidade antioxidante do extrato, com comportamento dependente do tempo de reação entre o radical e os compostos bioativos presentes na amostra (Sanches et al., 2025).

Os valores de concentração inibitória média (CI_{50}) diminuíram progressivamente ao longo do tempo, indicando aumento da eficiência antioxidante com o prolongamento da reação. Foram observados valores de CI_{50} de 1,562 $\mu\text{g/mL}$ após 6 minutos, 1,176 $\mu\text{g/mL}$ após 30 minutos e 0,9961 $\mu\text{g/mL}$ após 60 minutos. Esse comportamento sugere uma sinergia oxidativa, na qual os compostos antioxidantes do extrato continuam a neutralizar o radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$ de forma eficiente ao longo do tempo. A redução do (CI_{50}) ao longo do tempo pode indicar também uma cinética dependente de difusão e interação molecular; presença de compostos com diferentes velocidades de reação; ou um mecanismo não exclusivamente instantâneo.

A comparação com o antioxidante padrão Trolox revelou diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) apenas no tempo inicial de 6 minutos. Nos tempos de 30 e 60 minutos, não foram observadas diferenças estatísticas significativas, indicando que o percentual médio de inibição do radical $\text{ABTS}^{\bullet+}$ pelo extrato foi equivalente ao do Trolox. Esses resultados são ilustrados na **Figura 2A**, que demonstra a similaridade da atividade antioxidante entre o extrato e o padrão nos tempos mais longos de reação, enquanto a **Figura 2B** evidencia a resposta antioxidante no tempo inicial de 6 minutos em função da concentração do extrato.

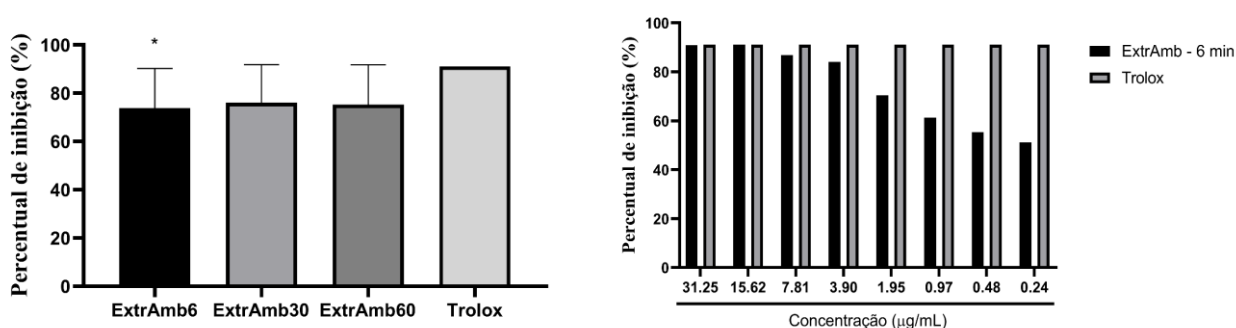


Figura 2. (A) Percentual de inibição da atividade antioxidante semelhante ao padrão Trolox nos tempos de 30 e 60 minutos. (B) Percentual de inibição da atividade antioxidante em comparação ao padrão Trolox considerando o tempo de 6 min onde a substância foi deixada para reagir no escuro e sua concentração em ($\mu\text{g/mL}$).

3.3 Análise de TGA do extrato etanólico da *Amburana cearensis*

Os ensaios experimentais foram realizados empregando o extrato etanólico do exsudado da *Amburana cearensis*, bem como a goma purificada (GAmb), obtida a partir do mesmo material vegetal. Verificou-se que a GAmb apresentou elevada hidrossolubilidade, característica que impôs limitações significativas quanto à sua dispersão e solubilização em biodiesel, um sistema de natureza predominantemente lipofílica. Essa incompatibilidade comprometeu a homogeneidade das formulações e inviabilizou sua aplicação direta como aditivo antioxidante, motivando a descontinuidade dos ensaios com essa fração. Em contraste, o extrato etanólico demonstrou maior afinidade com a matriz lipídica do biodiesel, evidenciando maior potencial de aplicação tecnológica. Ademais, esse extrato é obtido a partir de uma etapa do processo de purificação anteriormente descartada, o que reforça seu aproveitamento sob as perspectivas tecnológica, econômica e ambiental.

A análise termogravimétrica (TGA), associada às curvas derivadas de perda de massa (DTG), do extrato etanólico e da GAmb (Figuras 4A e 4B), revelou comportamento térmico globalmente semelhante, caracterizados pela ocorrência de dois eventos principais de degradação ao longo do aquecimento. O primeiro evento foi observado entre 40 e 120 °C para o extrato etanólico e entre 45 e 151 °C para a GAmb, com perdas de massa superiores a 8%. Esse estágio é atribuído, predominantemente, à eliminação de umidade residual e à volatilização de compostos de baixa massa molar. As curvas DTG evidenciaram a presença de múltiplos picos nessa faixa de temperatura, indicando que a perda de massa ocorre de forma escalonada. Observou-se, ainda, o alargamento e a suavização dos picos, especialmente para a GAmb, sugerindo redução no teor de constituintes voláteis e hidrofílicos em decorrência do processo de purificação do exsudado (Mothé; de Freitas, 2014; Sampaio *et al.*, 2016).

O segundo evento de perda de massa ocorreu em faixas de temperatura mais elevadas, entre 281 e 600 °C para o extrato etanólico e entre 250 e 600 °C para a GAmb, com perdas médias de aproximadamente 50,0% e 54,7%, respectivamente. Esse estágio está associado à degradação térmica da estrutura polimérica, envolvendo mecanismos de despolimerização, descarbonilação e decomposição pirolítica, com a consequente

formação e liberação de produtos gasosos, tais como água, monóxido de carbono e hidrocarbonetos leves. A temperatura inicial de degradação indica que o extrato etanólico apresenta estabilidade térmica até aproximadamente 281 °C, enquanto a GAmb mantém estabilidade até cerca de 250 °C. Esses valores são significativamente superiores às temperaturas usuais de armazenamento, manuseio e aplicação do biodiesel, o que evidencia a adequação térmica do extrato etanólico para uso como aditivo antioxidante (Mothé; de Freitas, 2014; Sampaio *et al.*, 2016).

De modo geral, os resultados demonstram que, embora o extrato etanólico e a goma purificada de *Amburana cearensis* apresentem comportamentos térmicos semelhantes, as diferenças de solubilidade e compatibilidade com a matriz lipídica são determinantes para sua aplicação em biodiesel. O extrato etanólico destacou-se como a fração mais promissora, não apenas pela maior afinidade com o biodiesel, mas também pela elevada estabilidade térmica e pelo potencial antioxidante associado à presença de compostos fenólicos, consolidando sua viabilidade como alternativa natural, eficiente e sustentável aos antioxidantes sintéticos empregados na estabilização oxidativa do biodiesel.

