



CAPÍTULO 12

Nanotecnologia e IA na Bioeconomia Amazônica: Impulsionando a Agenda 2030 na Valorização Sustentável de Lipídios

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.21825090912>

João Pedro Miranda Caetano

Lohara Silva de Lima Barboza

Jéssica de França Sousa

Ramon Tiago Albuquerque Andrade

Luísa Schuh

Eliana Fortes Gris

Nicole Santana Alves

Brenda Martins dos Santos

Verônica Carvalho de Lima

Thalita do Espírito Santo Alves

Pedro Henrique Almeida Jesus da Rocha

Leonardo Froes de Azevedo Chang

Lilian Cristina dos Santos

Sônia Nair Báo

Victor Carlos Mello

Mapa-sistema da Bioeconomia Amazônica (Visão 2030)

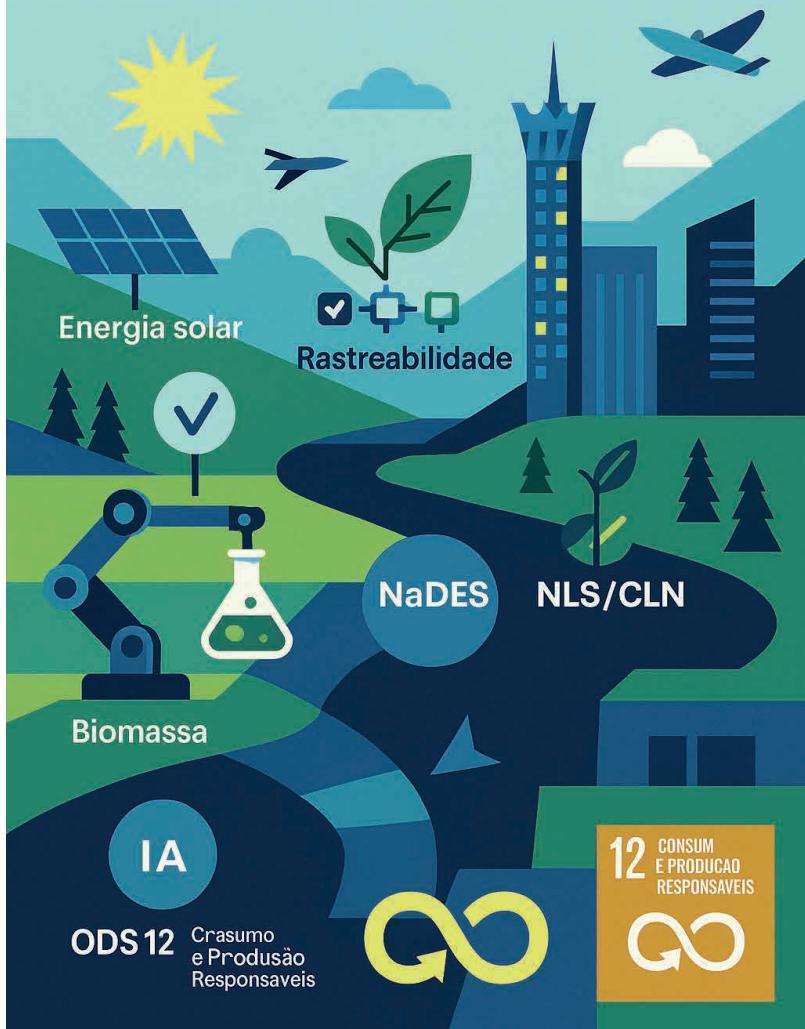


Figura 1: Fluxo integrado da cadeia: biomassa → extração verde com nades → formulação em nls/cln → produtos, apoiado por energia solar, rastreabilidade digital e inteligência artificial. Ilustra alinhamento a ods 12 e às missões 2/5 da nib.

INTRODUÇÃO

A revolução da nanotecnologia tem redesenhado, de maneira interdisciplinar, os alicerces da segurança e conservação de alimentos, oferecendo sistemas que estendem a vida útil dos produtos enquanto mantêm suas propriedades sensoriais e nutricionais (COLE *et al.*, 2018). Com a demanda global alimentícia projetada para crescer mais de 70 % até 2050, a redução de perdas pós-colheita e a garantia de condições ideais de suprimento tornam-se imperativos para a sustentabilidade do sistema alimentar (ANGLE, 2019).

No âmbito da Agenda 2030, o Objetivo 12 destaca a urgência de padrões de consumo e produção responsáveis, estimulando a transição para modelos circulares que valorizem cadeias locais e minimizem o uso de insumos virgens (ONU, 2015). Nesse contexto, a bioeconomia aplicada à Amazônia revela lipídios nativos — como óleo de pracaxi, manteigas de cupuaçu e bacuri — cuja extração verde por solventes eutéticos profundos (DES/NaDES) reduz em até 60 % o consumo energético frente a métodos convencionais, favorecendo a geração de matérias-primas renováveis e de baixo impacto ambiental (SONG; MA, 2025).

A convergência entre inteligência artificial (IA) e aprendizado de máquina (AM) aceleram a descoberta orientada por dados de formulações ideais, permitindo prever *in silico* parâmetros críticos de estabilidade coloidal, eficiência de encapsulamento e perfis de liberação controlada, antes mesmo de iniciar experimentos laboratorialmente dispendiosos WANG *et al.*, 2021; LI *et al.*, 2022). Ao emparelhar simulações de dinâmica molecular e modelagem farmacocinética com algoritmos de otimização bayesiana e aprendizado por reforço, é possível refinar protocolos de síntese — desde homogeneização de alta pressão até microemulsões em ciclo frio — equilibrando desempenho técnico e pegada de carbono (GAO *et al.*, 2021).

Além da formulação, as **embalagens inteligentes** com nanossensores monitoram em tempo real variações de temperatura, umidade e indicadores gasosos de maturação, garantindo rastreabilidade blockchain e reduzindo perdas na cadeia logística (TROLLMANN; BÖCKMANN, 2022). Na fase agrícola, nanoatributos de fertilizantes de liberação lenta e bioinseticidas encapsulados em matrizes lipídicas oferecem controle de pragas de forma seletiva, enquanto nanosensores de solo ajustam automaticamente regimes de irrigação e adubação, conferindo resiliência climática e regularidade de oferta (COLE *et al.*, 2018).

Entretanto, a escalabilidade dessas inovações depende também da **sustentabilidade da infraestrutura de IA**. O intenso consumo de energia e água em data centers podem neutralizar ganhos de circularidade; por isso, é fundamental adotar arquiteturas de baixo consumo, quantização de modelos e fontes renováveis on-site para assegurar neutralidade de carbono e hídrica (FERRO *et al.*, 2021).

