



Viabilidade da macaúba para a produção de biocombustível

Realização

Análise desenvolvida por **Atrium Forest Consulting**, Silvana Ribeiro Nobre

Edição

José Alberto Gonçalves Pereira

Coordenador de Conservação

Ricardo Juqueira Fujii

Analista de Conservação

Breno Melo

Estagiária de Conservação

Carolyne Garcia Schiavo

Analista de Engajamento

Maira Teixeira

Gerente de Ciências

Mariana Napolitano

Projeto gráfico e Design editorial

Laboota

Fotos

Shutterstock



O **WWF-Brasil** é uma ONG brasileira que há 25 anos atua coletivamente com parceiros da sociedade civil, academia, governos e empresas em todo país para combater a degradação socioambiental e defender a vida das pessoas e da natureza. Saiba mais em: wwf.org.br





SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
2. ESTADO DA ARTE DOS ESTUDOS SOBRE A MACAÚBA	6
3. LEGISLAÇÃO	14
4. MERCADO DE BIODIESEL	16
5. ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA PLANTIO DE MACAÚBA	22
6. VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DA MACAÚBA EM REGIME CONSORCIADO	26
7. CONCLUSÕES	27
8. ANEXO	28
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

01.

INTRODUÇÃO

A macaúba é uma palmeira que alcança até 25 metros de altura, sendo uma espécie nativa encontrada em quase todo o país. Seu fruto pode ser transformado em óleo vegetal, ração animal ou num denso granulado de biomassa com diversas aplicações industriais. Sua produtividade é elevada, podendo alcançar 6.000 litros por hectare, incluindo os óleos extraídos da polpa e da amêndoa.

Todas as partes do fruto da macaúba fornecem produtos com valor econômico. O componente mais valioso é o óleo extraído da polpa e da amêndoa. Esse processo gera um coproduto, a torta residual da extração, rica em fibras e de alto valor nutricional.

Sugerido para produtos alimentícios ou biodiesel, o óleo de polpa contém 80% de ácidos graxos, predominando o ácido oleico (65% a 70% do total de ácidos graxos).

Já o óleo de amêndoa, também usado para produtos alimentícios, cosméticos e fármacos, contém aproximadamente 70% de ácidos graxos (40% de ácido láurico, 30% de ácido oleico). Por sua vez, as tortas da polpa e da amêndoa são utilizadas como ração animal, especialmente porque 37% do conteúdo da torta da amêndoa é formado por proteínas. Ambas as tortas também são utilizadas como fertilizantes.

O endocarpo (a casca da amêndoa) contém elevado poder calorífico com potencial para uso como combustível sólido com baixo teor de cinzas, sem enxofre e com alta densidade.

A despeito da diversidade de usos possíveis da macaúba, o fator que acelerou tanto as pesquisas quanto os investimentos no cultivo dela foi a possibilidade de produção de biodiesel e bioquerosene para atender às metas assumidas pelo Brasil e pelas empresas de aviação nos compromissos internacionais relativos ao enfrentamento das mudanças climáticas.

Ao intensificar as políticas públicas de substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis, o Brasil caminhou no sentido favorável ao cumprimento de suas metas climáticas, previstas na Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e na sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês) ao Acordo de Paris. Um exemplo é a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), que estimula a descarbonização da matriz de combustíveis, e a política de aumento gradual do teor de biodiesel na mistura com o diesel para ser queimada em motores do ciclo diesel. Essas políticas contribuíram com o crescimento da demanda por biodiesel no país.

Além de todas as suas características ambientalmente positivas, atrai na macaúba a capacidade de atender a esse mercado com sustentabilidade e qualidade. A espécie chega a produzir 6.000 litros de óleo por hectare, embora ainda se encontre no estágio inicial de melhoramento

**A MACAÚBA
CHEGA A
PRODUZIR**

6 mil

**LITROS DE ÓLEO
POR HECTARE**

genético e pesquisa de manejo. Já a soja, que responde por 70% da produção nacional de biodiesel, rende apenas 500 litros por hectare.

Este estudo apresenta o potencial energético da macaúba e aponta estratégias alternativas de plantio compatíveis com o estágio atual de mercado e desenvolvimento da espécie. Ele também avalia a viabilidade econômica do cultivo da macaúba em sistemas agroflorestais com integração lavoura-pecuária-floresta, inclusive em áreas degradadas.

Existem apenas dois trabalhos científicos publicados que apresentam alguns resultados de viabilidade econômica da macaúba. É necessário, então, dar continuidade ao seu desenvolvimento tecnológico para que seja possível alcançar resultados econômicos minimamente satisfatórios.

Também são apresentados o resultado de um levantamento de dados secundários sobre a cultura juntamente com as análises dos autores. Além disso, foram levantadas informações sobre oferta e demanda de biodiesel. À luz dos dados e análises, sugerimos áreas prioritárias para o plantio e um fluxo de caixa mínimo para análise financeira do plantio da espécie.



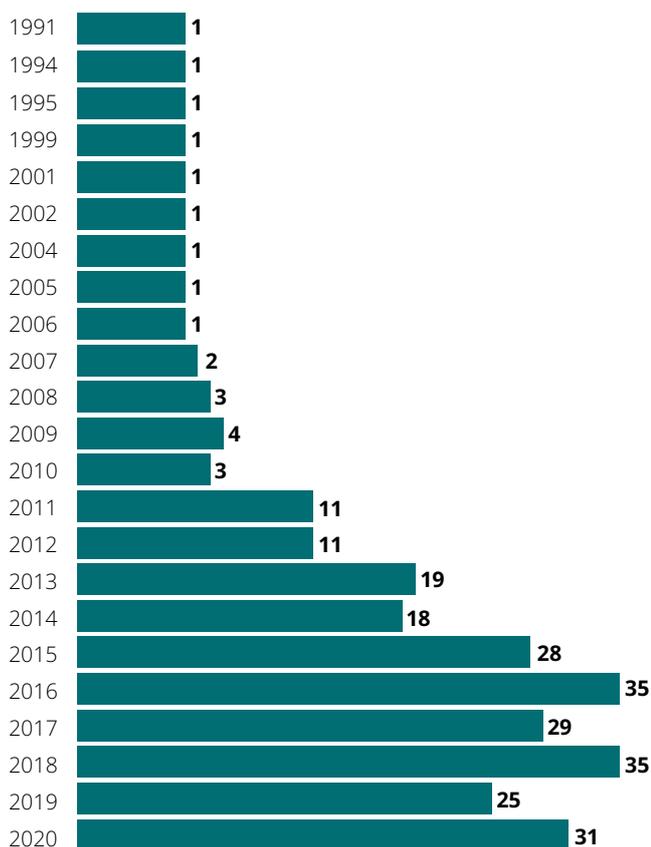
02.

ESTADO DA ARTE DOS ESTUDOS SOBRE A MACAÚBA

A macaúba é a palmeira mais pesquisada entre as 500 espécies de palmáceas existentes no Brasil. Foram encontrados 263 artigos científicos sobre a macaúba no *Web of Science*, uma plataforma que reúne bases de dados também conhecidas como índices de citações científicas. O recorte temporal do levantamento de dados sobre a macaúba foi o período de 1900 a 2020.

Verificou-se que a pesquisa sobre o tema é muito recente – 90% dos artigos foram publicados ao longo dos últimos dez anos, e metade dos trabalhos, nos últimos quatro anos (2017 a 2020), dado o interesse pela espécie como alternativa aos combustíveis fósseis. **(Gráfico 1)**

Gráfico 1. Artigos publicados ao longo dos anos



Diversos estudos foram desenvolvidos com o intuito de melhor conhecer os fatores que influenciam a produtividade da macaúba, como temperatura, altitude, incidência solar, precipitação, déficit hídrico e a longa dormência das sementes, aspecto desafiante a seu processamento agroindustrial.

A análise dos artigos assinala o esforço dos pesquisadores para encontrar soluções, apontar perspectivas e usos inovadores para a macaúba e demais espécies oleaginosas. Grande parte dos artigos também investiga os gargalos do processo industrial da produção de biocombustível e preocupa-se em testar procedimentos produtivos diversos.

Foram publicados artigos em tópicos necessários para a domesticação de uma espécie, desde o zoneamento e a aptidão edafoclimática até a criação e adaptação de processos industriais de transformação. Os objetos de pesquisa contemplaram as áreas de caracterização botânica da espécie, genética, germinação, produção de mudas, propagação vegetativa, silvicultura, composição dos frutos e aplicações possíveis, entre outras.

A partir da leitura dos resumos dos trabalhos, esta análise classifica os artigos nos tópicos de pesquisa mostrados na **Quadro 1**. Nos itens sobre ecologia, botânica e silvicultura, as pesquisas geralmente focam o manejo com a finalidade de domesticar a espécie, pois “a exploração econômica da macaúba está atualmente em transição, do extrativismo ao cultivo agrícola”¹.

Alguns temas carecem de mais esforços de pesquisa, como a viabilidade econômica, a quantificação de carbono e o impacto na redução de emissões de gases de efeito estufa. É importante observar que não foram encontrados ainda estudos de caso publicados, fato que pode ser explicado pelo estágio no qual se encontram as pesquisas.

¹ (PIMENTEL et al., 2015)

Quadro 1. Artigos publicados por tópicos de pesquisa



Outros artigos concentraram-se no esforço de adaptação da planta aos vários tipos de solo e ambiente do Cerrado. No estado de Goiás, por exemplo, a macaúba ocorre quando o solo possui mais 50% de saturação de base (eutrófico), com média ou alta fertilidade, elevados níveis de potássio e precipitação entre 1.300 e 1.700 milímetros por ano com temperatura média em torno de 22°C.

Na região norte de Minas Gerais, a macaúba adaptou-se a solos com fertilidade natural mais elevada, onde a floresta semidecidual (perde muitas folhas no período seco) era a formação vegetal primitiva, mostrando que a espécie avança como pioneira, evitando condições extremas de carência de nutrientes e água.

Sementes e quebra de dormência

A quebra da dormência das sementes tem sido um desafio importante para a utilização agroindustrial da macaúba. Como apontam os estudos de ecologia e zoneamento dessa palmeira, sua longa dormência relaciona-se à grande adaptação da espécie às condições do Cerrado, que mantém vivas as sementes, aguardando condições propícias à germinação. Uma análise sintetizada identificou 18 artigos

científicos a respeito de soluções para contornar esta importante característica da espécie. Parte desses artigos aborda as condições mais adequadas à germinação *in vitro* da macaúba. Outras pesquisas preferiram focar a produção de mudas em viveiros.

Quando cultivadas sob baixa intensidade de luz, as mudas apresentavam maior eficiência fotoquímica e minimizavam os custos respiratórios com um balanço positivo de carbono e menor irradiação. Já outros pesquisadores testam a influência da fertilização dos substratos no desenvolvimento das mudas. Outros estudam o período demandado pelas mudas para permanecer no viveiro antes de ficarem prontas para o plantio.