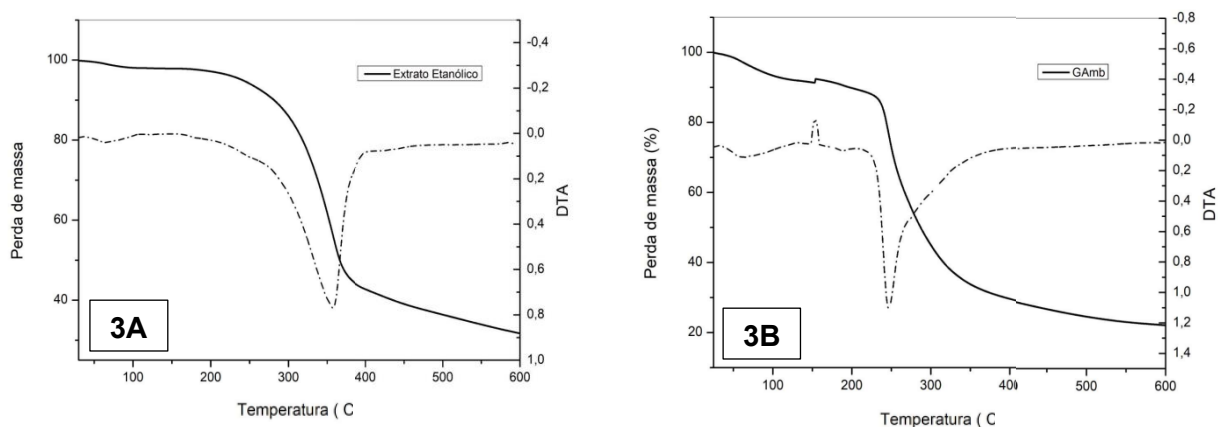


Figura 3. Gráficos mostrando resultado da análise térmica do extrato etanólico (3A) e da GAmb (3B) mostrando a perda de massa em relação ao aumento de temperatura.

A análise termogravimétrica (TGA) é utilizada para investigar processos relacionados à estabilidade térmica e decomposição, desidratação e oxidação,

medindo as variações da massa de uma amostra em função da temperatura e do tempo durante o aquecimento (TENGKU-ROZAINA, BIRCH, 2019; XIAO et al., 2014).

Em estudos analisados que apresentaram parte experimental em termogravimetria podemos citar análises de outras substâncias com elementos antioxidantes, como a análise de micropartículas contidas no óleo de pequi (*Caryocar coriaceum*), segundo o estudo publicado por Castelo *et al.*, 2020, o óleo de pequi teve sua degradação a 424°C. Temperatura superior à temperatura de degradação do extrato etanólico da *Amburana Cearensis*, lembrando a diferença entre os dois, onde o extrato aqui estudado foi obtido por evaporação em placa de aquecimento e sua forma final é sólida e o óleo de pequi apesar de passar por alguns processos não era um extrato etanólico e sua forma final é líquida.

3.4 Análise de HPLC do extrato etanólico da *Amburana cearensis*

O cromatograma HPLC-DAD do extrato etanólico de *Amburana* registrado a 254 nm em coluna C18 revelou um perfil dominado por compostos de polaridade intermediária a baixa, com a maior parte dos sinais eluindo entre aproximadamente 28 e 45 min. Um pico majoritário foi observado em torno de 36–37 min, indicando a presença de um metabólito predominante, possivelmente associado a derivados cumarínicos, amplamente descritos como marcadores químicos da espécie (cumarinas, flavonoides, ácidos fenólicos). Picos secundários nas regiões de 30–34 min e 40–45 min sugerem a presença de flavonoides e outros compostos fenólicos menos polares. A linha de base estável e a boa resolução entre os principais picos indicam adequada eficiência cromatográfica e preparo de amostra (Dantas *et al.*, 2015; Maia *et al.*, 2020).

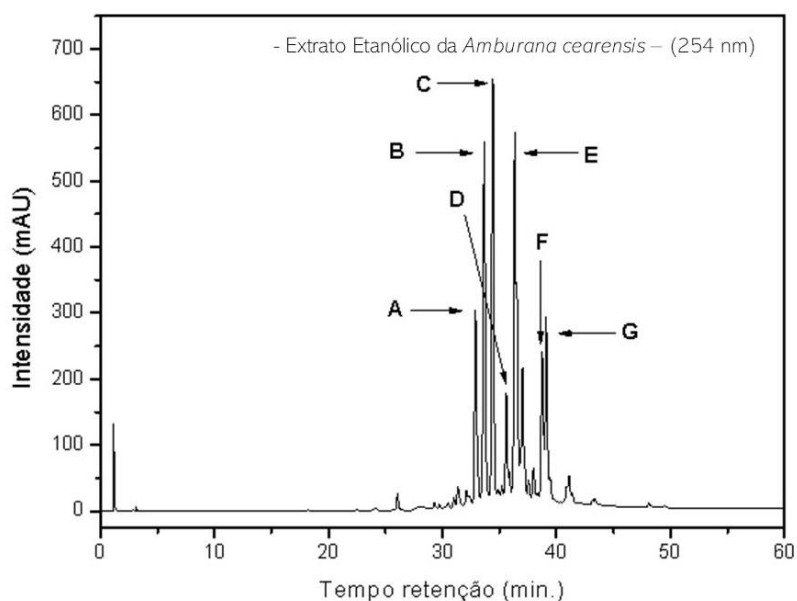


Figura 4 - Cromatograma do extrato etanólico de Amburana. $\lambda=254$ nm. coluna C-18, fase móvel: MeOH-H₂O, gradiente exploratório: 0-50min, 5-100% MeOH; 50-60min, 100% MeOH, vazão da fase móvel de 1,0 mL min⁻¹.

A figura 5 apresenta os espectros UV-DAD (200-400 nm) dos compostos que eluíram do extrato etanólico de Amburana entre 30 e 40 minutos de tempo de retenção (T_r). Os picos de A-G correspondem a um pico cromatográfico diferente com tempos de retenção específicos de cada composto. Bandas entre 250-280 nm. Indicam presenças de anéis aromáticos e compostos fenólicos e uma Absorção entre 300-350 nm flavonoides e cumarinas (Benheim *et al.*, 2011; Canuto *et al.*, 2014).