Ao unir o potencial único dos lipídios amazônicos à potência preditiva da IA/AM, abrimos um novo patamar de soluções integradas para o setor alimentício, em que tecnologias inteligentes de conservação atendem simultaneamente aos desafios de qualidade, segurança e sustentabilidade. Neste capítulo, exploraremos esses avanços, discutindo não apenas os princípios de formulação e aplicação de nanoestruturas lipídicas, mas também seus impactos socioambientais e sua contribuição para o Objetivo 12 da Agenda 2030.

A NANOTECNOLOGIA NA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS NA AMAZÔNIA

A floresta amazônica, caracterizada pela sua vasta biodiversidade (GUAYASAMIN *et al.*, 2024) conta com mais de 16 000 espécies arbóreas (LUIZE *et al.*, 2024) que, em sinergia contínua com as demais espécies vegetais e animais, assim como bactérias, fungos e protozoários, contribuem para um vasto sequestro de carbono (FULLER *et al.*, 2025) e para uma regulação do ciclo hídrico (ARRAUT *et al.*, 2012).

A Amazônia sustenta mais de 30 milhões de pessoas em nove países (WWF, 2024), fornecendo meios de subsistência e serviços de alto valor econômico (BERGAMO *et al.*, 2022). O papel altamente valioso em âmbito socioambiental torna urgente conservar e restaurar áreas degradadas, e a nanotecnologia surge como ferramenta promissora para esse fim.

A nanotecnologia surge como ferramenta impulsionadora de métodos de restauração ecológica como a fitorremediação e a biorremediação. Em estudo recente é destacado que as nanopartículas podem acelerar a remoção de compostos tóxicos de solos contaminados, absorvendo compostos e catalisando reações de degradação, reduzindo a dispersão de poluentes (RAJPUT *et al.*, 2022).

Na área de nutrição vegetal, o papel das nanopartículas tem se tornado indispensável para a renovação de florestas nativas degradadas, com os chamados nanoertilizantes. Os fertilizantes em escala nanométrica possibilitam uma liberação controlada de ativos, auxiliam no desempenho de absorção vegetal do nutriente e minimiza perdas por lixiviação e volatilização. Isso permite dentro das regenerações florestais uma produtividade maior, sem grandes necessidades de insumos convencionais, reduzindo também contaminações de água e solo (HAYDAR *et al.*, 2024).

Como a maioria dos projetos de recuperação florestal são baseados em plantio de mudas (GUERRA *et al.*, 2020), é necessário o entendimento da ecofisiologia vegetal das espécies plantadas para atingir uma alta performance de regeneração florestal (COELHO *et al.*, 2023). O desenvolvimento de mudas de espécies nativas a serem destinadas a sítios específicos requer tecnologias que impulsionam a regeneração como os bioestimulantes baseados em nanopartículas de carbono (AZIZ FILHO, 2025).

A utilização de tecnologias para recuperação, preservação e impulsionamento da área da floresta amazônica tem se mostrado representativa nos últimos anos. Há 8 anos, a iniciativa do governo federal em parceria com universidade espanhola visava ao desenvolvimento de IA para monitorar em tempo real a biodiversidade da floresta. Nos tempos atuais o projeto está em sua terceira parte, visando ampliar o monitoramento já realizado para cobrir uma faixa que se inicia nas proximidades da Cordilheira dos Andes até manguezais na costa do Pará, na Foz do Rio Amazonas (BRASIL, 2024).

Outro projeto interessante desenvolvido em rede é o Projeto Integrado da Amazônia (PIAMz). O projeto conta com a parceria de 96 instituições e é gerenciado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), visando corresponder o compromisso firmado em 2018 do “Fundo Amazônia”. Esse compromisso objetiva metas ambiciosas, com um projeto de curto prazo, fora da lógica tradicional do desenvolvimento científico. É uma iniciativa que objetiva à redução do desmatamento e da degradação florestal nos territórios do Bioma Amazônia, através de produção sustentável e geração de tecnologias. O projeto já gerou 2 tecnologias importantes como o Sistema Agrotag VEG, que qualifica e disponibiliza informações técnicas sobre experiências de recomposição de Áreas de Preservação Permanente, Reserva Legal ou de Uso Restrito junto a produtores nos diversos estados. Outro desdobramento tecnológico do projeto é o Sistema Avançado de Monitoramento e Alerta de Fogo que permite acesso a dados de satélites, atualização de mapas, integração de dados levantados em campo, além do envio e recepção de alertas e avisos de incêndios florestais (BRASIL, 2020).

Visando ao uso de nanotecnologia para recuperação de áreas degradadas da Amazônia, o governo federal, através do ministério da ciência, tecnologia e inovação, aliado às parcerias de execução com o Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) e a empresa Krilltech, iniciou em 2022 o programa denominado Nanobiotecnologia para Recuperar Áreas Degradadas da Amazônia (NANORAD's). Esse programa preconiza a necessidade da recuperação das áreas degradadas da Amazônia entrarem em pautas de políticas públicas buscando promover tanto a conservação de seus recursos naturais quanto o desenvolvimento socioeconômico da região norte do país. O objetivo geral do programa consiste na utilização da nanobiotecnologia para potencializar o crescimento de árvores e mudas no campo. A expectativa é tornar as espécies arbóreas mais resistentes aos diversos efeitos negativos das mudanças climáticas e também aumentar a produtividade dos plantios e desenvolvimentos das árvores para a regeneração (BRASIL, 2022).

Como perspectivas futuras, espera-se que a nanotecnologia se consolide ainda mais como vetor de inovação para a restauração e preservação da Amazônia, sobretudo por meio da convergência com outras tecnologias. Além disso, a exploração

de nanomateriais capazes de modular diretamente o microbioma do solo abre possibilidade de acelerar processos de ciclagem de nutrientes. No âmbito político-institucional, a ampliação de linhas de financiamento para inovação sustentável e o fortalecimento de redes colaborativas entre universidades, setor privado e comunidades tradicionais serão cruciais para escalar tecnologias bem-sucedidas em campo-piloto para macrossistemas florestais. Ademais, diante dos cenários de mudanças climáticas e eventos climáticos extremos cada vez mais severos, as futuras iniciativas deverão focar no desenvolvimento em curto a médio prazo de nanossistemas capazes de tornar a biodiversidade de organismos da floresta resilientes aos estresses bióticos e abióticos. Portanto, a jornada pela restauração e conservação da Amazônia se fortalecerá pela união de pesquisa de ponta, políticas públicas inovadoras e participação ativa das populações locais, garantindo resiliência ecológica e justiça socioambiental a longo prazo.



Figura 2: Detalhamento do trecho operacional: pré-processo da biomassa, contato com nades (betaína + ácido málico por exemplo), recuperação do extrato e incorporação em NLS/CLN. a rota reduz solventes fósseis e energia, mantendo rendimento de ativos e viabilizando transferência industrial.