Silvicultura e manejo

Alguns estudos visaram orientar o manejo da espécie. Um deles, por exemplo, identificou uma formação peculiar da macaúba que são os caules subterrâneos de saxofone associados às raízes tuberosas. A pesquisa concluiu que o caule de saxofone representa importante adaptação da espécie a ambientes impactados pelas atividades humanas. A profundidade das

raízes aumenta com a idade, e a distância que as raízes alcançam coincide com a projeção da copa, elementos que influenciam a forma como se deve fazer a fertilização e a irrigação.

Outros pesquisadores estudaram a interação da macaúba com os processos hidrológicos, as respostas da espécie ao déficit hídrico, a dinâmica do carbono nas pastagens consorciadas e a relação com artrópodes e mamíferos. Dessa maneira, foi possível identificar os predadores das sementes que contribuem para a sua dispersão.

Um dos autores estudou as interações entre o gado e a população de macaúba, e outro avaliou a resistência dos embriões ao fogo, concluindo que a estrutura do fruto pode facilitar a resiliência da semente, mesmo quando sujeita a eventos de incêndio cada vez mais frequentes².

Não surpreende que a espécie esteja se mostrando relevante nos processos de recuperação de solos degradados, em virtude do seu sistema radicular e dos processos hidrológicos relacionados a seu cultivo. Um dos artigos quantifica o escoamento superficial da precipitação sob várias condições³. Além de confirmar as melhores práticas de manejo, os autores encontraram valores muito superiores de retenção de água no solo quando comparados a ensaios similares com outras culturas.

Com relação às pragas e doenças que ameaçam a cultura da macaúba, foram examinados quatro estudos. Os esforços de pesquisa concentram-se nos insetos *Rhynchophorus palmarum* e *Cyclocephala forsteri*. Uma pesquisa descreve a variação temporal da presença de *Rhynchophorus palmarum*, vetor do nematoide *Bursaphelenchus cocophilus*, que provoca a doença do anel vermelho nas palmáceas⁴ *Cyclocephala forsteri*, besouro que pode reduzir significativamente a produtividade da macaúba⁵.

Pesquisadores também identificaram dois fungos distintos em folhas de macaúba em Porto Rico^{6,7}.

Dois artigos destacam-se no que se refere ao comportamento da macaúba em condições de mudanças climáticas. O primeiro mostrou que plantas cultivadas com concentrações mais elevadas de CO₂ são mais capazes de se recuperar da seca⁸. O segundo trabalho indicou que o cultivo consorciado de café e macaúba pode ser uma estratégia de adaptação sob futura variabilidade climática, esperada com altas temperaturas e baixa pluviosidade⁹.

Os processos de colheita e pós-colheita foram contemplados com 17 artigos. Um deles recomenda a colheita dos frutos diretamente da árvore, antes de caírem (estágio de pré-abscisão), ou coletados do solo até sete dias após sua queda (abscisão, quando os frutos se separam da árvore). Em ambos os casos, os frutos devem ser tratados com fungicida antes do armazenamento¹⁰.

² (BICALHO et al., 2016) | ³(CORRÊA et al., 2018) | ⁴ (SCHLICKMANN-TANK et al., 2020)

⁵ (MAIA et al., 2020) | ⁶ (GUATIMOSIM; PINTO; BARRETO, 2013) | ⁷ (RAMOS et al., 2001)

⁸ (ROSA; SOUZA; PEREIRA, 2019) | ⁹ (MOREIRA et al., 2018) | ¹⁰ (EVARISTO et al., 2016)

Processamento industrial

Um aspecto crucial para a viabilidade econômica do biocombustível à base de óleo de macaúba é o processamento industrial dos produtos derivados da espécie. Este estudo identificou 57 artigos sobre metodologias que visam melhorar a eficiência do processamento do biodiesel e bioquerosene de macaúba.

Pode-se separar os 57 artigos em sete temas: esterificação (29), anterior a esterificação (14), após a esterificação (3), corrosão da superfície de metal (1), mistura de biodiesel (2), pirólise (5) e outros processos (2). A maioria (29 artigos) aborda a eficiência do processo de esterificação, enquanto 14 tratam dos procedimentos de extração do óleo do mesocarpo (polpa) ou do endocarpo (semente). Cinco pesquisas caracterizam o teor de resíduos de biodiesel de macaúba após a combustão, ao passo que três focam a purificação do óleo esterificado com água.

Dois artigos apresentam estudos relacionados ao grau de mistura do biodiesel no diesel. Dois debruçam-se sobre outros processos industriais, voltados à produção de tortas e ração animal. Apesar da relevância do assunto, somente um artigo estuda o problema da corrosão de metais causada pelo biodiesel¹¹.

Convém ressaltar que 33 dos 57 artigos examinados mencionam o alto teor de ácidos graxos livres (FFA – *free fatty acids*) dos óleos de macaúba, o que faz da espécie uma excelente alternativa para a produção de biodiesel.

Um das constatações importantes desse conjunto de trabalhos de pesquisa é a combustão mais completa proporcionada pelo biodiesel de macaúba, implicando tendência de redução das emissões em comparação com o atual diesel B comercial. Em função do menor teor de ácidos graxos poli-insaturados, o biodiesel de macaúba oferece maior resistência à oxidação que o biodiesel de soja, por exemplo, correspondendo a impactos menos severos sobre o sistema de injeção de combustível do motor.

Um importante tema levantado pelos artigos agrupados em “processamento industrial” é o uso do óleo da amêndoa da macaúba (semente ou kernel) na produção de bioquerosene. O óleo da amêndoa apresenta excelente resistência à oxidação, uma vez que é constituído principalmente por cadeias orgânicas saturadas. Esta estabilidade é herdada pelo biodiesel preparado com este óleo. A segunda característica positiva do biodiesel preparado a partir do óleo de amêndoa de macaúba é que ele apresenta baixo ponto de entupimento do filtro a frio (CFPP). Dois artigos mencionam misturas (*blends*) que usam o óleo de amêndoa, concluindo sobre a viabilidade de sua mistura com o querosene fóssil.

Outros três artigos investigam a produção de diesel verde, também chamado de *green diesel*, *drop-in fuel*, ou, ainda, de hidrocarbonetos renováveis, combustíveis produzidos a partir de óleos vegetais para serem usados puros em motores do ciclo diesel. O aspecto mais relevante desses combustíveis é que podem ser empregados nos mesmos motores e máquinas

¹¹ (BATISTA et al., 2019)

adaptados ao diesel fóssil. Seu processo de fabricação – desoxigenação catalítica – é distinto do utilizado na obtenção do biodiesel comum.

A pesquisa referente à produção de diesel verde e bioquerosene a partir de óleos vegetais, por meio de desoxigenação catalítica, já se encontra há décadas em andamento em diversas partes do mundo.

Usos e benefícios da macaúba

O potencial uso das partes e extratos da macaúba foi objeto de 80 artigos científicos no levantamento efetuado. As partes compreendem epicarpo, mesocarpo, endocarpo, amêndoa e semente, enquanto os extratos da macaúba são basicamente óleos, polpas, tortas e extrato da folha.

Quase todos os artigos referem-se à macaúba como espécie potencial para produção de biocombustíveis. Apresentados na **Tabela 1**, os usos e produtos pesquisados foram agrupados em cinco conjuntos: produtos industriais, ração animal, fármacos, biofunções e cosméticos e artigos de limpeza (ver **Gráfico 2**).

Gráfico 2. Grupos de produtos

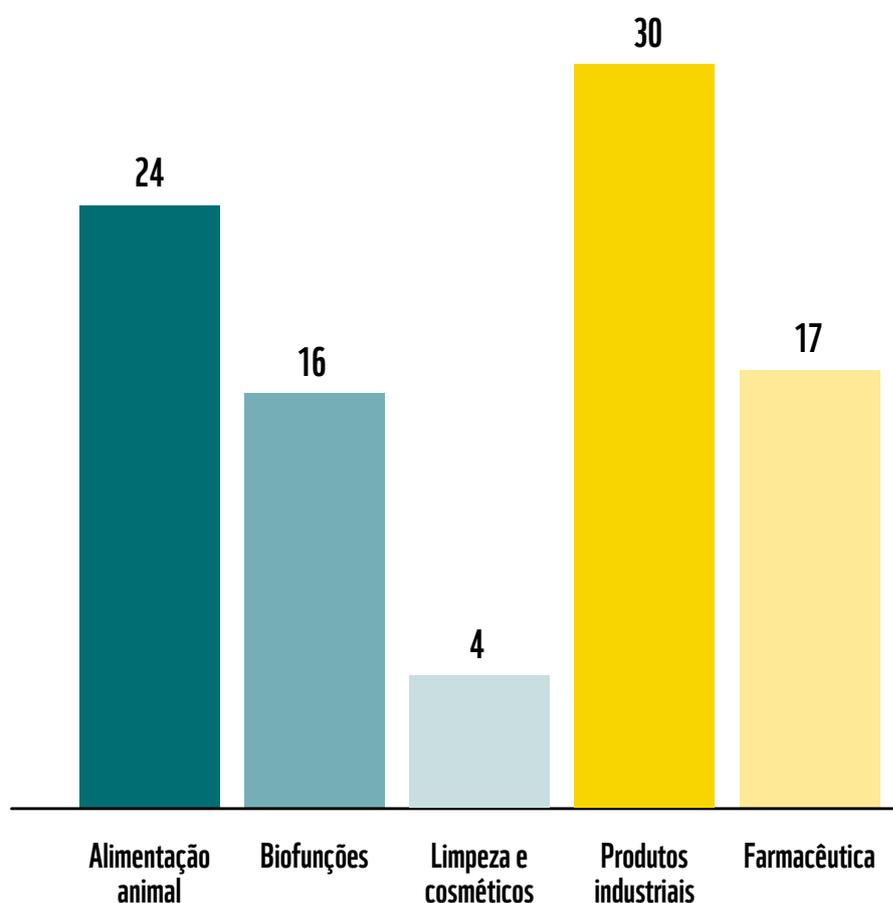


Tabela 1. Usos e produtos

<i>Grupo de produtos</i>	<i>Tipo de produto</i>	<i>Publicações</i>	<i>Grupo (último bloco)</i>
Alimentação animal	Torta de polpa	13	24
	Minhoca	3	
	Ecosistema de ruminantes	6	
	Silagem	3	
Biofunções	Antidiabético	2	16
	Anti-inflamatório	3	
	Antimutagênico	2	
	Antioxidante	7	
	Apoptótico	1	
	Diurético	2	
	Enzimas	4	
	Efeitos hipoglicêmicos	1	
	Imunomodulação	1	
Outras biofunções	4		
Limpeza e cosméticos	Cosméticos	2	4
	Produtos de higiene	1	
	Filtro solar	1	
Produtos industriais	Bio abrasivos	1	30
	Absorvente orgânico	3	
	Biochar	6	
	Bio compósitos	1	
	Biocombustível	7	
	Tijolos e briquetes	2	
	Lignina e celulose	4	
	Lubrificantes	1	
	Composição físico-química	5	
	Poliuretanos	1	
	Biocombustível sólido	1	
Farmacêutica	Sabonetes de cálcio (gorduras protetoras)	1	17
	Alimentos funcionais e nutrientes humanos	12	
	Farmacologia	3	
	Prebióticos	1	
	Tablet	1	
	Vitaminas	3	
Total			80

No grupo de produtos industriais, além de combustíveis líquidos (biodiesel e bioquerosene), os artigos consultados relatam a aplicação da macaúba na fabricação de carvão ativado destinado à absorção de componentes tóxicos em processos industriais. A utilização da torta de macaúba como componente de tijolos e lajotas indicam alternativas para o emprego de resíduos da indústria de biocombustíveis em locais distantes de centros industriais.