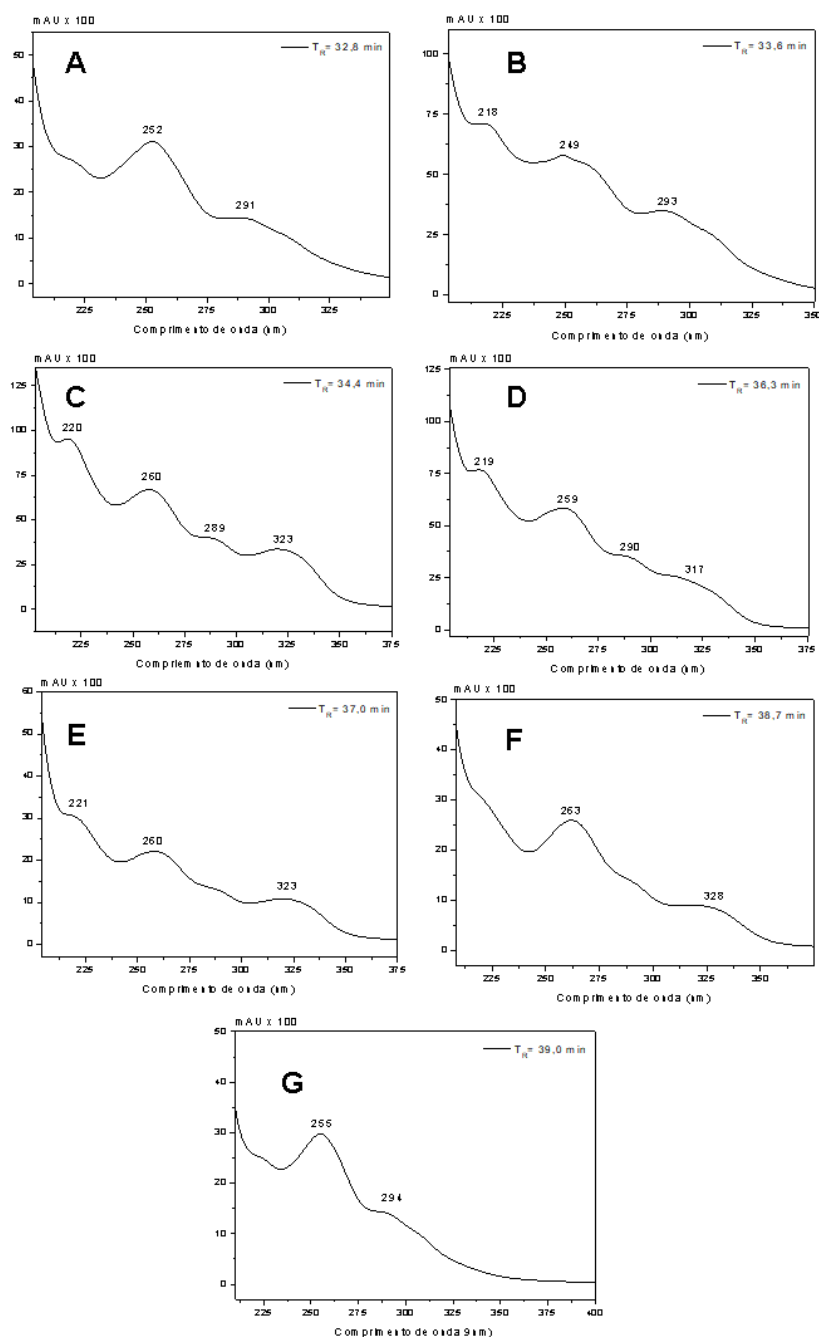


Figura 5 - Espectros UV-DAD (200-400 nm, A-G) do extrato etanólico da Amburana nos tempos de retenção entre 30-40 min.

Na análise por DI-ESI-IT-MS/MSn no modo de íões negativos, um total de 5 compostos com tempos de retenção de 32,8–34,4 min pode indicar compostos fenólicos mais polares. O pico predominante em 36,3–37,0 min mostra o principal produto do extrato, provavelmente cumarina ou um derivado metoxilado. Compostos como

flavonoides foram encontrados no extrato etanólico de Amburana: chacona (1), isoflavona (2), flavonas (3 e 5) e flavonol (4) (Figuras 6-7), corroborando os dados de HPLC-DAD. Na Figura 7, podemos observar os fragmentos dos compostos encontrados nos antioxidantes fornecidos pelo extrato (Silveira *et al.*, 2022).

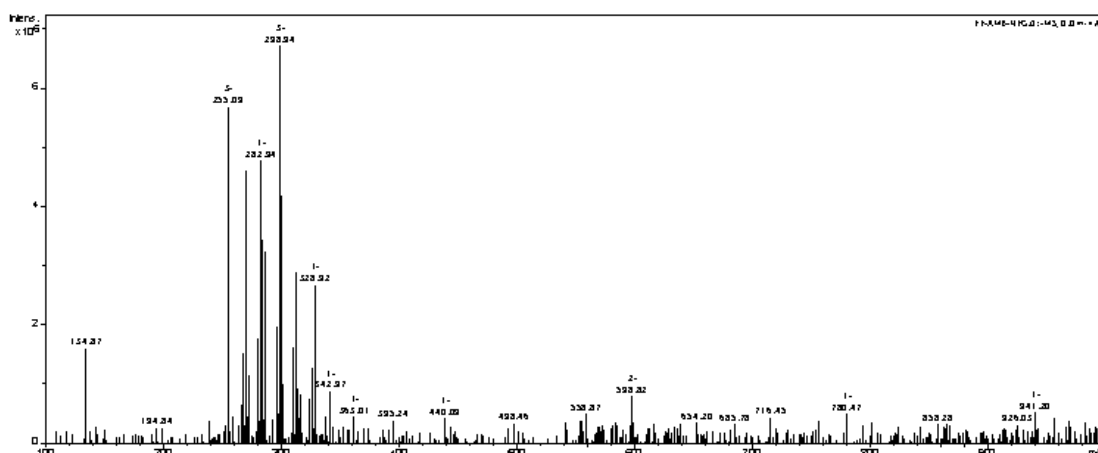


Figura 6 - Perfil químico do extrato etanólico da Amburana por DI-ESI-IT-MS/MSⁿ no modo íon negativo.

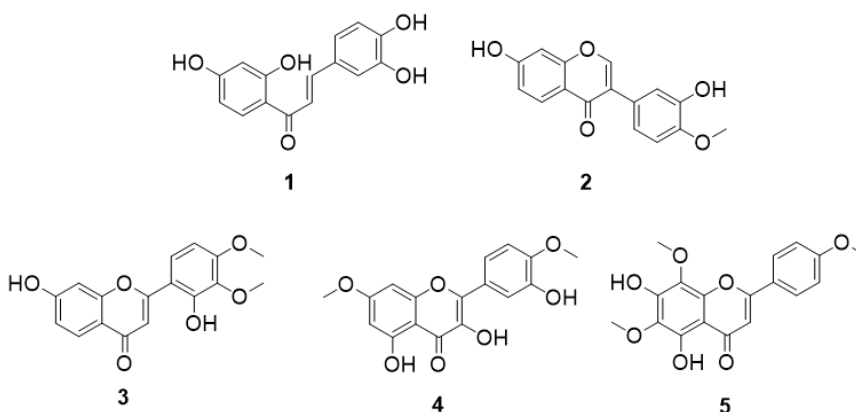


Figura 7 - Constituintes químicos anotados no extrato etanólico da Amburana por DI-ESI-IT-MSⁿ.