ENFOQUE EM LIPÍDIOS AMAZÔNICOS

A rica biodiversidade da Amazônia oferece uma paleta única de lipídios com perfis de ácidos graxos e fitoquímicos que os tornam insumos de alto valor agregado para o desenvolvimento de nanoestruturas cosmecêuticas sustentáveis. Embora a Amazônia detenha vasto potencial para a geração de produtos de alto valor agregado a partir de sua biodiversidade, esse potencial permanece subaproveitado, especialmente no

que diz respeito à aplicação de tecnologias ambientalmente responsáveis. Cadeias produtivas emblemáticas como a do açaí, ainda enfrentam desafios estruturais: seus resíduos, como sementes e fibras, são frequentemente descartados, mesmo com evidências científicas sobre o valor bioativo que possuem (BARBOSA; CARVALHO JUNIOR, 2022). Para que a valorização dos lipídios amazônicos se alinhe à Agenda 2030 da ONU, é fundamental que ela promova não apenas a inovação técnica, mas também a inclusão produtiva, geração de renda local e valorização dos saberes tradicionais. Iniciativas voltadas à bioeconomia devem contribuir para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 12 (consumo e produção responsáveis), assegurando que as populações amazônicas sejam protagonistas da transformação em seus próprios territórios.

Exemplos históricos e contemporâneos da cadeia produtiva da andiroba ilustram como a articulação entre saber tradicional, inovação tecnológica e inclusão social pode gerar valor real para a bioeconomia amazônica. Desde o início do século XX, fábricas instaladas no Pará processavam sementes de andiroba com equipamentos importados, produzindo sabões, perfumes, talcos e óleos que eram exportados para o Sudeste e a Europa, empregando centenas de trabalhadores locais. Com a valorização recente dos cosméticos naturais, a produção da andiroba ressurge em moldes mais descentralizados, muitas vezes ligados a sistemas agroflorestais comunitários. Seu cultivo e beneficiamento apontam para um modelo produtivo enraizado no território, com potencial para aliar restauração florestal, soberania econômica e conservação ambiental (HOMMA, 2014).

No entanto, reconhecer o potencial dos lipídios amazônicos implica também reconhecer que sua história é marcada por assimetrias. Modelos de desenvolvimento anteriores concentraram os benefícios econômicos fora da região ou em poucos agentes locais, marginalizando comunidades indígenas, ribeirinhas e extrativistas, que historicamente protegem os ecossistemas dos quais esses recursos provêm. Para evitar a reprodução dessas desigualdades, é necessário compreender a bioeconomia não apenas como agenda de inovação, mas como uma oportunidade de transformação socioterritorial, baseada no reconhecimento dos saberes locais e na garantia de condições dignas de permanência no território (CASTRO; ABGAIL; BARBOSA, 2023).

Nesse esforço mais amplo de valorização dos insumos amazônicos, o desenvolvimento de nanoestruturas lipídicas surge como um caminho promissor para ampliar o aproveitamento e o valor agregado desses recursos. Em um mapeamento sistemático de nanoestruturas produzidas a partir de manteigas vegetais, observou-se que, embora o cacau e o karité dominem as aplicações, 6 % dos estudos empregaram manteiga de cupuaçu, 6 % de murumuru e 6 % de bacuri, refletindo a atenção crescente a esses recursos amazônicos (COÊLHO *et al.*, 2020).

O **bacuri** (*Platonia insignis* Mart.) tem sido explorado como matriz para Nanopartícula Lipídica Sólida (NLS) graças à sua composição rica em ácidos palmítico e oleico, e à presença de benzofenonas preniladas com potente atividade antioxidante. Estudos demonstraram NLSs de bacuri com diâmetros médios entre 20–75 nm, baixos índices de polidispersão e zeta-potenciais em torno de –30 mV, garantindo estabilidade coloidal por até 180 dias, além de atividade antioxidante comprovada *in vitro* e *in vivo* (COÊLHO *et al.*, 2023).

O óleo de pracaxi (*Pentaclethra macroloba* Willd.) destaca-se pelo seu altíssimo conteúdo de ácido behênico (até 19 %)—o maior já descrito em óleos vegetais—além de ácidos oleico e linoleico, triterpenos e saponinas, que conferem potente ação anti-inflamatória, cicatrizante e emoliente. Esses atributos bioativos, aliados à fixação de nitrogênio que promove a sustentabilidade florestal, posicionam o pracaxi como ingrediente estratégico para vesículas lipídicas voltadas ao cuidado da pele e reparação tecidual (NOBRE LAMARÃO *et al.*, 2023).

O **açaí** (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma fruta típica da região Amazônica brasileira. O óleo extraído de seu fruto apresenta uma composição rica e diversificada, destacando-se pela presença significativa de ácidos graxos insaturados. Dentre eles, os mais abundantes são o ácido oleico (aproximadamente 60%) também denominado como ômega-9, seguido pelos ácidos palmítico (20–22%), linoleico (12%) e palmitoleico (2–6%). Outro aspecto relevante é o seu potencial antioxidante, atribuído à presença de compostos fenólicos e polifenois. Dentre esses, destacam-se os ácidos vanílico, siríngico, p-hidroxibenzoico, protocatecuico e ferúlico. Esses constituintes conferem ao óleo propriedades bioativas promissoras para aplicações nas áreas farmacêutica e cosmética. (BURATTO *et al.* 2021; KUBASZEWSK *et al.*, 2024).

O óleo de andiroba, extraído das sementes da árvore *Carapa guianensis* Aubl., é um patrimônio dos saberes ancestrais das comunidades amazônicas, que há gerações o utilizam para tratar diversas condições, desde a cicatrização de feridas até a proteção natural contra insetos. Esse conhecimento tradicional persiste vivo na medicina popular (GOMES *et al.*, 2023). A ciência moderna vem corroborando essa sabedoria, evidenciando o potencial antimicrobiano do óleo contra bactérias e fungos, incluindo *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e *Candida albicans* (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Além disso, seus limonoides e tetranortriterpenoides destacam-se por inhibir mediadores pró-inflamatórios, mostrando eficácia no tratamento de condições inflamatórias e dolorosas (HENRIQUES E PENIDO, 2014). A presença de flavonoides e compostos fenólicos contribui com sua ação antioxidante, que combate os danos causados pelos radicais livres no organismo (ARAÚJO-LIMA *et al.*, 2018). O óleo é dominado por ácidos graxos insaturados, com destaque para o ácido oleico, que compõe entre 45% e 58% da fração lipídica total. Essa composição confere propriedades emolientes e anti-inflamatórias potentes, favorecendo a regeneração

cutânea e a manutenção da barreira epidérmica. Outros ácidos presentes incluem ácido linoleico (6–14%), ácido palmítico (25–32%), ácido esteárico (6–13%) e ácido palmitoleico (0,8–1,5%) (AMAZONOIL, 2025, s.p.).