No grupo de alimentação animal o uso da torta de polpa para produção de rações e silagem tem enorme relevância na sustentabilidade econômica do negócio da macaúba, visto que a espécie pode ser amplamente cultivada consorciada com a pecuária extensiva em todo o Cerrado.

Os grupos de biofunções, fármacos e cosméticos referem-se a aplicações mais complexas nas indústrias química e farmacêutica. Sua implementação no território brasileiro provavelmente demandaria um montante mais elevado de investimentos em comparação com os grupos de processos industriais e alimentação animal. Entretanto, são indústrias cujos produtos de maior valor agregado podem contribuir para a viabilidade econômica da produção de macaúba. Por outro lado, óleos, extratos e polpas de macaúba poderiam ser empregados em plantas químicas e farmacêuticas já estabelecidas.

Quanto mais aplicações forem desenvolvidas para a espécie, maior será sua chance de se estabelecer no mercado como matéria-prima para biocombustíveis, diminuindo o risco para os produtores. Nessa circunstância, o preço pago aos fornecedores da palmácea poderia ser formado por mais de uma indústria, além da de biocombustíveis – assegurando ao produtor a liberdade de direcionar sua colheita a um conjunto de indústrias clientes, maximizando seus ganhos.

Outras oleaginosas para produção de biodiesel

É importante notar que os artigos científicos analisados apresentam outras espécies de oleaginosas, além da macaúba – baru, *belly palm*, guariroba, jerivá e licuri. Todas elas são palmáceas propícias à produção de biodiesel e nativas do Brasil, exceto a *belly palm* (*Acrocomia crispata*), originária de Cuba. Também podem ser utilizadas na produção de ração animal, na alimentação humana e como combustível sólido e cultivadas em consórcio com a pecuária extensiva. Em tese, poderiam

ser usadas na recuperação de reservas legais ou para enriquecer a biodiversidade nas pastagens degradadas, assim como ocorre com a macaúba.

A guariroba e o licuri são opções promissoras para a Caatinga, e o jerivá poderia contribuir para diversificar a produção de óleo no Cerrado. Já o babaçu (*Orbygnia spp*; *Attalea speciosa*) e o buriti (*Mauritia Flexuosa*) representam alternativas auspiciosas para o meio-norte, na faixa de contato entre os biomas Cerrado e Amazônia¹².

Pesquisadores das Universidades Federais do Rio de Janeiro e Fluminense, do Instituto Federal do Maranhão e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energia e Ambiente estudaram a viabilidade técnica da produção de biodiesel a partir de óleos vegetais com alto teor de ácidos graxos livres das seguintes espécies nativas brasileiras: castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*), babaçu (*Orbignya speciosa*), pequi (*Caryocar brasiliensis*), palma (*Elaeis guineenses*) e macaúba (*Acrocomia aculeata*). Concluíram que é possível adequar os procedimentos de produção de biodiesel para tais óleos¹³.

Autores e instituições de pesquisa

A Universidade Federal de Viçosa (UFV) lidera o ranking da produção científica sobre a macaúba com 30% dos artigos publicados em 11 das 12 áreas de pesquisa na classificação utilizada nesta publicação. A **Tabela 2** mostra as instituições com mais de 5% dos artigos publicados sobre macaúba até 2020. Além dessas, mais 126 instituições participaram das pesquisas, contribuindo com menos de 5% dos artigos, sendo 83 sediadas no Brasil.

Verificamos também que os pesquisadores brasileiros participaram da quase totalidade dos artigos publicados, 94%, demonstrando que o conhecimento está sendo desenvolvido essencialmente por pesquisadores e instituições autóctones, inclusive toda a pesquisa relacionada aos processos industriais.

¹² A informação sobre o babaçu e o buriti encontra-se no material sobre biocombustíveis da Universidade Federal de Viçosa.

¹³ (VIEIRA et al., 2018)

Tabela 2. Instituições de pesquisa

<i>Código da Instituição</i>	<i>Nome da Instituição</i>	<i>% Artigos publicados</i>
UFV	Universidade Federal de Viçosa	30,45%
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais	23,64%
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária	13,64%
UNIMONTES	Universidade Estadual de Montes Claros	9,09%
UEM	Universidade Estadual de Maringá	8,64%
UFLA	Universidade Federal de Lavras	7,73%
USP	Universidade de São Paulo	6,36%
UNB	Universidade de Brasília	5,91%
UFGD	Universidade Federal da Grande Dourados	5,45%
UFMS	Universidade Federal do Mato Grosso do Sul	5,45%

Financiamento das pesquisas

As pesquisas relatadas nos artigos encontrados no *Web Of Science* foram quase totalmente financiadas pelas agências de pesquisa brasileiras, a saber, as fundações estaduais de amparo à pesquisa (FAPs), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

É importante ressaltar o interesse do Estado brasileiro no desenvolvimento do setor de óleos vegetais, em especial no desenvolvimento dos biocombustíveis, como ocorreu nas pesquisas para a criação da tecnologia de produção do etanol a partir da cana-de-açúcar.

03.

LEGISLAÇÃO

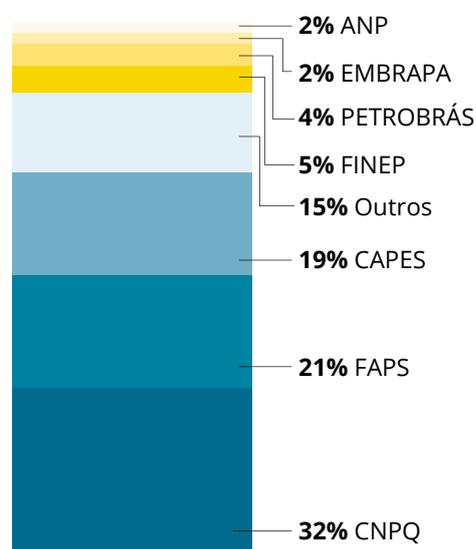
Observa-se evolução da adição do biocombustível no diesel desde que a Lei nº 11.097/2005 instituiu o uso obrigatório do biodiesel misturado ao diesel fóssil. No artigo 4º, a lei definiu biodiesel como “o biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna, com ignição por compressão (motores de ciclo diesel) ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil”.

Em 2004, a Resolução ANP nº 42/2004 especificou que o biodiesel seria um combustível “composto de alquil-ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais, conforme a especificação (...)” Os ésteres de ácidos graxos são obtidos a partir da reação entre triglicerídeos ou ácidos graxos com álcool, na presença de um catalisador. E esse é o caso do biodiesel obtido a partir do óleo de macaúba e outras oleaginosas brasileiras, como a soja.

Pouco mais de três meses após a adoção do Acordo de Paris, em 12 de dezembro de 2015, o Congresso Nacional aprovou a Lei nº 13.263/2016, que autorizou o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) a elevar o percentual de biodiesel na mistura até o patamar de 15%, desde que obedecidas as condicionantes de aprovação de testes nos motores.

O interesse dos pesquisadores pela macaúba tornou-se crescente à medida que o CNPE ampliava o percentual mínimo compulsório de biodiesel na mistura de combustível para o motor de ciclo diesel (**Gráfico 3**).

Gráfico 3. Agências de financiamento



Além disso, o estabelecimento nos últimos dez anos de definições e normatizações nacionais e internacionais referentes aos processos de produção e à composição do biodiesel facilitou o desenvolvimento de pesquisas sobre procedimentos que viabilizem o atendimento dos padrões exigidos para o biocombustível por essas normas. Entre elas, cabe mencionar a Resolução ANP nº 45/2014, padrões do Comitê Europeu para a Padronização (CEN – *Comité Européen de Normalisation*) para o HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*) e as especificações nacionais para o querosene alternativo de aviação.

Apesar da regulamentação da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) restringir a denominação biodiesel aos ésteres de ácidos graxos, existem outros combustíveis de origem renovável disponíveis no mercado mundial que podem ser utilizados em motores do ciclo diesel, em consonância com a Lei nº 11.097/2005. No entanto, como vimos no capítulo anterior, grande parte da pesquisa aplicada à macaúba concentra-se a produção de ésteres a partir de ácidos graxos.

A destinação principal do biodiesel é a mistura no diesel em proporções crescentes. A Resolução ANP nº 50/2013 regulamenta as especificações dos óleos diesel de uso rodoviário, considerando a necessidade de atendimento da sétima etapa do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve P7)¹⁴. O Art. 7º estabelece que o *“óleo diesel B de uso rodoviário comercializado no país deverá conter biodiesel em percentual determinado pela legislação vigente”*.

A adição obrigatória de biodiesel em 2020 foi estipulada em 12%, com previsão legal de aumento para 15% em 2023. Enquanto aumentavam as proporções de biodiesel na mistura do diesel, o Brasil exigiu padrões crescentemente restritivos em relação às emissões. Avançaram também as pesquisas e os acordos entre os fabricantes de motores e as entidades governamentais que determinam as especificações dos biocombustíveis. A adição obrigatória de biodiesel atingiu 13% no início de 2021; contudo, a alta de preços da soja e, posteriormente, a alta do diesel levaram à redução do teor obrigatório para 10%.

Outro estímulo ao biodiesel veio da Lei nº 13.576/2017, que instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), reconhecendo o papel estratégico dos biocombustíveis na matriz energética nacional e a importância da segurança do abastecimento de combustíveis e da mitigação das emissões de gases de efeito estufa. O RenovaBio começou a ser implementado efetivamente em 2020, com a obrigatoriedade de atendimento das metas anuais de descarbonização pelas distribuidoras de combustíveis.

¹⁴ Programa de controle de emissões veiculares criado em 1986 pelo Conama com o objetivo de reduzir e controlar a contaminação atmosférica e a emissão de ruído por fontes móveis. P7 é o sétimo padrão publicado em 2012, equivalente ao padrão europeu de 2008.

04.