O íon da molécula desprotonada em m/z 271,0 $[M-H]^-$, apresentou íons fragmentos em m/z 252,8 $[M-H-H_2O]^-$, 224,9 $[M-H-H_2O-CO]^-$ e 134,8 $[M-H-C_6H_7O_2]^-$, referindo-se a uma clivagem alfa a carbonila (**Figura 8A**). O composto foi anotado como buteina (1) (Liu *et al.*, 2020; Silveira *et al.*, 2022). O composto 2, apresentou íon da molécula desprotonada em m/z 282,9 $[M-H]^-$ e íon fragmento no espectro MS² em m/z 267,8 $[M-H-$

CH_3^- . O espectro MS^3 apresentou íons fragmentos em m/z 238,9 $[\text{M}-\text{H}-\text{CH}_3-\text{CO}]^-$, 223,8 $[\text{M}-\text{H}-\text{CH}_3-\text{CO}_2]^-$ e m/z 210,8 $[\text{M}-\text{H}-\text{CH}_3-\text{C}_2\text{O}_2\text{H}]^-$ (**Figura 8Bi-Bii**). O composto foi anotado como a calicosina (2). (Wang *et al.*, 2008).

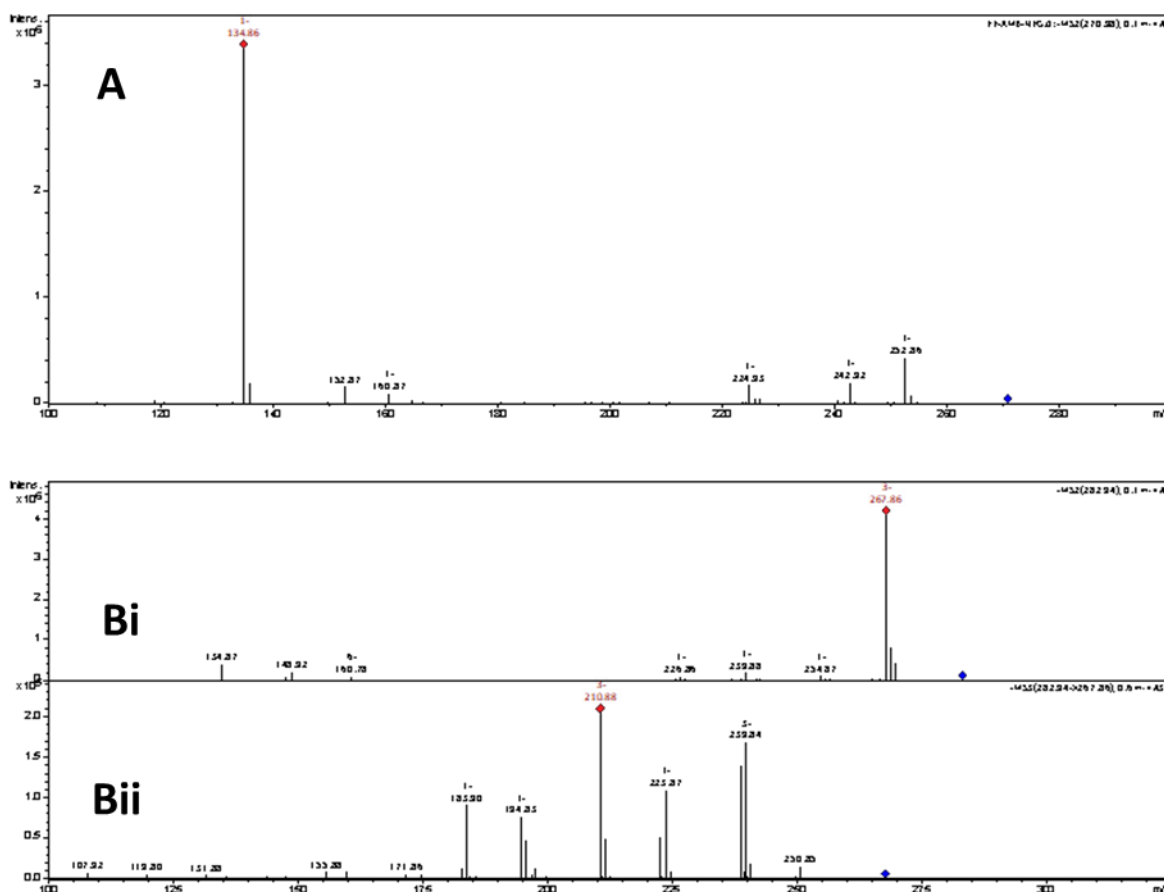


Figura 8 - Espectro de massas MS^2 do (A) íon precursor m/z 271,0 $[\text{M}-\text{H}]^-$ (composto 1), (Bi) e MS^3 (Bii) do íon precursor m/z 282,9 $[\text{M}-\text{H}]^-$ (composto 2).

Os íons da molécula desprotonada m/z 312,9 $[\text{M}-\text{H}]^-$ e 342,9 $[\text{M}-\text{H}]^-$, foram anotados como sendo flavonas metoxiladas. O composto 3, apresentou íon molecular desprotonado m/z 312,9 $[\text{M}-\text{H}]^-$ e íons fragmentos no espectro MS^2 em m/z 297,8 $[\text{M}-\text{H}-\text{CH}_3]^-$, no espectro MS^3 em m/z 282,8 $[\text{M}-\text{H}-(\text{CH}_3)_2]^-$ e MS^4 m/z 254,8 $[\text{M}-\text{H}-(\text{CH}_3)_2-\text{CO}]^-$ (Figura 9Ai-Aiii), anotado como sendo cirsimaritina (3) (Boukhalkhal *et al.*, 2020). O espectro de massas do composto 4 apresentou íon da molécula desprotonada em m/z 328,9 $[\text{M}-\text{H}]^-$, no espectro MS^2 foram observados os íons fragmentos m/z 313,9 $[\text{M}-\text{H}-\text{CH}_3]^-$, 298,9 $[\text{M}-\text{H}-(\text{CH}_3)_2]^-$, 285 $[\text{M}-\text{H}-\text{CO}_2]^-$, 271 $[\text{M}-\text{H}-(\text{CH}_3)_2-\text{CO}]^-$ (Figura 9B).

O composto foi anotado como 3,5,3'-tri-hidroxi-7,4'-dimetoxiflavona (4) (*Falcão et al.*, 2008). Para o composto 5, foi observado íon da molécula desprotona em m/z 342,9 $[M-H]^-$, o espectro MS^2 apresentou íon fragmento m/z 327,9 $[M-H-CH_3]^-$, o MS^3 m/z 312,9 $[M-H-(CH_3)_2]^-$ e o MS^4 m/z 297,8 $[M-H-(CH_3)_3]^-$, correspondente a perdas sucessivas de grupos metilas. Além disso foram observados os íons fragmentos em m/z 284,8 $[M-H-(CH_3)_2-CO]^-$, m/z 269,8 $[M-H-(CH_3)_2-CO-CH_3]^-$ e m/z 241,8 $[M-H-(CH_3)_2-CO-CH_3-CO]^-$ (Figura 9Ci-Ciii), sendo possível anotar o composto como a nevadensina (5) (*Végh et al.*, 2017).