Outros lipídios amazônicos, como o óleo de andiroba, rico em ácidos palmitoleico e oleico, e o óleo de buriti (*Mauritia flexuosa* L.), abundante em carotenoides e ácidos graxos monoinsaturados, têm sido incorporados em nanoemulsões e lipossomas para potencializar a fotoproteção e o efeito antioxidante em formulações dermocosméticas (FATHI *et al.*, 2024).

Essa diversidade lipídica amazônica, combinada a métodos verdes de extração (DES/NaDES) e ao design de CLN/NLS via abordagens de Quality by Design, permitem não apenas a valorização de cadeias extrativistas locais, mas também a criação de sistemas de liberação controlada de ativos, que promovem hidratação prolongada, reparo cutâneo e proteção contra estresses oxidativos, alinhando-se aos princípios da bioeconomia e às metas de consumo e produção responsáveis da Agenda 2030.

Fruto / Matriz	Principais Ácidos Graxos	Aplicações Potenciais
Óleo de Pracaxi	Behenílico (C22:0), Oleico (C18:1)	Melhoria na resistência oxidativa de embalagens
Manteiga de Bacuri	Láurico (C12:0), Mirístico (C14:0)	Veículo para compostos antifúngicos
Manteiga de Cupuaçu	Esteárico (C18:0), Oleico (C18:1)	Liberação controlada de antioxidantes
Manteiga de Cacau	Palmitídeo (C16:0), Esteárico (C18:0)	Sistemas de revestimento com barreira lipídica
Óleo/Manteiga de Tucumã	Ômega-9 (C18:1), Ômega-6 (C18:2)	Nanoemulsões para incorporação de vitaminas
Óleo de Pequi	Palmitoléico (C16:1), Oleico (C18:1)	Revestimentos com atividade antimicrobiana
Óleo de Açaí	Ômega-9, Polifenóis	Veículo de compostos bioativos solúveis em lipídios
Óleo de Andiroba	Óleos voláteis triterpênicos	Nanoestruturas para liberação de óleos essenciais
Manteiga de Manga	Palmitídeo, Esteárico	Emulsões sólidas para estabilidade de sabores
Manteiga de Murumuru	Mirístico, Lauríco	Bio-mimética de membranas para encapsulamento
Óleo de Jambu	Espilantol, Ômega-9	Nanopartidores para agentes anestésicos leves
Manteiga de Ucuúba	Láurico, Mirístico	Sistemas com propriedade antifúngica
Óleo de Buriti	Ômega-9, Beta-caroteno	Nanoemulsões ricas em antioxidantes naturais

Tabela 1 – Lipídios amazônicos e suas aplicações potenciais em nanopartidores.

Fruto / Matriz	Óleo de Pracaxi	Manteiga de Bacuri	Manteiga de Cupuaçu	Manteiga de Cacau	Óleo/ Manteiga de Tucumã	Óleo de Pequi	Óleo de Açaí	Óleo de Andiroba	Manteiga de Manga	Manteiga de Murumuru	Óleo de Jambu	Manteiga de Ucuúba	Óleo de Buriti
Principais Ácidos Graxos / Compostos	Behenílico, Oleico	Láurico, Mirístico	Esteárico, Oleico	Palmitídeo, Esteárico	Ômega-9, Ômega-6	Palmitoléico, Oleico	Ômega-9, Polifenóis	Óleos voláteis triterpênicos	Palmítideo, Esteárico	Mirístico, Láurico	Espilantol, Ômega-9	Láurico, Mirístico	Ômega-9, Beta-caroteno
Aplicações Potenciais	Resistência oxidativa em embalagens	Veículo para compostos antifúngicos	Liberação controlada de antioxidantes	Revestimento com barreira lipídica	Nanoemulsões para vitaminas	Revestimentos antimicrobianos	Veículo de compostos bioativos	Nanoestruturas para óleos essenciais	Emulsões sólidas para sabores	Biomimética para encapsulamento	Nanopartidores anestésicos leves	Sistemas com propriedade antifúngica	Nanoemulsões com antioxi-dantes

Tabela 1 - Lipídios amazônicos e suas aplicações potenciais em nanoportadores.



Figura 3: Portfólio de lipídios bioativos obtidos de espécies nativas da Amazônia, cuja extração sustentável mantém a floresta em pé e promove cadeias de valor regenerativas. Cada óleo ou manteiga: Murumuru, andiroba, bacaba, cupuaçu, tucumã, buriti, ucuúba e pracaxi, apresenta composição graxa singular que modula propriedades físico-químicas e funcionais de sistemas NLS/CLN. A diversidade lipídica reflete a riqueza ecológica da floresta e sustenta o desenvolvimento de ingredientes de alta performance alinhados à bioeconomia e à conservação dos biomas.

O PAPEL EMERGENTE DA NANOTECNOLOGIA VERDE NA INDÚSTRIA COSMÉTICA E SAÚDE DA PELE

A valorização da biodiversidade amazônica por meio de uma abordagem de bioeconomia tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas nanoestruturados para cosméticos e tratamentos dérmicos. Frutos nativos como óleo de pracaxi, manteigas de bacuri e cupuaçu oferecem perfis únicos de ácidos graxos e fitocomplexos que, quando processados por métodos verdes de extração (DES/NaDES), geram insumos sofisticados, de baixo impacto ambiental, adequados à encapsulação de ativos cosméticos (SONG; MA, 2025).

A manteiga de cupuaçu obtida das sementes do cupuaçzeiro (*Theobroma grandiflorum* (Willd. ex Spreng.) K.Schum.) nativo apresenta uma composição de 55% de ácidos graxos saturados e 45% de insaturados, além de antioxidantes e fitoesteróis que contribuem regulando o equilíbrio hídrico e a atividade dos lipídios na camada superficial da pele. A ligação de pontes de hidrogênio aos fitoesteróis confere à manteiga uma das maiores capacidades de retenção hídrica entre as manteigas vegetais, e 240% maior que a da Lanolina (AMAZONOIL, 2025, s.p.). As sementes de cupuaçu apresentam um alto teor lipídico, entre 55% e 60% em peso seco, o que confere à manteiga de cupuaçu um rendimento superior ao da manteiga de cacau, mesmo sendo da mesma família (BOTANICAL FORMULATIONS, 2025; DA SILVA *et al.*, 2023, s.p.). Essas características fazem com que essa manteiga seja ideal para cosméticos que buscam hidratação intensa, regeneradora e calmante. Portanto, a encapsulação dessa manteiga é uma estratégia promissora para melhorar a sua biodisponibilidade e promover uma liberação controlada e direcionada dos compostos bioativos presentes.

Nanoencapsulações lipídicas como lipossomas e NLS formulados com manteiga de murumuru, óleo de andiroba e manteiga de ucuúba demonstram excelente estabilidade coloidal e alta capacidade de retenção de compostos antioxidantes e anti-inflamatórios. Sistemas multicompartmentais, inspirados em micelas multicamadas, retardam a liberação de princípios ativos, assegurando liberação prolongada e penetrabilidade otimizada na epiderme (BOYER; ZASADZINSKI, 2007).