MERCADO DE BIODIESEL

O biodiesel é um biocombustível obtido a partir da conversão de óleos vegetais extraídos de oleaginosas como soja, algodão, palma e girassol, entre outras, ou da gordura animal de bovinos, suínos e aves. Após passar por processos de transformação e purificação para adequação a especificações de qualidade, é destinado à aplicação em motores do ciclo diesel como substituto parcial ou total do diesel de origem mineral (diesel A)¹⁵.

O Brasil possui longa experiência com o uso de biocombustíveis no setor de transportes. Em 1931, decreto do presidente Getúlio Vargas obrigou os importadores de gasolina a misturar 5% de álcool no combustível de origem fóssil. Foi, porém, o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), lançado pelo governo federal em 1975, que consagrou o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar como uma das peças estruturais do mercado brasileiro de combustíveis.

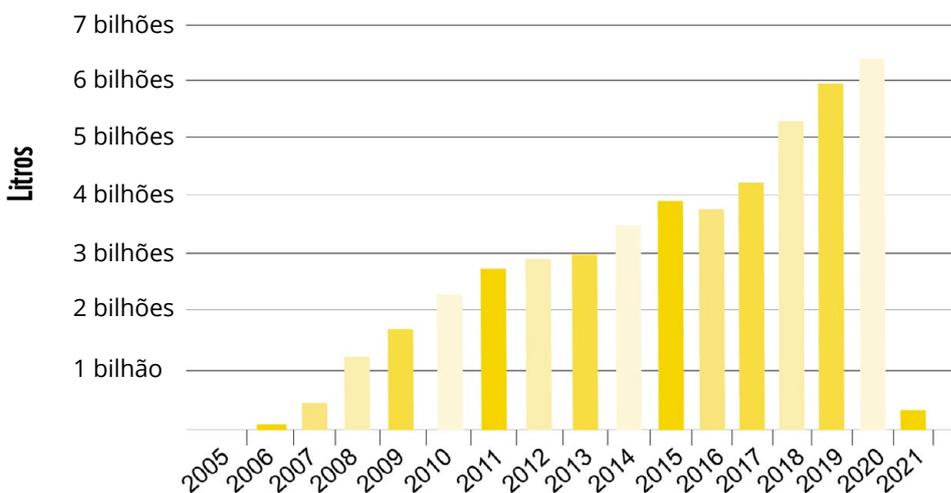
Mais um passo fundamental para expandir o uso de biocombustíveis no país foi dado em 2005, quando a Lei nº 11.097/2005 instituiu o primeiro marco regulatório do biodiesel no Brasil.

A lei previa a fixação de prazos para a adição do biodiesel ao óleo diesel em percentuais mínimos compulsórios. Entre o início do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), em 2005, até dezembro de 2019 foram produzidos mais de 40,6 bilhões de litros deste biocombustível¹⁶.

Biodiesel

Em 2010, o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) elaborado para o período 2010-2019 pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) estimou consumo de 3,8 bilhões de litros de biodiesel em 2020. Na época de sua publicação, o PDE ponderava que o Brasil enfrentaria dificuldade para cumprir a Lei nº 11.097/2005, tendo em vista a capacidade limitada de produção para atender ao percentual obrigatório de 5% de biodiesel na mistura com o diesel. No entanto, produção e consumo de biodiesel atingiram 6,8 bilhões de litros em 2020 (**ver Gráfico 4**). Nesse patamar, o Brasil tornou-se o terceiro produtor de biodiesel, com 12% da produção mundial, atrás apenas dos Estados Unidos e da Indonésia.

Gráfico 4. Consumo de biodiesel no Brasil

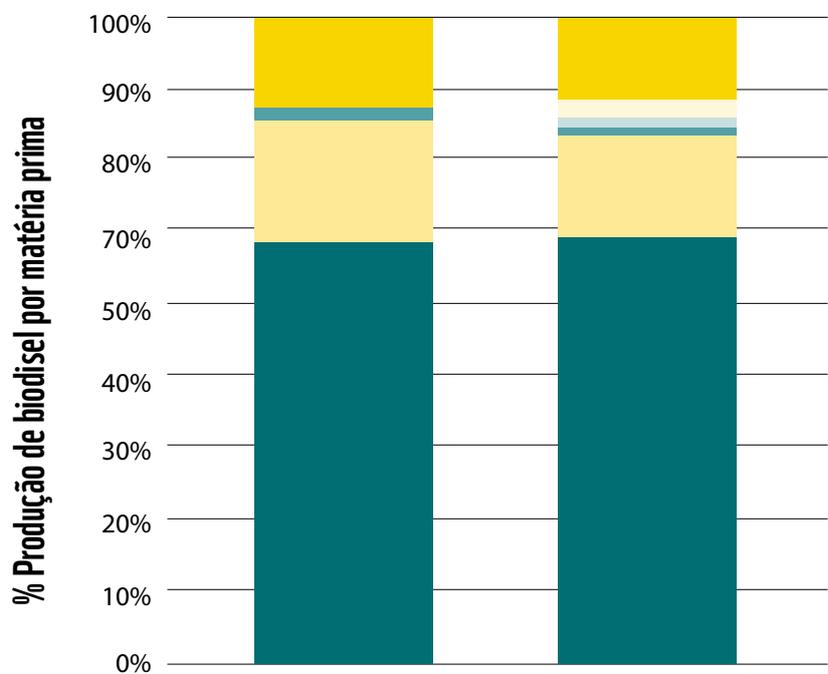


¹⁵(ABIOVE, 2021).

¹⁶(EPE, 2020).

Nos primeiros 15 anos do uso comercial de biodiesel no país, a demanda de biodiesel foi atendida utilizando-se principalmente a soja, única oleaginosa disponível na escala necessária para atender à legislação estabelecida em 2005. Desde 2008, a soja é matéria-prima para a produção de 70% do biodiesel brasileiro (**Gráfico 5**). Convém salientar, ainda, que somente 3,7% da produção de soja em 2019 (120 milhões de toneladas de grãos) foi direcionada à indústria do biodiesel.

Gráfico 5. Produção de biodiesel por matéria-prima



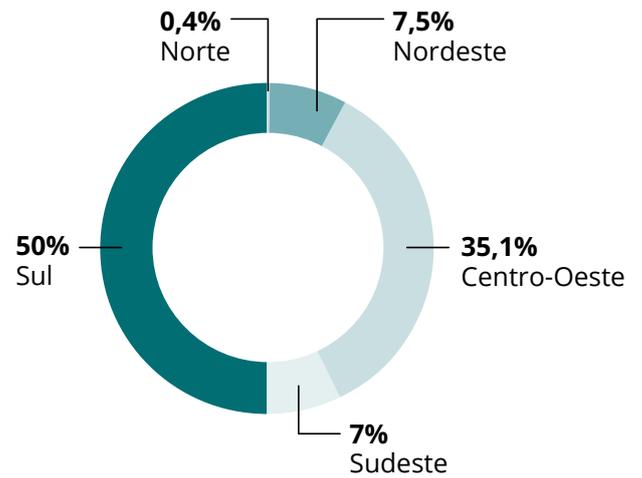
Em metro cúbico (m³):

	2008	2020
Outros materiais graxos	140.489	739.735
Matérias-primas diversas	0	185.138
Óleo de fritura usado	0	79.023
Óleo de algodão	18.353	107.193
Gorduras animais	206.966	740.755
Óleo de soja	801.320	4.580.193

Fonte: dados ABIOVE, gráfico Autor

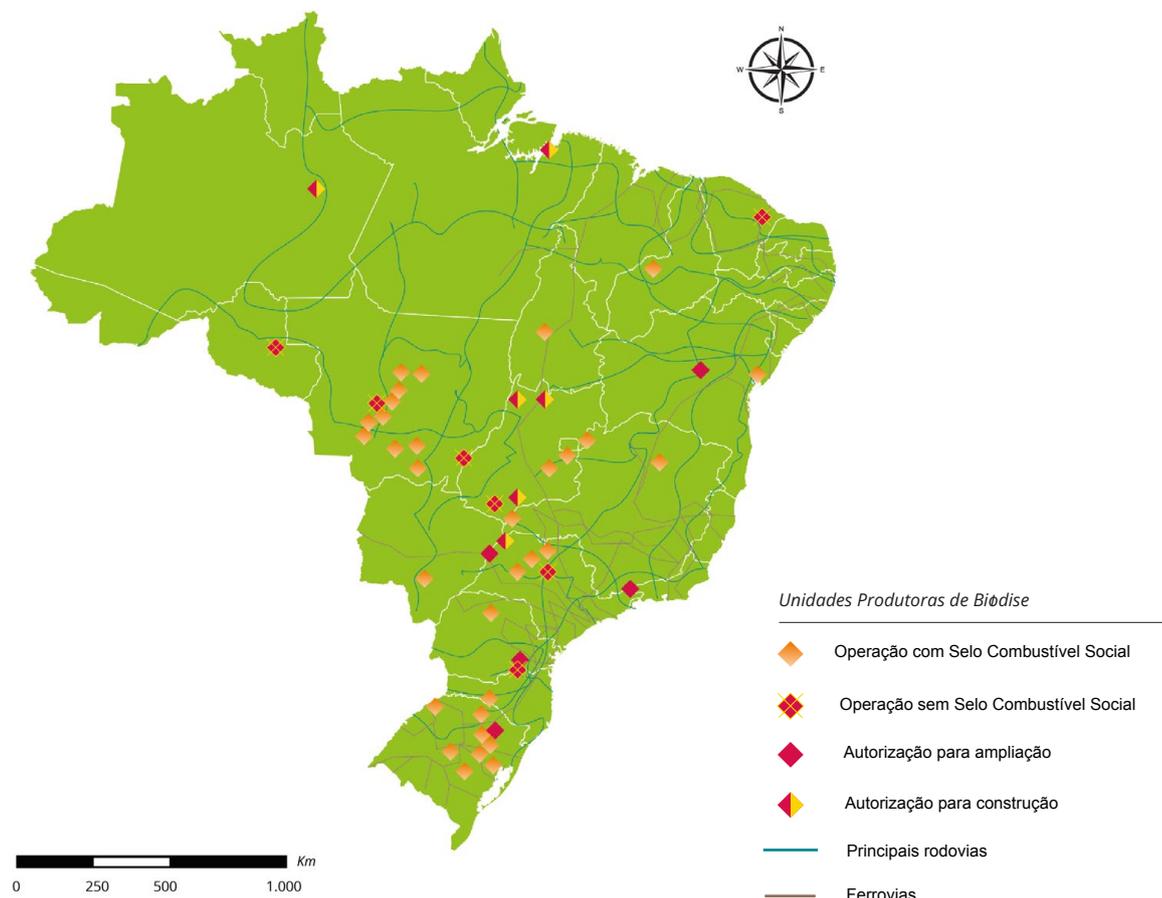
Contudo, a produção é muito concentrada nas regiões Sul e Sudeste (**Gráfico 6**), sendo que a primeira produz metade do biodiesel brasileiro. Há potencial para diversificar o processamento de biodiesel no país, visto que as usinas do biocombustível autorizadas EPE encontram-se bem distribuídas nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (**Gráfico 7**).