Todos esses resultados mostram que os constituintes contidos no extrato etanólico da Amburana que corroboraram para a melhoria do resultado na resistência à oxidação. Essa estabilidade superior a 11,03 horas sugere menor formação de compostos em motores e sistemas de combustível. Foi feito o teste no Rancimat EN 14112 a (B. B. Ferrari *et al.*, 2021). Onde conseguimos identificar as substâncias adicionadas ao biodiesel capazes de minimizar as reações de oxidação, retardando o início das reações de oxidação, interrompendo a propagação radicalar. Para atestar a sua eficácia no biodiesel utilizamos o método Rancimat mostrado na figura 10. A **tabela 1** mostra os compostos identificados pelo DI-ESI-IT-MSⁿ

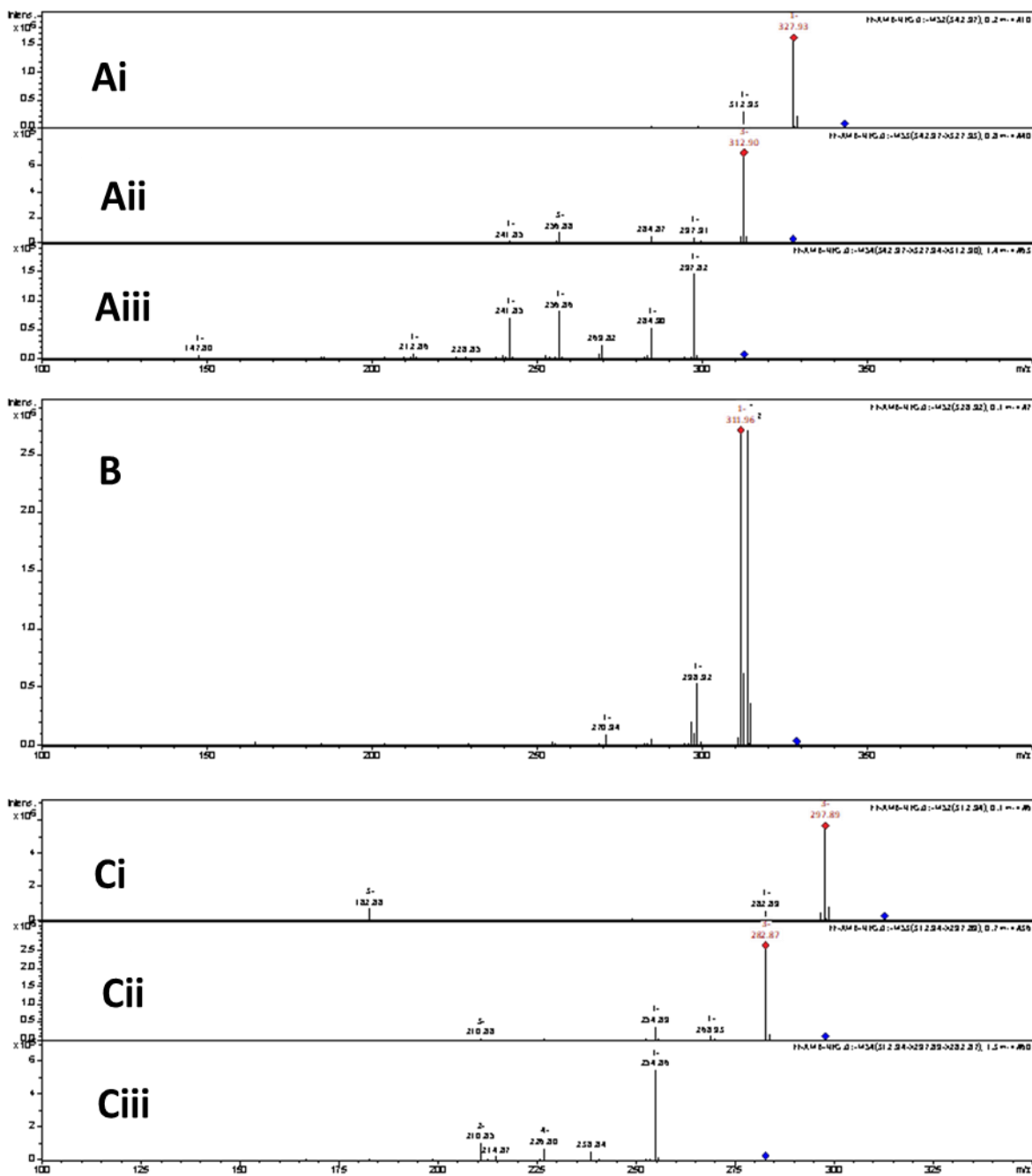


Figura 9 - Espectros de massas MS² (Ai) e MS³ (Aii) e MS⁴ (Aiii) do íon precursor m/z 312,9 [M-H]⁻ (composto 3). (B) íon precursor m/z 328,9 [M-H]⁻ (composto 4). (Ci) e MS³ (Cii) e MS⁴ (Ciii) do íon precursor m/z 342,9 [M-H]⁻ (composto 5).

Tabela 1 – Compostos anotados por DI-ESI-IT-MSⁿ no extrato etanólico de Amburana

DI-ESI-IT-MS ⁿ						
Nº	Formula Molecular	Massa Molecular	[M-H] ⁻ (m/z)	MS/MS ⁿ fragmentos (abundância em <u>porcentagem/%</u>)	Composto	Ref.
1	C ₁₅ H ₁₂ O ₅	272	271,0	MS ² [270,9]: 252,8 (13); 224,9 (15); 134,8 (100)	Buteina	Liu et al., 2020
2	C ₁₆ H ₁₂ O ₅	284	282,9	MS ² [282,9]: 267,8 (100); 238,9 (5) MS ³ [267,8]: 238,8 (68); 223,8 (53); 210,8 (100)	Calicosina	Wang et al., 2008
3	C ₁₇ H ₁₄ O ₆	314	312,9	MS ² [312,9]: 297,8 (100); 282,8 (11) MS ³ [297,8]: 282,8 (100); 254,8 (15) MS ⁴ [282,8]: 254,8 (100); 226,8 (13)	Cirsimaritina	Boukhalkhal et al., 2020
4	C ₁₈ H ₁₆ O ₇	330	328,9	MS ² [328,9]: 313,9 (100); 298,9 (19); 285 (1), 271 (3)	3,5,3'-tri-hidroxi-7,4'-dimetoxiflavona	Falcão et al., 2012
5	C ₁₇ H ₁₄ O ₇	344	342,9	MS ² [342,9]: 327,9 (100); 312,9 (19) MS ³ [327,9]: 312,9 (100); 297,9 (7), 284,8 (4), 256,8 (12) MS ⁴ [312,9]: 297,9 (100); 284,9 (36), 256,8 (55), 241,8 (24)	Nevadensina	Végh et al., 2017

3.5 Análise da estabilidade oxidativa do biodiesel de soja comercial na presença e ausência do extrato etanólico de *Amburana cearensis*

O estudo da estabilidade oxidativa do biodiesel é essencial para avaliar sua resistência à degradação durante o armazenamento e a utilização. A oxidação promove a formação de compostos que alteram as propriedades físico-químicas do combustível e podem comprometer o desempenho e a durabilidade dos sistemas de injeção. Dessa forma, a avaliação da estabilidade oxidativa permite prever o comportamento do biodiesel ao longo do tempo, subsidiar a adequação às normas regulatórias e orientar estratégias, como a aditivação com antioxidantes, para assegurar desempenho e confiabilidade do biocombustível.