A manteiga de murumuru é extraída da semente do fruto do murumuru (*Astrocaryum murumuru* Mart.), uma palmeira nativa da região amazônica é composta majoritariamente por ácidos graxos saturados, com destaque para o ácido láurico (44,14%), mirístico e oleico (REATGUI *et al.*, 2021). Esse perfil confere-lhe um ponto de fusão elevado de aproximadamente 32°C, resultando em maior estabilidade térmica e resistência à oxidação – características desejáveis na formulação de NLS (SENA, 2016).

Estudos demonstram que a manteiga de murumuru é capaz de formar sistemas nanoparticulados com diâmetros inferiores a 200 nm, baixa polidispersão e potencial zeta negativo (< -30 mV), parâmetros que indicam estabilidade físico-química satisfatória (SENA, 2016; ALVES *et al.*, 2018). Segundo Reatgui (2021) e Alves (2018) demonstraram que as NLS formuladas com essa manteiga apresentaram morfologia esférica, alto rendimento e eficiência de encapsulação superior a 90% para ativos hidrofóbicos como a curcumina. A liberação de fármacos ocorre de maneira controlada, com reação cujo comportamento cinético é de primeira ordem, prolongando sua ação tópica.

Do ponto de vista farmacotécnico, a manteiga de murumuru favorece a incorporação de ativos lipofílicos em sistemas de liberação cutânea, além de conferir alta emoliência e formação de uma fina camada protetora na pele. Tais características têm sido exploradas em formulações cosméticas e farmacêuticas, incluindo cremes, géis e loções dermatológicas (REATGUI *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2023). Em um estudo conduzido por Sena (2016), foram desenvolvidas NLS à base de manteiga de murumuru com metronidazol, visando o tratamento de rosácea e infecções dérmicas, obtendo-se excelente desempenho biofarmacêutico.

Outro aspecto relevante é a sustentabilidade, a utilização de manteiga de murumuru em nanotecnologia farmacêutica contribui para o uso racional de recursos da biodiversidade amazônica, alinhando inovação tecnológica a princípios de biocomércio ético (SILVA *et al.*, 2023).

O óleo de jambu é obtido das partes aéreas de *Spilanthes acmella*, planta conhecida por suas propriedades anestésicas, anti-inflamatórias e antioxidantes, atribuídas principalmente ao espilantol, seu composto bioativo majoritário (SOLDATI, 2015). Embora a literatura sobre a aplicação direta do óleo de jambu na formulação de NLS ainda seja incipiente, sua natureza lipofílica e perfil farmacológico justificam sua investigação como excipiente funcional em sistemas nanoestruturados .

A utilização de óleos essenciais e vegetais em NLS tem demonstrado vantagens como aumento da permeação cutânea, atividade antimicrobiana e ação anti-inflamatória tópica (MEC, 2023). No estudo por Silva (2023) demonstraram que a incorporação de óleos bioativos em NLS potencializa a ação terapêutica de formulações dermatológicas, devido à sinergia entre o lipídio estrutural e o ativo encapsulado.

No caso específico do jambu, sua ação miorrelaxante e antisséptica já foi validada em formulações cosméticas e fitoterápicas, o que indica um vasto potencial de aplicação em nanosistemas voltados ao alívio da dor muscular, tratamento de inflamações e hidratação profunda (SOLDATI, 2015). Quando associado a lipídios estruturantes como a manteiga de murumuru, é possível desenvolver sistemas híbridos que combinam estabilidade física e atividade funcional.

Para acelerar a descoberta e otimização dessas nanoformulações, plataformas de modelagem computacional e AM vêm sendo empregadas para predizer interações entre diferentes lipídios amazônicos e surfactantes, bem como para calibrar parâmetros de produção (temperatura, força de ultrassom, proporção de fases) em fluxos de trabalho *in silico* que reduzem drasticamente o número de ensaios experimentais (GAO *et al.*, 2021) . Essa sinergia entre nanotecnologia e inteligência computacional não apenas reforça a eficiência de P&D, como também

fortalece cadeias produtivas locais, promovendo um ciclo virtuoso de inovação e sustentabilidade na cosmética.

NANOESTRUTURAS LIPÍDICAS: PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES

Nanoestruturas lipídicas são sistemas coloidais cuja matriz principal é composta por lipídios sólidos e, no caso dos CLN, também por lipídios líquidos, estabilizados em meio aquoso por surfactantes. As duas principais classes são os NLS e os CLN, sendo ambas desenvolvidas para veicular compostos hidrofóbicos e hidrofílicos, com aplicações amplas em fármacos, cosméticos e alimentos funcionais (GORDILLO-GALEANO; MORA-HUERTAS, 2018).

Componentes e montagem

Os NLS contêm 0,1–30 % p/p de lipídios sólidos (ácidos graxos, ésteres glicerídeos, ceras) e 0,5–5 % p/p de surfactantes não iônicos ou anfóteros, em dispersão aquosa. Já os CLN substituem parte do sólido por óleos (ácidos graxos insaturados, triglicerídeos de cadeia média), resultando em matrizes bicomponentes que oferecem “imperfeições” cristalinas para maior carga e estabilidade de ativos (GORDILLO-GALEANO; MORA-HUERTAS, 2018).

Métodos de preparação

Técnicas de alta energia — como homogeneização em alta pressão (400–800 bar, ciclos a quente ou frio) e ultrassom — são as mais empregadas, permitindo partículas de 100–400 nm com distribuição monodispersa - índice de polidispersão (PDI) < 0,3. Métodos de baixa energia (microemulsões, inversão de fase) e abordagens com solventes orgânicos complementam o portfólio, cada um equilibrando rendimento, necessidade de surfactantes e viabilidade de escalonamento (GORDILLO-GALEANO; MORA-HUERTAS, 2018).

Estrutura e comportamento cristalino

A estrutura interna dos NLS e CLN é definida pelas formas polimórficas dos lipídios sólidos (α , β' , β), que influenciam a capacidade de carga e liberação controlada. Enquanto os NLS tendem a cristalizar-se em redes lamelares — por vezes expulsando o fármaco —, os CLN mantêm domínios líquidos integrados no núcleo sólido, atenuando recristalização e garantindo liberação sustentada do ativo (GORDILLO-GALEANO; MORA-HUERTAS, 2018).

Modelos de liberação de ativos

Dependendo da estrutura, o ativo pode estar disperso uniformemente, concentrado no core lipídico ou próximo à interface surfactante–água. Esses diferentes arranjos condicionam perfis de liberação imediata ou prolongada, fundamentais para aplicação em cosméticos (liberação contínua de antioxidantes) e nutrição (veiculação de micronutrientes) (GORDILLO-GALEANO; MORA-HUERTAS, 2018).