Gráfico 6. Participação regional na produção de biodiesel em 2021



Fonte: ABIOVE 2021

Gráfico 7. Produtores de biodiesel autorizados em 2020



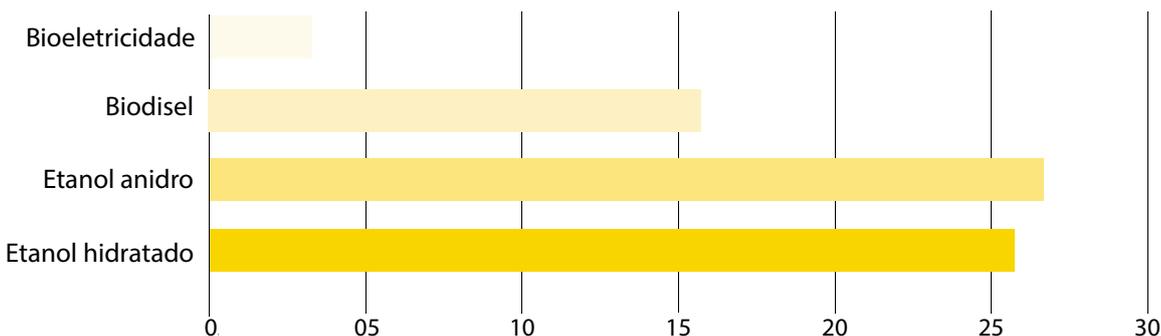
Fonte: MME-EPE (2020)

O desafio que se apresenta neste cenário será diversificar as fontes de matérias-primas para aproveitar áreas degradadas ou subutilizadas, reduzir o risco dos investimentos no negócio, maximizar os ganhos por meio do consorciamento entre macaúba e outras palmáceas com a pecuária extensiva e promover aumento de renda para pequenos produtores e a agricultura familiar. Diferentes razões justificam a necessidade de diversificação do mix de matérias-primas e a melhor distribuição dessas usinas no território brasileiro. O motivo mais relevante é a redução do risco do não cumprimento da obrigatoriedade de substituição dos combustíveis fósseis. Em 2020 e 2021, por exemplo, a alta no preço da soja decorrente de maior demanda do mercado internacional pela oleaginosa levou o governo a diminuir o percentual de biodiesel na mistura com o diesel. Foram quatro reduções entre janeiro e setembro de 2021, que baixaram de 13% para 10% a parcela de biodiesel misturada no diesel.

Um segundo motivo é que a expansão da utilização do biodiesel contribui com a redução de emissões de CO₂, em linha com o compromisso assumido pelo Brasil no Acordo de Paris. A adição de biodiesel ao diesel evitou a emissão de 16,5 milhões de toneladas de CO₂ em 2019¹⁷, quantidade significativa quando se considera que ela equivale a 61% dos 27,1 milhões de toneladas de CO₂ evitados em virtude da mistura de álcool anidro na gasolina. Somando todos os biocombustíveis, o Brasil poupou a emissão de 69,9 milhões de toneladas de CO₂ em 2019 (**Gráfico 8**).

Gráfico 8. Emissões de GEE evitadas com biocombustíveis em 2019

Em Mt CO₂ eq



Fonte: EPE, 2019

Para simular a demanda futura por biodiesel, consideramos as projeções do PDE 2030, o qual estimou que a demanda por biodiesel será de 11,5 bilhões de litros em 2030.

Se essa demanda continuar sendo atendida em 70% pela soja, seriam necessários 7,45 milhões de toneladas de óleo de soja, considerando a produção média de 1.081 litros de biodiesel por tonelada de óleo de soja. O volume resultaria do processamento de 39 milhões de toneladas de grãos da oleaginosa, colhidos em uma área de 11 milhões de hectares, supondo uma produtividade de 3,5 toneladas por hectare.

¹⁷(EPE, 2020).

Porém, apenas 2 milhões de hectares seriam necessários para suprir a demanda, caso essa produção de biodiesel decorresse da macaúba¹⁸. Para esse cálculo, foi usado o dado conservador da produtividade publicada pela pesquisa que é de 4.000 litros de óleo por hectare. Salientamos que essa seria a área necessária para atender apenas ao percentual de 15% de biodiesel conforme estabelecido na Resolução CNPE 16/2018.

Diesel verde

É possível, ainda, diversificar a oferta de biocombustíveis com produtos tais como o diesel verde, também conhecido como diesel renovável ou pela expressão em inglês *green diesel*, distinto do biodiesel de base éster. Embora quimicamente semelhante ao diesel mineral, o diesel renovável possui origem vegetal ou animal, podendo substituir o diesel fóssil integralmente (uso puro) ou parcialmente. É compatível com as tecnologias veiculares, uma vez que não possui contaminantes metálicos.

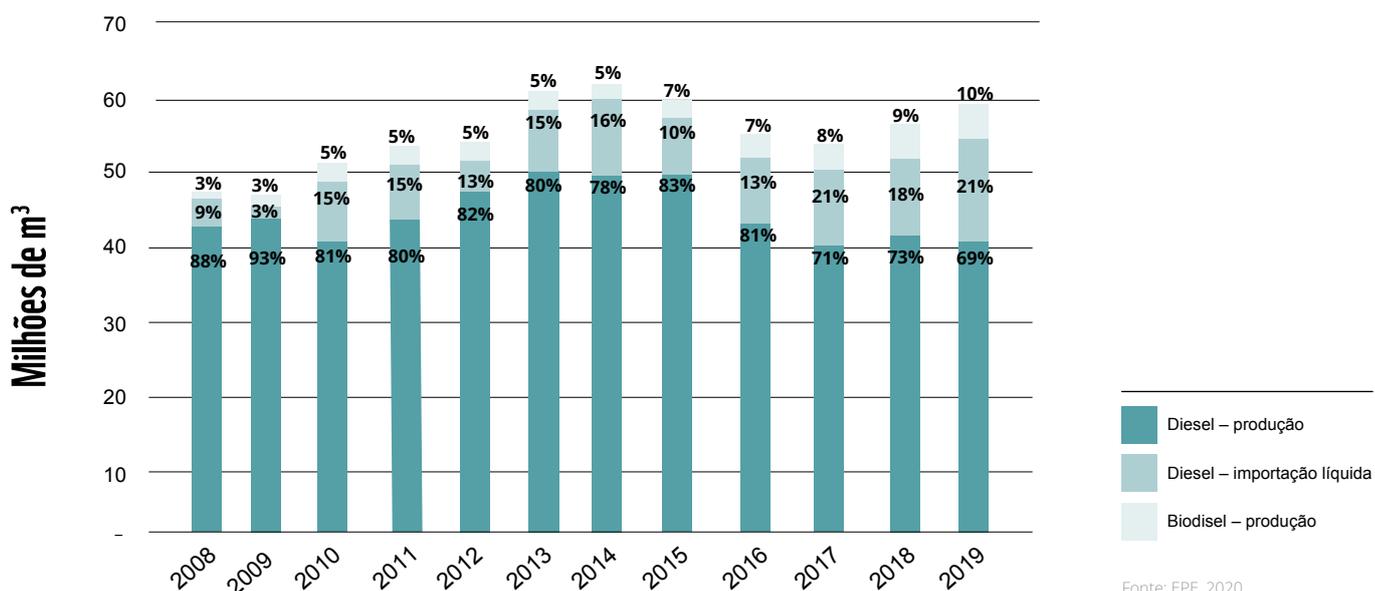
O diesel renovável, apesar de inédito no Brasil, é utilizado na Europa e nos Estados Unidos. Ele é o terceiro biocombustível mais produzido no mundo¹⁹, ainda que com volumes modestos: em 2019, foram produzidos 6,5 bilhões de litros, contra 47 bilhões de litros de biodiesel.

No início de 2022, o diesel consumido no Brasil possuía 10% de conteúdo renovável, proveniente do biodiesel de base éster misturado ao diesel mineral. Há uma proposta em discussão para que o diesel renovável também possa ser misturado ao diesel mineral, contribuindo para o atendimento dos requisitos de emissões da fase P8 do Proconve. A nova etapa do programa será introduzida no decorrer de 2022 e 2023, exigindo os mesmos limites de emissões vigentes nos Estados Unidos e Europa.

Um dos tipos de diesel renovável é o HVO (Hydrotreated Vegetable Oil, ou óleo vegetal hidrotratado), derivado da hidrogenação de óleo residual, de soja e de palma e gordura animal, entre outros. O HVO apresenta maior estabilidade de armazenamento e pode ser usado em motores a diesel sem os limites de percentual de mistura como requeridos pelo éster de ácidos graxos (biodiesel).

Segundo a EPE e a ANP, o Brasil vem desde 2016 aumentando gradativamente a importação de diesel para completar o abastecimento do mercado interno (**ver Gráfico 9**). A participação do diesel importado atingiu 21% do diesel total consumido em 2019, ultrapassando a marca de 13 bilhões de litros, recuando para quase 12 bilhões de litros em 2020, de acordo com a ANP.

Gráfico 9. Produção e importação de diesel



¹⁸ Esses cálculos foram feitos com base nos indicadores levantados pelos autores e considerando produção de macaúba em área consorciada com pastagens.

¹⁹ (REN21, 2020).

Se substituísse totalmente o diesel importado por diesel renovável, o país pouparia gastos em torno de R\$ 24 bilhões em divisas a preços de 2021 e praticamente dobraria a economia, caso o preço do barril de diesel saltasse a US\$ 100 em 2030, segundo previsão da EPE.

Para produzir esses 12 bilhões de litros de diesel verde (equivalente ao diesel importado em 2020), seriam necessários pouco mais de 6 milhões de hectares para o plantio de macaúba. A troca integral de diesel fóssil por renovável em 2030 expandiria para 26 milhões de hectares a superfície cultivada com macaúba.

Combustível para aviação

A indústria da aviação comprometeu-se zerar as emissões líquidas de gases de efeito estufa (GEE) até 2050. Os combustíveis sustentáveis para aviação (conhecidos por sua sigla em inglês, SAF), caso do bioquerosene de aviação (BioQAV), constituem o fator mais relevante no conjunto de medidas para reduzir as emissões do setor, que também incluem desenvolvimento tecnológico e melhorias operacionais²⁰.

Além de estabelecer padrões de qualidade e critérios de sustentabilidade para caracterizar um produto como SAF, a Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO, na sigla em inglês) fomenta o desenvolvimento de combustíveis sustentáveis para a aviação²¹ e apoia seus países-membros na formulação de planos de ação para diminuir as emissões de CO₂ da aviação internacional.