O ensaio de estabilidade à oxidação a 110°C, realizado pelo método Rancimat (EN 14112), determina o tempo de indução até a formação de produtos de oxidação, sendo um parâmetro fundamental para avaliar a resistência do biodiesel à degradação oxidativa.

A Figura 10 apresenta os resultados dos tempos de indução do biodiesel de soja puro, sem adição de antioxidantes, bem como do biodiesel aditivado com 1000, 1500, 2000, 2500 e 3000 ppm de extrato etanólico de *Amburana* empregado como aditivo antioxidante.

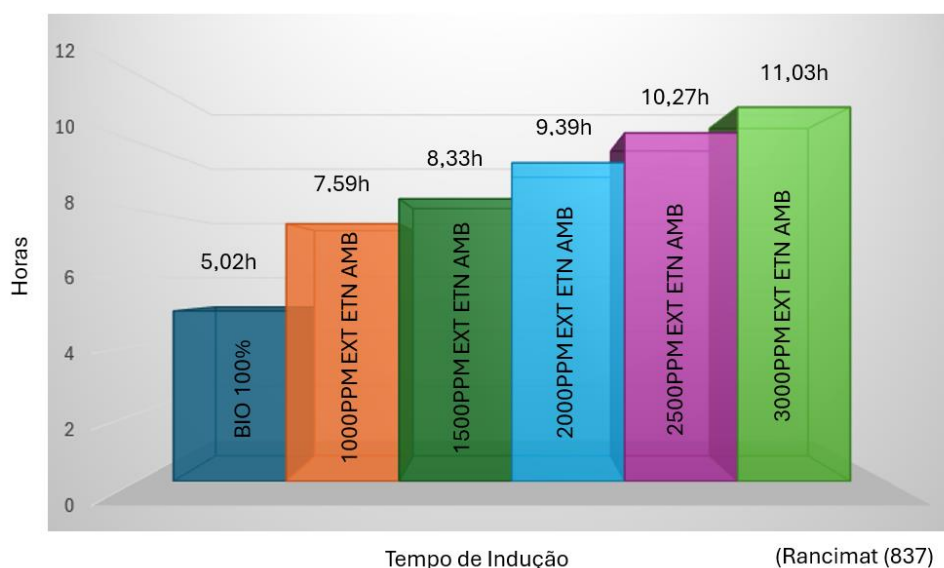


Figura 10 - Gráfico de estabilidade oxidativa para biodiesel de soja/BIOPAR - puro - 1000 a 3000 ppm (Extrato etanólico da *Amburana Cearensis*)

A Resolução ANP nº 920/2023 estabelece um valor mínimo de 13 horas para a estabilidade oxidativa de biocombustíveis, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Valores mínimos do período de indução (Lôbo et al., 2009)

Regulamento/Norma	Período de Indução Mínimo	Método de Ensaio
<i>Brasil (ANP)</i>	≥ 13 h	EN 14112 (Rancimat) ou equivalente
<i>Europa (EN 14214)</i>	≥ 06 h	EN 14112 (Rancimat)
<i>EUA (ASTM D6751)</i>	Não especificado	Testes podem ser feitos conforme métodos associados, mas nenhuma exigência mínima oficial no D6751

Os resultados obtidos evidenciam que o biodiesel de soja puro apresentou baixa estabilidade oxidativa, com período de indução de 5,02 h, valor inferior ao mínimo estabelecido pela norma europeia EN 14214 (6 h) e, de forma ainda mais expressiva, ao requisito vigente no Brasil, definido pela ANP como 13 h, mostrando o extrato etanólico da *Amburana cearensis* como potencial substituto a compostos sintéticos.

A adição do extrato etanólico de *Amburana* resultou em aumento significativo e gradual da estabilidade oxidativa, alcançando 7,59 h (1000 ppm), 8,33 h (1500 ppm), 9,39 h (2000 ppm), 10,27 h (2500 ppm) e 11,03 h (3000 ppm), valores que, embora ainda não atendam à exigência brasileira, superam o limite mínimo europeu, indicando que o biodiesel aditivado nessas concentrações estaria apto para uso em mercados internacionais com especificações menos restritivas.

4. CONCLUSÃO

Foi possível identificar os compostos presentes no exsudado da *Amburana cearensis*, o produto natural utilizado mostrou-se relevante no combate à oxidação do biodiesel de soja, mostrando-se uma área promissora no campo científico no âmbito de substituintes para antioxidantes sintéticos. As análises termoanalíticas mostraram que o uso do produto a altas temperaturas é estável, indicando maior resistência do combustível à diferentes condições de armazenamento, temperatura e operação.

O ensaio de estabilidade à oxidação a 110°C, realizado pelo método Rancimat apresentou um período de indução de 11,03 horas, utilizando como aditivo antioxidante 3000ppm de extrato etanólico do exsudado da *Amburana Cearensis*, conseguindo um valor aproximado do mínimo exigido por lei. O que evidenciou sua eficiência na mitigação da oxidação em comparação ao biodiesel sem aditivos mostrando que a continuação da pesquisa é promissora. Tal desempenho destaca o potencial do extrato como uma futura alternativa de substituição sustentável aos antioxidantes sintéticos tradicionalmente empregados, ou até estudos para realizar blends, atendendo à demanda por insumos renováveis e ambientalmente seguros, mostrando o extrato como uma estratégia viável e eficiente para manter uma melhor estabilidade oxidativa do biodiesel, agregando valor a um produto natural que obteve bons resultado ao ser testado em um biodiesel comercial.

REFERÊNCIAS

AABY, K.; EKEBERG, D.; SKREDE, G. Characterization of phenolic compounds in strawberry (*Fragaria x Ananassa*) fruits by different HPLC detectors and contribution of individual compound to total antioxidant capacity. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, 2007 p. 4395-4406. doi.org/10.1021/jf0702592.

B. B. FERRARI *et al.* Evaluation of Antioxidant Additives for Biodiesel by EPR and UV-Vis Spectroscopies, and the Rancimat Method (EN 14112). **Revista Virtual de Química**, 13(4), 2021, 900–909. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20210016>.

BOUKHALKHAL, S. *et al.* UHPLC-DAD-ESI-MSⁿ profiling variability of the phenolic constituents *Artemisia campestris* L. populations growing in Algeria. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 23, p. 101483-101506, 2020. doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101483.

BRITO, Haissa Oliveira *et al.* Análise da composição fitoquímica do extrato etanólico das folhas da *Annona squamosa* (ATA). **Rev. Bras. Farm**, v. 89, n. 3, p. 180-184, 2008.

BRASIL. Resolução ANP nº 920, de 4 de abril de 2023. Estabelece a especificação do biodiesel e as obrigações quanto ao controle da qualidade a serem atendidas pelos agentes econômicos que comercializem o produto em território nacional. **ANP** - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-920-2023>.