Aplicações em cosméticos e saúde da pele

Em formulações tópicas, NLS e CLN melhoram a penetração dérmica, promovem efeito oclusivo e protegem ativos sensíveis à oxidação (GORDILLO-GALEANO; MORA-HUERTAS, 2018). Tais características desejadas são atribuídas ao tamanho da partícula que, por serem em escala nanométrica, conseguem adentrar melhor nos tecidos, ter uma maior quantidade de partículas por área, e por conseguinte, uma maior área de superfície de contato, o que aumenta a efetividade e absorção do composto. Quando se observa o aspecto de proteção, ao se formar um NLS ou CLN com encapsulação, a matéria encapsulada pode ser protegida contra agentes oxidativos, UV e ganhar maior estabilidade contra sedimentação. (SANGUANSRI e AUGUSTIN, 2006; GUTIÉRREZ *et al.*, 2008)

O uso de lipídios amazônicos (pracaxi, murumuru, cupuaçu) em CLN confere além de sustentabilidade, perfis de ácidos graxos que modulam afinidade com ceramidas cutâneas, otimizando hidratação e liberação de princípios anti-inflamatórios e fotoprotetores (GORDILLO-GALEANO; MORA-HUERTAS, 2018).

É importante lembrar que tais lipídios podem ainda ter propriedades farmacológicas intrínsecas por si só, não dependendo da encapsulação de ativos para um efeito terapêutico. Por exemplo, a manteiga de tucumã possui propriedades antioxidantes já comprovadas (ARAÚJO *et al.*, 2021). Já o óleo de jambu, contém uma grande gama de metabólitos secundários atribuídos a propriedades anti-inflamatórias e nociceptivas envolvendo receptores opioides no processo além de muitos outros efeitos interessantes para aplicação industrial de cuidados para pele (CARDOSO & GARCIA, 1997; DUBEY *et al.*, 2013). Assim, é possível a formulação de uma tecnologia sustentável com eficiência farmaco-terapêutica apenas ao tirar proveito dos ativos presentes nos lipídios.

Em suma, as nanoestruturas lipídicas unem biocompatibilidade, versatilidade de carga e liberação controlada, configurando-se como plataforma promissora para inovar produtos cosmeceuticos e nutracêuticos dentro de uma bioeconomia circular.

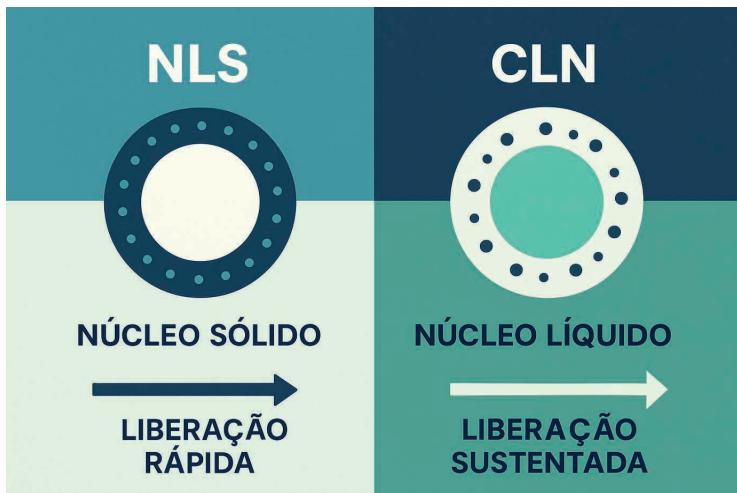


Figura 4: Comparação esquemática entre nls (núcleo sólido, maior tendência a expulsão do ativo e liberação mais rápida) e cln (núcleo líquido, maior acomodação do ativo e liberação sustentada). implicações diretas em estabilidade coloidal, perfil de difusão e desempenho tópico.

METODOLOGIAS DE FORMULAÇÃO

Metodologias de Formulação com Pegada Verde

As metodologias de produção de nanoestruturas lipídicas podem ser reorganizadas sob os princípios da Química Verde, minimizando o consumo energético, evitando solventes tóxicos e priorizando matérias-primas renováveis (GORDILLO-GALEANO; MORA-HUERTAS, 2018). A seguir, destacam-se abordagens sustentáveis para NLS e CLN:

Alta Energia com Eficiência Ambiental

Homogeneização de Alta Pressão “Fria” com Recuperação de Calor

- A etapa de pré-emulsão utiliza lipídios tropicalmente extraídos (e.g., óleo de pracaxi) e surfactantes biodegradáveis.
- A homogeneização “a frio” reduz a necessidade de aquecimento contínuo, enquanto sistemas de recuperação de calor reaproveitam a energia residual, resultando em economia de até 30 % no consumo energético (GORDILLO-GALEANO; MORA-HUERTAS, 2018).

Ultrassonicação Assistida por Pulsos

- Ao invés de aplicação contínua, utiliza-se ultrassom em pulsos curtos, diminuindo a degradação térmica e a erosão do sonotrodo.
- A geração de cavitação controlada permite diâmetros de 100–200 nm com PDI < 0,3, ao mesmo tempo em que reduz em até 40 % o tempo de processamento.

ROTAS DE BAIXA ENERGIA E SOLVENTES VERDES

Microemulsão Baseada em DES/NaDES

- Substituição de solventes orgânicos por DES/NaDES formados por combinações de compostos biodegradáveis (e.g., glicerol e ácidos de frutos amazônicos), garantindo extração em temperatura moderada e obtenção de microemulsões com menor toxicidade (SMITH et al., 2021).
- A diluição em água fria gera CLN com alta carga de ativos e demanda de surfactantes reduzida em 50 %.

Inversão de Fase Induzida por Temperatura com Ciclos Otimizados

- Adota-se um número mínimo de ciclos de aquecimento–resfriamento, calibrado por modelagem termo-dinâmica, para formar gotículas de 200–300 nm.
- A redução na quantidade de ciclos diminui o consumo de energia e a pegada de carbono do processo.

Método do Membrana de Contato com Fluxo Contínuo

- Utiliza membranas cerâmicas de alta durabilidade para produção contínua de partículas, eliminando etapas de concentração e purificação adicionais.
- O sistema em fluxo contínuo permite integração com painéis solares para aquecimento da fase lipídica, promovendo neutralidade energética em operações de pequeno porte.

ESCOLHA DE INSUMOS E SURFACTANTES SUSTENTÁVEIS

- **Lipídios amazônicos** (murumuru, cupuaçu, bacuri) provenientes de cadeias extrativistas certificadas, garantindo rastreabilidade e comércio justo.

- **Surfactantes biossintetizados**, como ésteres de sacarose e derivados de aminoácidos, reduzem a toxicidade aquática e melhoram a biodegradação pós-uso (GORDILLO-GALEANO; MORA-HUERTAS, 2018).