No Brasil, há iniciativas que incentivam a pesquisa, o desenvolvimento industrial e o mercado dos biocombustíveis para aviação, a exemplo da Rede Brasileira de Bioquerosene e

Hidrocarbonetos Renováveis para Aviação (RBQAV) e das Plataformas Mineira e da Zona da Mata de Bioquerosene e Renováveis.

Na esfera legislativa, foi promulgada em novembro de 2021 a Lei nº 14.248/2021, criando o Programa Nacional do Bioquerosene para incentivar a pesquisa e o fomento da produção de energia à base de biomassa, visando à sustentabilidade da aviação brasileira a partir de tecnologias limpas.

A produção mundial dos SAF saltou de menos de 1 milhão de litros em 2015 para 7 milhões de litros a partir de 2016, após a adoção do Acordo de Paris, em dezembro de 2015, quando os compromissos de corte nas emissões de GEE foram comunicados à ONU pelos países integrantes do tratado. Desde então, a produção vem crescendo significativamente. Em 2019, no seminário organizado pela ICAO sobre combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), os participantes concluíram que já existe capacidade de produção para os próximos anos de até 8 milhões de litros. Entretanto, os planos do setor aéreo são ainda mais ambiciosos. A Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB)²² afirma que as empresas aéreas efetuaram acordos de compra (offtakes) somando mais de 6 bilhões de litros e a procura por combustível para aviação aumenta de 1,5% a 3% ao ano.

Em 2040, a demanda global de combustível para aviação estimada pela ICAO deverá alcançar 533 bilhões de litros²³. Num cenário em que o Brasil produza SAF para atender 12% dessa demanda²⁴, seria preciso ampliar sua produção para 64 bilhões de litros nas próximas duas décadas, o que implicaria expandir para 43 milhões de hectares o cultivo de oleaginosas destinadas ao processamento de biocombustíveis.

²⁰ (ZUCKERMAN; QUIQLEY; MACFARLANE 2015).

²¹ (ICAO, 2017).

²² (RSB, 2020).

²³ (ICAO, 2017).

²⁴ Em proporção equivalente à participação atual do Brasil na produção mundial de biodiesel.

05.

ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA PLANTIO DE MACAÚBA

A recuperação de pastagens degradadas no Brasil evoluiu positivamente nos últimos 20 anos, segundo dados do Mapbiomas²⁵. Ao analisar 35 anos de imagens de satélite – entre 1985 e 2020 – o Mapbiomas constatou uma queda nas áreas com sinais de degradação de 70% em 2000 para 53% em 2020. No caso das pastagens severamente degradadas, houve redução ainda mais significativa: representavam 29% das pastagens em 2000 (46,3 milhões de hectares), declinando para 14% (22,1 milhões de hectares). A melhora foi identificada em todos os biomas. Apresentaram maior retração nas áreas severamente degradadas Amazônia (60%), Cerrado (56,4%), Mata Atlântica (52%) e Pantanal (25,6%).

Como relatado anteriormente, a macaúba possui potencial de recuperar áreas degradadas e melhorar a retenção de água no solo. Observando o mapa de evolução da qualidade das pastagens, a análise elaborada para esta publicação identificou quatro áreas prioritárias para o plantio da macaúba, a partir dos seguintes critérios:

- Infraestrutura de acesso – estradas e proximidade de centros consumidores;
- Maior probabilidade de interesse dos produtores rurais pelo projeto de cultivo dessa palmeira.

Tabela 3. Municípios das áreas prioritárias

Região	Municípios		
(1) MS – Sudoeste	Aquidauana	Miranda	Porto Murtinho
	Bela Vista	Nioaque	Rio Negro
	Bonito	Dois Irmãos	Rochedo
	Caracol	Guia Lopes Da Laguna	Sidrolândia
	Corguinho	Maracaju	Terenos
(2) MS Leste – GO Sul	Água Clara	Itarumã	Paranaíba
	Anaurilândia	Jataí	Quirinópolis
	Aparecida do Taboado	Nova Andradina	Ribas do Rio Pardo
	Aporé	Cassilândia	Santa Rita do Pardo
	Brasilândia	Chapadão do Sul	Selvíria
	Cachoeira Alta	Inocência	Serranópolis
	Caçu	Itajá	Três Lagoas

²⁵ (MAPBIOMAS, 2021).

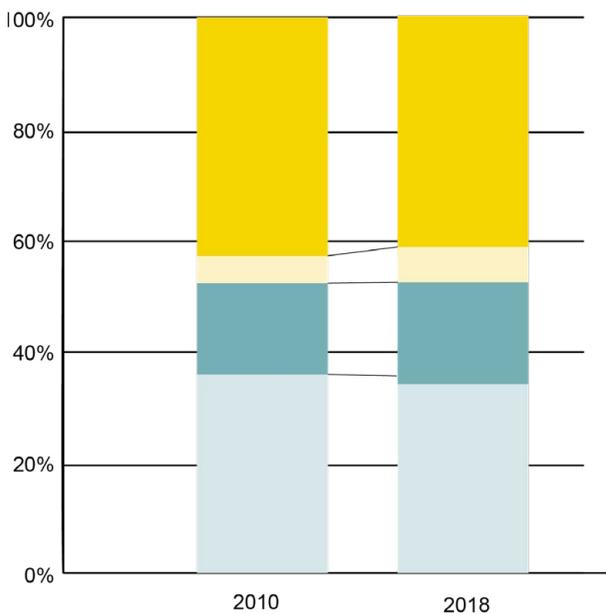
<i>Região</i>	<i>Municípios</i>			
(3) Goiás	Abadiânia	Goianápolis	Nova Veneza	
	Adelândia	Goianésia	Palmeiras De Goiás	
	Americano Do Brasil	Goianira	Palminópolis	
	Anápolis	Goiás	Paraúna	
	Anicuns	Guapó	Petrolina De Goiás	
	Aparecida De Goiânia	Heitoraí	Piracanjuba	
	Araçu	Hidrolândia	Pirenópolis	
	Aragoiânia	Indiara	Pontalina	
	Avelinópolis	Inhumas	Professor Jamil	
	Avelinópolis	Ipiranga De Goiás	Rubiataba	
	Bela Vista De Goiás	Itaberaí	Sanclerlândia	
	Bonfinópolis	Itaguari	Santa Bárbara De Goiás	
	Brazabrantes	Itaguaru	Santa Isabel	
	Caldazinha	Itapaci	Santa Rosa De Goiás	
	Campestre De Goiás	Itapuranga	Santo Antônio De Goiás	
	Caturai	Itauçu	São Luís De Montes Belos	
	Ceres	Jandaia	São Luiz Do Norte	
	Cezarina	Jaraguá	São Patrício	
	Corumbá De Goiás	Leopoldo De Bulhões	Senador Canedo	
	Damolândia	Morro Agudo De Goiás	Trindade	
	Edealina	Mossâmedes	Turvânia	
		Edéia	Nazário	Uruana
		Firminópolis	Nerópolis	Varjão
	(4) Mato Grosso	Água Boa	Juscimeira	Poxoréu
		Barra Do Garças	Nossa Senhora Do Livramento	Ribeirão Cascalheira
		Cáceres	Nova Xavantina	Rondonópolis
		Campinápolis	Novo São Joaquim	Santa Rita Do Trivelato
		Campo Verde	Paranatinga	Santo Antônio Do Leverger

Região 1 (Mato Grosso do Sul - sudoeste)

Não diminuiu a cobertura vegetal nativa, áreas de pastagens foram convertidas para lavouras e houve recuperação de 14% das pastagens degradadas. É uma região potencialmente vocacionada a introduzir uma nova cultura como a macaúba.

Gráfico 10. Região MS sudoeste

Em hectare (ha)



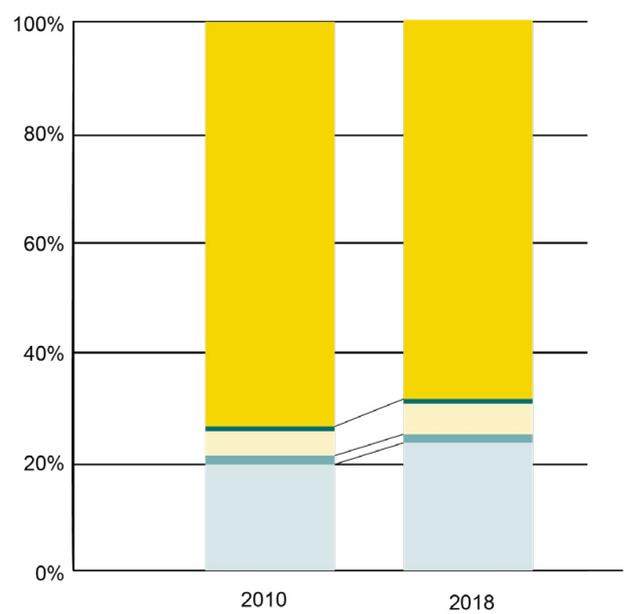
Uso do Solo	2010	2018
Pastagens	3.443.513	3.275.156
Mosaico	2.915	3.017
Agricultura	447.705	714.139
Natural ã Ftal	1.186.175	1.131.193
Floresta	2.868.101	2.820.688

Região 2 (Mato Grosso do Sul leste - Goiás sul)

Cresceu a área de cobertura vegetal com florestas plantadas para abastecer uma nova fábrica de celulose na região. Também houve expansão da área agrícola – dois novos empreendimentos diminuíram o espaço das pastagens e ocuparam extensões de pastos degradados.

Gráfico 11. Região MS leste - GO sul

Em hectare (ha)



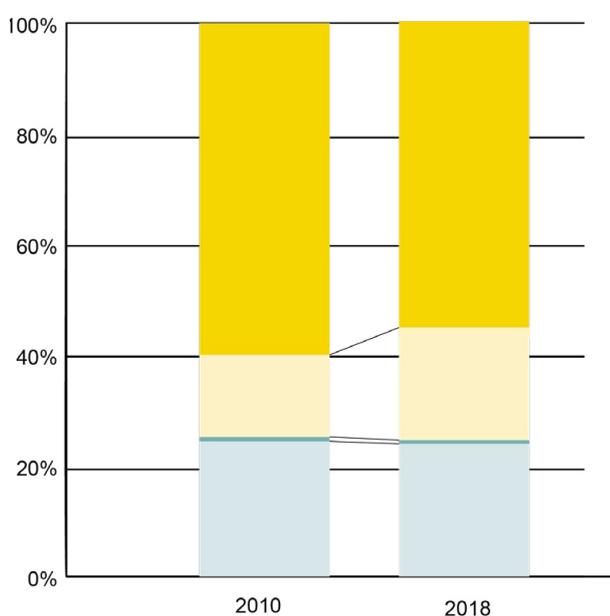
Uso do Solo	2010	2018
Pastagens	7.488.075	6.820.947
Mosaico	65.794	56.034
Agricultura	612.211	943.889
Natural ã Ftal	260.241	261.918
Floresta	2.173.939	2.503.884

Região 3 (Goiás)

A agricultura ganhou mais espaço, sem encolher a superfície coberta por vegetação nativa. O avanço das lavouras ocorreu em detrimento das pastagens, inclusive de sua porção degradada.