CANUTO, K. M.; SILVEIRA, E. R. Constituintes químicos da casca do caule de *Amburana cearensis* A. C. SMITH. **Química Nova**, v. 29, n. 6, p. 1241-1243, 2006. doi.org/10.1590/S0100-40422006000600018.

CASTELO, R. M. , Silva, L. C. da ., Alexandre, J. de B. *et al.*, Análise Termogavimétrica de Micropartículas de óleo de Pequi (*Caryocar Coriaceum* Wittm). Em matriz polimérica de alginato e quitosana. *Revista Coleta Científica*, 4 (8), 2020, 23-30. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.4716820>

DANTAS, A. C. *et al.* Acaricidal activity of *Amburana cearensis* on the cattle tick *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*. **Ciência Rural**, 46(3),2015, 536–541. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20150334>.

DAVID, E.; KOPAC, J. Survey on Antioxidants Used as Additives to Improve Biodiesel's Stability to Degradation through Oxidation. **Molecules**, 2023, 28, 7765. doi.org/10.3390/molecules28237765.

DE OLIVEIRA FARIAS, E. A. *et al.* Screen-printed electrode modified with a composite based on *Amburana cearensis* gum, multi-walled carbon nanotubes, and gold nanoparticles for electrochemical determination of total isoflavones in soybean cultivars. **J Solid State Electrochem**, 29, 2025, 1121–1137. Disponível em: doi.org/10.1007/s10008-024-05963-x.

DE PAULA, R. C. M. *et al.* Characterization of anacardium occidentale exudate polysaccharide. **Polymer International**, v. 45, n. 1, 1998.

FALCÃO, S. I. *et al.* Phenolic profiling of portuguese propolis by LC–MS spectrometry: uncommon propolis rich in flavonoid glycosides. **Phytochemical Analysis**, 2012, v. 24, n. 4, p. 309-318. Disponível em: doi.org/10.1002/pca.2412.

FERREIRA, M. J. G. *et al.* Antimicrobial activity and chemical characterization of the bark decoction of cumaru stem. **Ciência Rural**, 2020, v. 50, n3, p. e20190785-e20190791. Disponível em: doi.org/10.1590/0103-8478cr20190785.

GIÃO, M. S. *et al.* Infusions of Portuguese medicinal plants: Dependence of final antioxidant capacity and phenol content on extraction features. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 87(14), 2007, 2638–2647. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jsfa.3023>.

JAIN, S.; SHARMA, M. P. Correlation development for effect of metal contaminants on the oxidation stability of *Jatropha curcas* biodiesel. **Fuel**, 90(5), 2011, 2045–2050. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.02.002>

LIU, J. *et al.* Simultaneous study of anti-ferroptosis and antioxidant mechanisms of butein and (S)-butin. **Molecules**, 2020, v. 25, p. 674-691. Disponível em: doi.org/10.3390/molecules25030674.

LÔBO, I. P. *et al.* Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos. **Química Nova**, 32(6), 2009, 1596–1608. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000600044>.

OLIVEIRA, M. T. A. *et al.* Determination of phenolic compounds and antioxidant activity of green, black and white teas of *Camellia sinensis* (L.) Kuntze, Theaceae. **Revista**

Brasileira de Plantas Medicinais, 2014, v. 16, n. 3, p. 490-498. doi.org/10.1590/1983-084X/13_061.

SANCHES, F. S. *et al.* (2025). Dichloromethane Extract from *Amburana cearensis* (Allemão) A.C. Sm. Seeds and Its Coumarin Reduce ROS Production and Protect PC12 Cells Against Glutamate Excitotoxicity and Oxygen-Glucose Deprivation. **Antioxidants**, 14(4), 2025, p. 440. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/antiox14040440>.

SANTI, M. M. *et al.* Determinação do perfil fitoquímico de extrato com atividade antioxidante da espécie medicinal *Cordia verbenacea* DC. por HPLC-DA. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, 2014, v. 16, n. 2, p. 256-261. Disponível em: doi.org/10.1590/S1516-05722014000200014.

SILVEIRA, Z. de S. *et al.* Phytochemistry and Biological Activities of *Amburana cearensis* (Allemão) ACSm. **Molecules**, 27(2), 2022, p. 505. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules27020505>.

TORRE, M. P.; CAVERO, R. Y.; CALVO, M. I. Anticholinesterase activity of selected medicinal plants from Navarra region of Spain na a detailed phytochemical investigation of *Origanum vulgare* L. ssp. *Vulgare*. **Molecules**, 2022, v. 27, p. 7100-7124. Disponível em: doi.org/10.3390/molecules27207100.

TENGGU-ROZAINA, T.M.; BIRCH, E.J.; Thermal Analysis for Lipid Decomposition by DSC and TGA. *Encyclopedia of food chemistry*, v.2, 345-352, 2019

VÉGH, A. K. *et al.* Three newly identified lipophilic flavonoids in *Tanacetum parthenium* supercritical fluid extract penetrating the Blood-Brain Barrier. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, 2017, v. 149, p. 488-493. Disponível em: doi.org/10.1016/j.jpba.2017.11.029.

WANG, Y. *et al.* Characterization of fifty-one flavonoids in a Chinese herbal prescription Longdan Xiegan Decoction by high-performance liquid chromatography coupled to electrospray ionization tandem mass spectrometry and photodiode array detection. **Rapid Communications in Mass Spectrometry**, 2008, v. 22, p. 1767-1778. Disponível em: doi.org/10.1002/rcm.3536.

5. CONTRIBUIÇÃO ATRELADAS A DISSERTAÇÃO

5.1 Importância Social

O aproveitamento do extrato etanólico do exsudato de *Amburana cearensis* como antioxidante natural para biodiesel apresenta relevante impacto social, especialmente para regiões onde a espécie é nativa, como o Nordeste brasileiro. A valorização de recursos vegetais regionais fortalece cadeias produtivas locais, estimula a bioeconomia e promove geração de renda para comunidades envolvidas na coleta e manejo sustentável da espécie. Além disso, a substituição de antioxidantes sintéticos potencialmente tóxicos por alternativas naturais contribui para a melhoria das condições de saúde ocupacional e redução de riscos associados à exposição química. O desenvolvimento de soluções baseadas em biodiversidade nacional também reforça a soberania científica e tecnológica do país, incentivando a pesquisa aplicada e a inovação sustentável alinhada às demandas sociais e energéticas contemporâneas.

5.2 Importância econômica

O estímulo ao desenvolvimento de insumos renováveis nacionais fortalece o setor de biocombustíveis e contribui para a diversificação da indústria regional, promovendo competitividade, inovação tecnológica e redução de custos associados à importação de aditivos sintéticos. O uso do extrato etanólico de *Amburana cearensis* como aditivo antioxidante representa uma alternativa estratégica aos antioxidantes sintéticos importados, frequentemente associados a elevados custos de produção e dependência externa. Agregar valor a subprodutos previamente descartados promove uma maior eficiência no aproveitamento de matérias-primas. O aumento significativo do tempo de indução oxidativa do biodiesel demonstra viabilidade técnica para inserção em mercados internacionais com requisitos regulatórios específicos, ampliando oportunidades comerciais.