Monitoramento e Otimização *In Silico*

- Emprego de **modelagem termodinâmica e otimização bayesiana** para prever o menor consumo de energia e reagentes, permitindo a seleção automática de parâmetros (temperatura, pressão, proporção de DES/NaDES) que atendam simultaneamente a metas de eficiência e sustentabilidade (GAO *et al.*, 2021).

APLICAÇÕES DE IA E AM E DINÂMICA MOLECULAR NO DESENVOLVIMENTO DE NOVAS NANOTECNOLOGIAS

A integração de técnicas de Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina (AM) vem se mostrando essencial para acelerar o design, a síntese e a otimização de nanoestruturas lipídicas e outros sistemas de entrega. Estudos recentes demonstram abordagens inovadoras:

1. Descoberta de materiais guiada por dados

Modelos preditivos baseados em LightGBM e outros algoritmos foram treinados em grandes bases de dados experimentais para correlacionar atributos moleculares dos lípidos e condições de formulação com propriedades finais de partículas, como tamanho médio, PDI e eficiência de encapsulamento (LI *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2021). Essas previsões permitem priorizar virtualmente combinações de lipídios amazônicos (óleo de pracaxi, manteiga de bacuri, etc.) que prometem estabilidade coloidal e alta carga de compostos bioativos (LI *et al.*, 2022).

2. Otimização automática de processos de síntese

Algoritmos de otimização bayesiana, integrados a workflows de AM, ajustam iterativamente parâmetros críticos (temperatura, tempo de homogeneização, proporção de solventes verdes) para convergir em formulações com PDI < 0,1 em poucos ciclos experimentais (GAO *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2022). Em formulações lipídicas para vacinas de mRNA, por exemplo, LightGBM identificou subestruturas lipídicas críticas em NLSs que maximizaram títulos de IgG em modelos murinos (WANG *et al.*, 2022).

3. Modelagem multiescala e simulação assistida por IA

Técnicas de aprendizado profundo extraem descritores estruturais de simulações de dinâmica molecular para antecipar a interação entre lipídios e surfactantes em

nanoemulsões, enquanto algoritmos de clustering segmentam regiões do espaço paramétrico mais promissoras para experimentação (TROLLMANN; BÖCKMANN, 2022; GAO et al., 2020). A combinação de MD e AM tem sido usada para prever transições de fase em LNPs sensíveis a pH, orientando a escolha de amino lipídios ionizáveis (TROLLMANN; BÖCKMANN, 2022).

4. Análise de imagens e caracterização automatizada

Redes neurais convolucionais (CNNs) classificam automaticamente imagens de MEV, MET e confocal para quantificar morfologia de partículas lipídicas com alta precisão, eliminando a variabilidade de análise manual e acelerando desafios como o Nano Battle 2025 (WANG et al., 2023).

5. Desenvolvimento orientado por múltiplos objetivos

Estratégias multiobjetivo baseadas em algoritmos genéticos e florestas aleatórias conciliam metas como PDI < 0,1, potencial zeta adequado e alta eficiência de encapsulamento de compostos (p. ex., curcumina), sugerindo conjuntos ótimos de fatores de formulação em desenho Box–Behnken digitalizado (GAO et al., 2020).

6. Integração com modelagem farmacocinética (PBPK)

Frameworks computacionais incorporam previsões de AM sobre liberação sustentada de nanoestruturas lipídicas em modelos PBPK para antecipar perfil de liberação e biodisponibilidade, otimizando *in silico* o desempenho *in vivo* antes de escalonamento (GAO et al., 2021).

Ao aplicar esses métodos aos lipídios amazônicos — óleo de pracaxi, manteigas de bacuri, cupuaçu, tucumã, pequi, açaí, andiroba, manga, murumuru, jambu, ucuúba e buriti — a IA/AM viabiliza:

- Triagem virtual de misturas lipídicas locais com alto potencial antioxidante e antimicrobiano;
- Redução drástica do número de formulações experimentais;
- Orientação sustentável, valorizando cadeias produtivas regionais e fomentando a bioeconomia circular.

Dessa forma, a sinergia entre IA, AM e nanotecnologia promove inovações robustas, eficientes e alinhadas ao ODS 12 e à Agenda 2030 para consumo e produção sustentáveis.

Complementando essas aplicações, destaca-se a crescente utilização da **dinâmica molecular integrada à IA** para ampliar a eficiência e o entendimento dos sistemas de delivery de drogas baseados em estruturas lipídicas. A caracterização estrutural e o entendimento do comportamento dinâmico de nanoestruturas encontram desafios em técnicas comuns de investigação, como a microscopia eletrônica, que atingem

grande eficácia para sistemas de dimensões maiores, mas nem sempre são capazes de resolver estruturas de escalas nanométricas. Para estes últimos, uma alternativa aos ensaios clássicos surge no ambiente *in silico*, cordialmente entendido como o ambiente computacional.

Com o intuito de auxiliar no processo de modernização das análises estruturais de produtos nanométricos, a IA apresenta-se como uma alternativa promissora. Tais programas computacionais têm sido cada vez mais explorados por estudantes e acadêmicos científicos, haja vista que disponibilizam uma extensa base de dados, respostas rápidas e eficientes, além de acessibilidade e customização individual para cada área (HAMILTON et al., 2023; HAYAT et al., 2021). Dessa forma, sistemas personalizados possibilitam a redução drástica do tempo de trabalho com concomitante aumento da qualidade, evitando, por exemplo, o desperdício de materiais.

Uma vez que a nanoestrutura é analisada e caracterizada por métodos convencionais, como os microscópios eletrônicos, as imagens geradas podem servir como dados de entrada para a IA desenvolvida, treinando-a para aprimorar suas previsões de estrutura, tamanho e outras interações moleculares. Esta forma de avaliação permite análises mais detalhadas e aprofundadas, como estruturas tridimensionais, avaliação de lipídios e suas interações, possíveis tratamentos, entre outros (THORN, 2022).

Ademais, a precisão do uso de fármacos se intensifica significativamente. O denominado *Drug Delivery System* (DDS), ou Sistema de Liberação de Medicamentos, consiste em um conjunto de metodologias desenvolvidas com o propósito de investigar o aprimoramento da eficácia e acurácia terapêutica, promovendo benefícios à farmacocinética e farmacodinâmica, além da adaptação do paciente ao tratamento. Ao integrar esta linha de pesquisa à IA, emerge uma nova abordagem para a análise de potenciais terapêuticos e sua respectiva eficácia.

INFRAESTRUTURA DE IA E SUSTENTABILIDADE: EQUILIBRANDO CONSUMO DE ENERGIA E ÁGUA

A adoção crescente de IA em setores industriais e de pesquisa tem gerado ganhos expressivos em eficiência e sustentabilidade, mas impõe um dilema ambiental: os data centers que suportam o treinamento e a inferência de modelos de grande porte demandam quantidades substanciais de energia elétrica e água para resfriamento. Sem a migração para fontes renováveis, esses consumos podem anular os benefícios de circularidade oferecidos pelas próprias soluções de IA.