Gráfico 12. Região Goiás

Em hectare (ha)



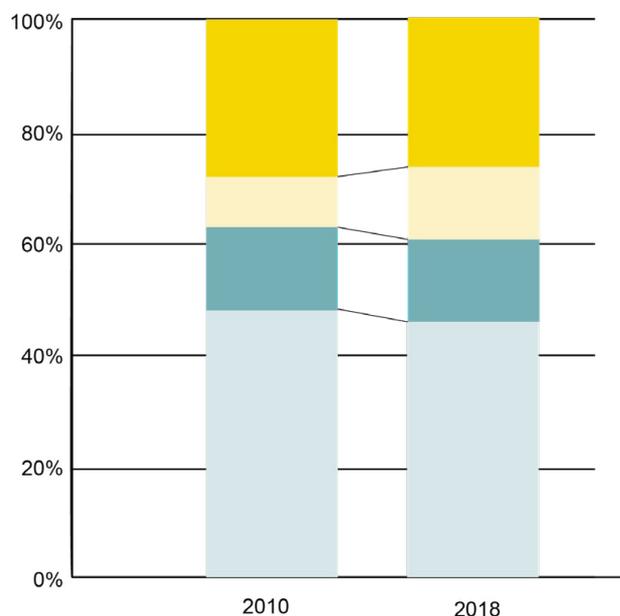
Uso do Solo	2010	2018
Pastagens	2.728.621	1.111.214
Agricultura	504.748	805.127
Natural ã Ftal	66.832	60.818
Floresta	1.135.795	1.111.214

Região 4 (Mato Grosso)

Diminuiu a cobertura vegetal nativa em 340 mil hectares e a área de pastagens em 350 mil hectares (inclusive pastos degradados), ampliando a superfície ocupada pela agricultura.

Gráfico 13. Região Mato Grosso

Em hectare (ha)



Uso do Solo	2010	2018
Pastagens	4.789.786	7.898.873
Agricultura	1.578.817	2.298.561
Natural ã Ftal	2.611.242	2.569.626
Floresta	8.239.607	7.898.873

Em comum, todas as regiões citadas apresentam elevado potencial de interesse pela introdução de uma nova cultura que contribua com a recuperação de pastagens.

06.

VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DA MACAÚBA EM REGIME CONSORCIADO

O estudo considerou três formatos de produção da macaúba: em sistema integrado LPF, como espécie nativa em áreas de reserva legal a serem recuperadas e em monocultura. Dentre eles, o sistema LPF é o que apresentou melhor equilíbrio entre benefícios socioambientais e atratividade ao produtor. Dessa maneira, elaborou-se uma análise do fluxo de caixa para estimar a viabilidade econômico-financeira na sua produção, um aspecto fundamental para se avaliar a capacidade de oferta em grande escala da macaúba para produção de biocombustíveis.

Foram considerados custos médios para atividades típicas e adotadas estimativas conservadoras para valores com maior incerteza. Os valores dos produtos básicos do sistema ILPF encontram-se a seguir. As demais premissas encontram-se no anexo.

A análise do fluxo de caixa estimou a taxa interna de retorno (TIR) operacional em 11,52% a.a., antes dos impostos, e em 4,63% a.a., incluindo os impostos. Esses cálculos admitem uma inflação nula, situação em que não há reajuste de custos nem de preços.

Se for considerada uma inflação de 10% a.a., a TIR operacional obtida é de 22,68% a.a., e de 15,78% após impostos. É importante ter em vista que essa é uma estimativa onde admite-se que tanto custos quanto preços dos produtos variam uniformemente, algo improvável na realidade.

Entre as análises de sensibilidade possíveis, é interessante observar como a TIR varia frente aos preços dos créditos de carbono:

<i>Produto</i>	<i>Valor</i>	<i>Preço do crédito de carbono (R\$/ton)</i>	<i>TIR operacional (% a.a. - inflação zero)</i>
Macaúba	R\$ 200,00/ton	10,00	11,52
Gado	R\$ 318,00/@	15,00	13,19
CO ₂ removido	R\$ 10,00/ton	20,00	14,90
Milho	R\$ 1.604,00/ton	25,00	16,65

Nota-se que um a venda de créditos de carbono por um valor da ordem de US\$ 5,00/ton, uma perspectiva considerada conservadora por especialistas que lidam com mercados de carbono, é possível obter TIR superior a 16,65% ao ano.

07.

CONCLUSÕES

A ampliação da oferta de biocombustíveis sustentáveis pode ser atendida sem a ocupação de novas áreas por meio da adoção da macaúba em regimes consorciados em pastagens degradadas ou subutilizadas. Essa estratégia tem o benefício de promover a diversificação de produtos e conseqüentemente a resiliência econômica das propriedades ao mesmo tempo em que aumenta o provimento de serviços ecossistêmicos.

A macaúba é a espécie de menor risco técnico e econômico entre as candidatas a fornecer matéria-prima à produção de biodiesel e bioquerosene, dado que estão bem adiantadas as pesquisas sobre a cultura, já objeto de muitos pequenos projetos em andamento. Ela pode ser cultivada amplamente no Cerrado, principalmente consorciada com pastagens extensivas, alcançando produtividade satisfatória. As pesquisas indicaram também que a tendência é de elevação na produtividade das pastagens, visto que a macaúba contribui para a melhoria da estrutura do solo, o aumento da infiltração da água pluvial e a retenção de água em decorrência de seu sistema radicular.

Além do biodiesel e bioquerosene, é possível produzir tortas e rações de excelente qualidade para a alimentação animal, produtos alimentícios, farmacêuticos e cosméticos diversos. Desse modo, a macaúba pode contribuir para introduzir a agroindústria em regiões com economia pouca dinâmica e elevados indicadores de pobreza, promovendo geração de renda e empregos.

A viabilidade econômico-financeira da adoção da macaúba em regimes consorciados é altamente influenciada pelo carbono capturado e pelo valor auferido com ele. Por essa razão, a macaúba torna-se cada vez mais atrativa à medida que os mercados de carbono voluntários e obrigatórios se consolidam.

Por contribuir com a recuperação de áreas degradadas e melhorar serviços ecossistêmicos ao mesmo tempo em que supre diversas indústrias e aumenta a resiliência do produtor, deve-se avaliar ações para incentivar a produção e consolidar as cadeias que utilizam a macaúba.



08.

ANEXO

Planejando o fluxo financeiro do produtor de macaúba

A Atrium Forest Consulting elaborou para esta publicação uma planilha Excel para auxiliar o produtor a planejar o fluxo de caixa do produto macaúba. A planilha considera na receita do produtor os recursos advindos da venda do fruto de macaúba, do gado, do milho e dos créditos de carbono e foi preparada para uso por produtores integrados ou não a uma indústria processadora de óleo voltado à produção de biodiesel.

Tabela 4. Estimativa de custo de produção da macaúba na zona da Mata Mineira

Macaúba - Estimativa de custo de produção unitário em R\$ por ha

		Período	Cachos	Kg/Cacho	Kg/Planta	Total/ha	
Nível tecnológico mediano		Ano 1	-	-	-	-	
Espaçamento: 5 x 5 = 400 plantas/ ha		Ano 2 ao 4	-	-	-	-	
Região referencial: Zona da Mata, MG		ano 5 ao 10	3,5	12	41	16,380	
Solo referencial: Latossolo		> 11 anos	3,5	18	61	24,500	
Módulo: 5 ha							

Descrição	Especificação	VU (R\$)	Implatação Ano 1		Formação Ano 2 ao 4		Produção Crescente Ano 5 ao 10		Produção Estável Ano 11 ao 30	
			total		Qtde total		Qtde total		Qtde total	
A - Operações mecanizadas										
A1 - Preparo do solo										
Covenamento	motocova	5,00	8,00	40,00						
A2 - Implantação										
Distribuição de mudas	HM Tp75cv+car.	50,00	2,00	100,00						
A3 - Tratos Culturais										
Adubação (2x)	HM Tp75cv+car.	50,00	2,00	100,00	1,00	50,00	50,00	50,00	1,00	50,00
A4 - Colheita										
Transporte	HM Tp75cv+car.	50,00					3,00	150,00	4,00	200,00
Subtotal A			240,00		50,00		200,00		250,00	
B - Operações manuais										
B1 - Preparo do solo										
Controle Formiga (4x)	Homem-dia	40,00	1,00	40,00						
Roçada	Homem-dia	40,00	1,00	40,00						
Prep. Est./demar.covas	Homem-dia	40,00	1,00	40,00						
Coroamento	Homem-dia	40,00	2,00	80,00						
Distribuição de mudas	Homem-dia	40,00	3,00	120,00						
Coveamento+adubação	Homem-dia	40,00	5,00	200,00						
Plantio	Homem-dia	40,00	1,00	40,00						
B2 - Tratos culturais										
Coroamento Herb. (2x)	Homem-dia	40,00	2,00	80,00	2,00	80,00	2,00	80,00	2,00	80,00
Poda de folhas	Homem-dia	40,00					1,00	40,00	1,00	40,00
Adubação (2x)	Homem-dia	40,00	2,00	80,00	2,00	80,00	2,00	80,00	2,00	80,00

Descrição	Especificação	VU (R\$)	Implatação Ano 1		Formação Ano 2 ao 4		Produção Crescente Ano 5 ao 10		Produção Estável Ano 11 ao 30	
B3 - Colheita										
Colheita	R\$/tonelada	40,00					7	262,08	10	392,00
Subtotal B			720,00		160,00		462,08		592,00	
C - Insumos										
C1 - Fertilizantes										
Calcário	R\$/tonelada	90,00	0,20	18,00			0,20	18,00	0,20	18,00
P: (Fosfato solúvel)	R\$/tonelada	550,00	0,15	88,00	0,08	44,00	0,12	66,00	0,24	132,00
N: (Uréia)	R\$/tonelada	950,00	0,04	38,00	0,08	76,00	0,12	114,00	0,24	228,00
K: (KCl)	R\$/tonelada	1700,00	0,04	68,00	0,08	136,00	0,12	204,00	0,24	408,00
Micronutrientes FTE	R\$/Kg	2,00	10,00	20,00	10,00	20,00	20,00	40,00	30,00	60,00
C2 - Fitossanitários										
Fungicida	R\$/Litro	90,00					1,00	90,00	1,00	90,00
Inseticida	R\$/Litro	90,00					1,00	90,00	1,00	90,00
Fomicida	R\$/Kg	5,00	4,00	20,00	2,00	10,00				
C3 - Herbicidas										
Pós emergente	R\$/Litro	18,00	2,00	36,00	2,00	36,00	2,00	36,00	2,00	36,00
C4 - Mudas										
Mudas 1 ano	R\$/unidade	6,00	400,00	2400,00						
Subtotal C			2688,00		322,00		658,00		1062,00	
D - Adm/Comercializ.										
Projeto	2% Implant.	2,0%	3700	74,00						
Impostos	% receita	2,3%					1,00	64,05	1,00	95,80
Subtotal D			74,00		0,00		64,05		95,80	
Custo Total (A+B+C+D)										
		R\$/ ton	Ano 1		Ano 2 ao 4		Ano 5 ao 10		Ano 11 ao 20	
Custo total	(R\$/ha ano)		3.722,00		532,00		1.384,13		1.999,80	
Receitas*	(R\$/ha ano)	170,00					2.784,60		4.165,00	
Custo médio ton	(R\$/ha ano)	97,94								
Lucro líquido	(R\$/ha ano)		(3.722,00)		(532,00)		1.400,47		2.165,21	