5.3 Importância ambiental

A substituição parcial ou total de antioxidantes sintéticos por compostos naturais derivados de *Amburana cearensis* está alinhada aos princípios da Química Verde e da economia circular. O extrato etanólico apresenta origem renovável, maior biodegradabilidade e menor potencial de impacto ecotoxicológico quando comparado a aditivos convencionais como BHT, BHA e TBHQ. A valorização de resíduos ou frações secundárias do processamento vegetal contribui para a redução de desperdícios e melhor aproveitamento de recursos naturais. A melhoria da estabilidade oxidativa do biodiesel também reduz a formação de subprodutos degradativos, minimizando emissões e depósitos em motores. Dessa forma, o estudo contribui para o desenvolvimento de soluções energéticas mais sustentáveis, promovendo menor impacto ambiental ao longo do ciclo de vida do biocombustível.

NORMA DA REVISTA

Taylor & Francis Word Template for journal articles

Objetivos da revista e âmbito de aplicação:

O objetivo da revista ***Natural Product Research*** é publicar contribuições importantes na área da química de produtos naturais. A revista abrange todos os aspectos da pesquisa em química e bioquímica de compostos naturais.

Edições e publicação:

As edições da revista ***Natural Product Research*** serão intituladas "Parte A - Síntese e Estrutura" ou "Parte B - Produtos Naturais Bioativos". Todos os manuscritos submetidos estão sujeitos a uma avaliação inicial pelo Editor e, se considerados adequados para análise posterior, à revisão por pares por especialistas independentes e anônimos.

Política de Revisão por Pares.

Todos os manuscritos submetidos estão sujeitos a uma avaliação inicial pelo Editor. Se considerados adequados para análise posterior, os artigos são submetidos à revisão por pares por especialistas independentes e anônimos.

Ética de Publicação

O periódico adere aos mais altos padrões de ética de publicação, com processos rigorosos implementados para garantir que isso seja alcançado. A Taylor & Francis é membro do Comitê de Ética em Publicações (COPE) e utiliza o CrossCheck para todos os seus periódicos. Mais informações sobre nossos padrões e políticas éticas podem ser encontradas aqui: <http://authorservices.taylorandfrancis.com/ethics-for-authors/>

Métricas do Periódico:

 Uso	 Métricas de citação	 Velocidade/aceitação
• 565 mil downloads/visualizações anuais	• 1,6 (2024) Fator de Impacto • 2.0 (2024) IF de 5 anos • 5.2 (2024) CiteScore (Scopus) • Melhor quartil do CiteScore do 1º trimestre • 0,787 (2024) SNIP • 0,398 (2024) SJR	• Em média, 14 dias entre o envio da solicitação e a primeira decisão. • Em média, 33 dias entre a submissão e a primeira decisão pós-revisão. • Em média, 12 dias entre a aceitação e a publicação online. • Taxa de aceitação de 20%

Conselho Editorial:

Editor-chefe:

Armandodoriano Bianco - Dipartimento di Chimica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Roma, Itália.

Editor:

Marcello Nicoletti - Facolta di Farmacia e Medicina, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Roma, Itália.

Escritório Editorial:

Dr Ilaria Serafini - Dipartimento di Chimica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Roma, Itália.

Alessandro Venditti - Dipartimento di Chimica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Roma, Itália.

Dr Claudio Frezza - Dipartimento di Biologia Vegetale, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Praça Aldo Moro 5, 00185 Roma, Itália.

Sobre a revista

Natural Product Research é uma revista internacional com revisão por pares que publica pesquisas originais de alta qualidade. Esta revista publica apenas manuscritos em inglês e aceita os seguintes tipos de artigos:

- Artigo de pesquisa
- Comunicação Breve
- Análise
- Carta
- Nota de dados
- Método

Acesso aberto

Você tem a opção de publicar em acesso aberto nesta revista por meio do nosso programa de publicação **Open Select**. Publicar em acesso aberto significa que seu artigo estará disponível gratuitamente online imediatamente após a publicação, aumentando a visibilidade, o número de leitores e o impacto da sua pesquisa. Artigos publicados em acesso aberto com a Taylor & Francis normalmente recebem 35% mais citações e mais de 5 vezes mais downloads em comparação com aqueles que não são publicados em acesso aberto. Para este tipo de publicação será solicitada uma taxa de publicação de artigo (APC) para tornar seu artigo de acesso aberto, e esse custo geralmente pode ser coberto por sua instituição ou financiador.

Detalhes dos autores

Todos os autores de um manuscrito devem incluir seu nome completo e afiliação na capa. Quando disponíveis, inclua também os ORCiDs e os perfis de mídias sociais (Facebook, LinkedIn ou outras redes sociais). Um dos autores deverá ser identificado como o autor correspondente, com seu endereço de e-mail normalmente exibido no PDF do artigo (dependendo da revista) e na versão online. As afiliações dos autores são as instituições onde a pesquisa foi realizada. Se algum dos coautores nomeados mudar de afiliação durante o processo de revisão por pares, a nova afiliação poderá ser informada em nota de rodapé. Observe que nenhuma alteração de afiliação poderá ser feita após a aceitação do artigo.

Resumo gráfico

Esta imagem é obrigatória e deve fornecer aos leitores uma ideia clara do conteúdo do seu artigo. A largura máxima deve ser de 525 pixels. Caso a imagem seja mais estreita que 525 pixels, coloque-a sobre um fundo branco de 525 pixels de largura para garantir que as dimensões sejam mantidas. Salve o resumo gráfico em formato .jpg, .png ou .tiff.

Detalhes do financiamento

Forneça todos os detalhes exigidos pelas suas agências de financiamento e concessão de bolsas.

Declaração de conflito de interesses

Este documento serve para declarar qualquer interesse financeiro ou não financeiro decorrente da aplicação direta da sua pesquisa. Caso não haja conflitos de interesse relevantes a declarar, por favor, indique isso no artigo, por exemplo: *Os autores declaram não haver conflitos de interesse.*

Figuras

As figuras devem ter alta qualidade (1200 dpi para desenhos em preto e branco, 600 dpi para tons de cinza e 300 dpi para cores, no tamanho correto). As figuras devem ser fornecidas em um dos nossos formatos de arquivo preferenciais: PS, JPEG, TIFF ou Microsoft Word (DOC ou DOCX) são aceitáveis para figuras desenhadas no Word.

Tabelas

As tabelas devem apresentar informações novas, em vez de duplicar o que já está no texto. Os leitores devem ser capazes de interpretar a tabela sem consultar o texto. Forneça arquivos editáveis.

Plágio

Confiança e integridade estão entre os valores mais prezados pelos leitores em artigos acadêmicos revisados por pares. É por isso que a Taylor & Francis leva a questão do plágio muito a sério. Para as publicações da Taylor & Francis, isso se aplica a dados,

imagens, palavras ou ideias extraídas de quaisquer materiais em formatos eletrônicos ou impressos sem a devida atribuição. O uso de qualquer material desse tipo, direta ou indiretamente, deve ser devidamente reconhecido em todos os casos. Você deve sempre citar a sua fonte.