*Preço médio pago pelas indústrias extrativistas de MG (Comparativo: Preço médio da ton. dendê em 2007 = R\$ 160,00 Agrarianal 2008)

** 1 cacho com 260 frutos x 45 gramas cada um = 12Kg

** 1 cacho com 350 frutos x 50 gramas cada um = 18Kg

Todos os valores estão expressos em Reais por ha (R\$/ha)

HM Tp 75cv+carreta = Hora máquina, trator de 76 cv + carreta 4 ton

Homem-dia = Valor da mão-de-obra diária (já inclusos encargos, etc)

No modelo utilizado na planilha, o milho é produzido nos primeiros quatro anos do projeto da macaúba, cujos frutos começam a aparecer no quinto ano. O gado é retirado da área nos primeiros cinco anos. Cabe observar que as remoções de carbono da atmosfera são maiores na fase de crescimento da macaúba (primeiros quatro anos) e que os valores de produtividade da macaúba ainda diferem substancialmente entre as fontes consultadas para esta análise. Foi usada nesta publicação a referência mais conservadora para a produtividade da cultura.

Para o cálculo das despesas, usou-se a rentabilidade média nacional do gado (8,8%) e do milho (25%). As despesas com a colheita da macaúba só se iniciam no quinto ano, quando ela começa a produzir e crescerão em função do aumento da produtividade. A estimativa de produtividade usada na planilha de fluxo de caixa segue a projeção da literatura correlata²⁶. A produção de carne oriunda do gado também só inicia no quinto ano nesse sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (LPF).

Nenhum dispêndio foi considerado para o carbono, em razão da variação dos custos de monitoramento do balanço de carbono e certificação, atividades necessárias para efetivar a geração de créditos.

As despesas com colheita do milho na planilha representam toda a despesa com a cultura. Como o fluxo de caixa é anual, todas as despesas de qualquer maneira deveriam ser somadas em uma única informação. Decidiu-se incluir todas as despesas da cultura anual como uma parte do preço. Para cada tonelada de milho colhida, o gasto médio alcançará R\$ 1.199. A mesma metodologia foi empregada para representar as despesas com o gado neste exercício. Também foram considerados R\$ 10 mil por hectare para o preço da terra e R\$ 500 para seu arrendamento.

Se fosse necessário abastecer uma indústria com produção prevista de 3.500 toneladas de óleo por ano, deveriam ser plantados pelo menos 1.000 hectares, distribuídos em 14 talhões, que podem ser implantados

gradualmente, ao longo de nove anos. Cada talhão possuiria área entre 70 hectares e 80 hectares.

A Taxa Mínima de Atratividade é uma taxa de juros que representa o mínimo que um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento ou o máximo que uma pessoa se propõe a pagar quando faz um financiamento. A taxa de atratividade foi estimada em 5,25%, coincidindo com a taxa Selic no momento do cálculo (agosto de 2021).

As estimativas de produtividade basearam-se em referências que mostravam quantidades mais conservadoras confirmadas por mais de uma fonte. Os valores considerados para os preços da macaúba também foram escolhidos do mesmo modo. Nos casos do milho e do gado, foram usadas as médias nacionais para pecuária extensiva e plantios de milho convencionais. Quanto ao carbono, os preços também foram os menores encontrados nas referências disponíveis.

Na análise sobre o potencial de mercado do biodiesel de macaúba, foram efetuados diferentes exercícios para estimar um fluxo de caixa conservador, mas que cobrisse os custos de produção e assegurasse uma taxa razoável de retorno financeiro para os produtores da espécie.

O fluxo de caixa considera receitas mínimas possíveis para a cultura desconhecida e médias para culturas conhecidas, como o milho. Os custos são os únicos encontrados na literatura, mas que não são diferentes do dispêndio com culturas semelhantes. Portanto, os rendimentos são os mais baixos possíveis para o modelo proposto.

Apesar de a Taxa Interna de Retorno (TIR) operacional ser aceitável, os números também mostram que esse fluxo de caixa mínimo, como proposto no exercício, após várias simulações, só é capaz de pagar os impostos e os investimentos se o preço da terra for inferior a R\$ 3.000 por hectare.

²⁶ (PIMENTEL et al., 2009)

09.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº 20, de 24 de junho de 2013. Regulamenta as especificações dos Querosenes de Aviação Alternativos, e de suas misturas com o Querosene de Aviação (QAV-1). **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 25 jun. 2013. Disponível em: www.anp.gov.br. Acesso em: 10 abr. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. Resolução ANP nº 45, de 25 de agosto de 2014. Regulamenta as especificações do biodiesel. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 ago. 2014. Disponível em: www.anp.gov.br. Acesso em 06 abr. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. **Estatística**. São Paulo, SP: ABIOVE, 2021. Disponível em: <https://abiove.org.br/estatisticas/>. Acesso em: 10 abr. 2021.

BARDIN, L. (2011). **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70.

BATISTA, Cláudia Eliane Dias et al. Monitoring the composition in esters of the biodiesel from the macauba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.) kernel oil put in direct contact with carbon steel and galvanized carbon steel. **Química Nova**, v. 42, p. 387-396, 2019.

BICALHO, Elisa Monteze et al. Do the structures of macaw palm fruit protect seeds in a fire-prone environment?. **Acta Botanica Brasilica**, v. 30, p. 540-548, 2016.

BRASIL. Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nos 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 14 jan. 2005. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em 06 abr. 2021.

BRASIL. Lei nº 13.263, de 23 de março de 2016. Altera a Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014, para dispor sobre os percentuais de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado no território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 março. 2016. Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em 06 abr. 2021.

CORRÊA, João Batista Lúcio et al. Surface runoff of rainfall in an experimental plantation of macaúba palm (*Acrocomia aculeata*) under different forms of management. **Revista Árvore**, v. 42, 2018.

DA SILVA CÉSAR, Aldara et al. The prospects of using *Acrocomia aculeata* (macaúba) a non-edible biodiesel feedstock in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 1213-1220, 2015.

DE CARVALHO LOPES, Daniela et al. Economic feasibility of biodiesel production from Macauba in Brazil. **Energy Economics**, v. 40, p. 819-824, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Análise de conjuntura dos biocombustíveis ano 2019**. Brasília, DF: EPE, 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-489/Analise_de_Conjuntura_Ano_2019.pdf. Acesso em: 16 fev. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano decenal de expansão de energia 2019**. Brasília, DF: EPE, 2010. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-52/topico-89/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202019.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2021.

- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano decenal de expansão de energia 2030**. Brasília, DF: EPE, 20. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf. Acesso em: 16 fev. 2021.
- EVARISTO, Anderson Barbosa et al. Harvest and post-harvest conditions influencing macauba (*Acrocomia aculeata*) oil quality attributes. **Industrial Crops and Products**, v. 85, p. 63-73, 2016.
- GUATIMOSIM, Eduardo; PINTO, Henrique Jorge; BARRETO, Robert Weingart. *Passalora acrocomiae* sp. nov. and *Exosporium acrocomiae* from the palm *Acrocomia aculeata* in Puerto Rico. **Mycotaxon**, v. 122, n. 1, p. 61-67, 2013.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANISATION. **Sustainable Aviation Fuels Guide**. ICAO, 2017. n. December, p. 23–24, 2017.
- MAIA, Artur Campos Dália et al. Chemical ecology of *Cyclocephala forsteri* (Melolonthidae), a threat to macauba oil palm cultivars (*Acrocomia aculeata*, Arecaceae). **Journal of Applied Entomology**, v. 144, n. 1-2, p. 33-40, 2020.
- MAPBIOMAS. Pastagens brasileiras ocupam área equivalente a todo o estado do Amazonas. MapBiomass, 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org/pastagens-brasileiras-ocupam-area-equivalente-a-todo-o-estado-do-amazonas>. Acesso em: 16 fev. 2021.
- MOREIRA, Sandro LS et al. Intercropping of coffee with the palm tree, macauba, can mitigate climate change effects. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 256, p. 379-390, 2018.
- MURDOCK, Hannah E. et al. Renewables 2020-Global status report. 2020.
- PIMENTEL, Leonardo Duarte et al. Effect of nitrogen and potassium rates on early development of macaw palm. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1671-1680, 2015.
- PIMENTEL, L. D. et al. Estimativa de custo de produção e viabilidade econômica do cultivo da palmeira macaúba (*Acrocomia aculeata*) para produção de óleo vegetal. **61 Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Gorduras e Biodiesel**, 2009.
- RAMOS, F. A. et al. Oviposition and predation by *Speciomerus revoili* (Coleoptera, Bruchidae) on seeds of *Acrocomia aculeata* (Arecaceae) in Brasília, DF, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 61, n. 3, p. 449-454, 2001.
- ROSA, Bruno Luan; SOUZA, João Paulo; PEREIRA, Eduardo Gusmão. Increased atmospheric CO₂ changes the photosynthetic responses of *Acrocomia aculeata* (Arecaceae) to drought. **Acta Botanica Brasilica**, v. 33, p. 486-497, 2019.
- ROUNDTABLE ON SUSTAINABLE BIOMATERIALS. **Decarbonising Aviation: The Sustainable Way Forward**. RSB, 2020. Disponível em: https://rsb.org/wp-content/uploads/2020/06/RSB-Aviation-Report-WEB_Final.pdf. Acesso em: 16 fev. 2021.
- SCHLICKMANN-TANK, José Arturo et al. Detección y variación temporal de *Rhynchophorus palmarum* (Linnaeus)(Coleoptera: Dryophthoridae) en cultivos de *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart. en Itapúa, Paraguay. **Revista chilena de entomología**, v. 46, n. 2, p. 163-169, 2020.
- VIEIRA, José Sebastião C. et al. Esterificação e transesterificação homogênea de óleos vegetais contendo alto teor de ácidos graxos livres. **Química Nova**, v. 41, p. 10-16, 2018.
- ZUCKERMAN, S.; QUIGLEY, E. V.; MACFARLANE, R. Toward sustainable aviation fuels: A primer and state of the industry. 2015.