Os data centers representam hoje entre 1 % e 2 % do consumo global de eletricidade, com picos em operações de alto desempenho para treinamento de redes neurais profundas. Cada ciclo de treinamento de um modelo de grande escala pode emitir centenas de toneladas de equivalente, reproduzindo o padrão “pegada invertida” em que um sistema sustentável se torna, em si, intensivo em carbono (FERRO et al., 2021). Além disso, a refrigeração por água evaporativa ou resfriamento líquido consome bilhões de litros anualmente, criando uma pegada hídrica que compete com necessidades de agricultura e abastecimento urbano (SHAH; WEVER; ESPIG, 2025).

Para equilibrar esses trade-offs, torna-se imperativo o desenvolvimento de **arquiteturas de IA de baixo consumo**. Abordagens como quantização de pesos, poda de redes e treinamento distribuído em hardware especializado (TPUs, ASICs verdes) reduzem significativamente a carga computacional, diminuindo não só o gasto energético mas também a demanda de resfriamento (FERRO et al., 2021). Paralelamente, o uso de **fontes renováveis on-site** — painéis fotovoltaicos, pequenas turbinas eólicas ou aproveitamento de calor residual — pode neutralizar as emissões indiretas, criando instalações de IA com **neutralidade de carbono e água**.

Outra estratégia chave é a **otimização dinâmica de carga**: sistemas inteligentes de gerenciamento de data centers utilizam algoritmos de reforço para ajustar em tempo real a distribuição de tarefas, priorizando computação em horários de baixa demanda na rede elétrica e minimizando ciclos de refrigeração nos períodos mais quentes (SHAH; WEVER; ESPIG, 2025). Além disso, a implementação de **sistemas de resfriamento sustentável** — como free cooling em climas frios, uso de águas residuais tratadas e trocadores de calor geotérmicos — reduz a dependência de torneiras potáveis, aliviando a pressão sobre bacias hidrográficas vulneráveis.

Em última análise, a **batalha pela sustentabilidade** no uso de IA depende de uma visão holística, integrando design de hardware eficiente, algoritmos verdes e fontes de energia e água renováveis. Somente esse **equilíbrio consciente** permitirá que a IA continue a impulsionar inovações em bioeconomia e nanotecnologia sem comprometer os recursos naturais dos biomas que pretende proteger.

BENEFÍCIOS E DESAFIOS

A aplicação de IA, AM e técnicas de modelagem avançada a sistemas de bioeconomia circular e nanoestruturas lipídicas oferece um leque de vantagens estratégicas para a sustentabilidade, mas demanda cuidadosa gestão de riscos e incertezas. A seguir, uma visão ampliada dos principais benefícios e desafios, fundamentada nos artigos fornecidos:

Benefícios

1. Otimização de Cadeias de Valor e Valorização de Resíduos

Plataformas de AM permitem analisar fluxos de resíduos agroindustriais, identificando subprodutos – como cascas e sementes de frutos amazônicos – com maior potencial de extração de lipídios para nanoportadores. Modelos de “learning-by-doing” demonstram que a experiência acumulada reduz custos de extração e processamento, elevando a eficiência global da cadeia (PYKA et al., 2022).

2. Modelagem de Ciclo de Vida Integrada

Ferramentas de avaliação de ciclo de vida (LCA) acopladas a algoritmos de otimização multifatorial viabilizam o balanceamento entre indicadores de desempenho (eficiência de encapsulamento, estabilidade coloidal) e métricas ambientais (emissões de gás carbônico, consumo hídrico). Isso orienta escolhas de processos, por exemplo, rotas DES/NaDES versus homogeneização de alta pressão que minimizam a pegada ecológica sem sacrificar rendimento (Sustainability, 2025).

3. Descoberta Guiada por Dados

Bases de dados compostas por características físico-químicas de lipídios amazônicos e resultados experimentais alimentam modelos preditivos que sugerem formulações promissoras de CLN/NLS, reduzindo ciclos de P&D em até 60% e direcionando esforços para combinações de maior probabilidade de sucesso (TSUI et al., 2023).

4. Sistemas de Apoio à Decisão em Tempo Real

A integração de sensores IoT (internet das coisas), blockchain e análise de dados em nuvem possibilita monitorar em tempo real parâmetros críticos de produção e logística, acionando protocolos de correção automática em processos contínuos — por exemplo, ajustando temperatura ou proporção lipídio/surfactante conforme variabilidade de matéria-prima (SHAH; WEVER; ESPIG, 2025).

5. Governança e Conformidade ESG

Frameworks de IA aplicados a indicadores ESG permitem rastrear múltiplas dimensões de sustentabilidade — desde uso de água e carbono até impacto socioeconômico em comunidades extrativistas — fornecendo painéis dinâmicos para empresas e reguladores alinharem metas ao ODS 12 (YANG et al., 2025).

Desafios

1. Heterogeneidade e Qualidade de Dados

A diversidade natural dos lipídios amazônicos e a variabilidade nos processos de extração geram bases de dados fragmentadas, com lacunas e vieses que podem comprometer a acurácia dos modelos. Estratégias de pré-processamento e enriquecimento de dados são fundamentais para garantir previsões confiáveis (TSUI *et al.*, 2023).

2. “Caixa-Preta” e Interpretabilidade dos Modelos

Modelos complexos de aprendizado profundo e ensembles oferecem alta performance, mas pouca transparência. A falta de explicabilidade dificulta a adoção por reguladores e pode gerar resistência de stakeholders, exigindo frameworks de IA responsável e auditorias de algoritmo (ROBERTS *et al.*, 2022).

3. Pegada Ambiental da Infraestrutura de IA

O treinamento de modelos de grande porte demanda significativa energia de data centers. Sem migração para fontes renováveis, os ganhos em circularidade podem ser neutralizados por emissões indiretas de carbono, o que torna imperativo o desenho de arquiteturas de IA de baixo consumo (FERRO *et al.*, 2021).

4. Limitações de Modelagem de Transformações de Longo Prazo

Modelos econômicos e ambientais convencionais, baseados em mudanças tecnológicas exógenas, não capturam falhas experimentais, incertezas e feedbacks que caracterizam inovações disruptivas em bioeconomia. Novas abordagens de modelagem devem incorporar agentes heterogêneos e trajetórias não-lineares de progresso tecnológico (SMEETS-KRISKOVA *et al.*, 2022).

5. Barreiras Regulatórias e Certificações

A inexistência de normas específicas para avaliação de nanoativos em alimentos e cosméticos — especialmente no uso de extratos amazônicos ou bioinseticidas encapsulados — retarda o escalonamento industrial. É necessária a criação de benchmarks setoriais e mecanismos adaptativos de regulação, como índices de atenção pública que disparem auditorias proporcionais (ALBITAR *et al.*, 2020).

6. Capacitação e Aceitação Social

A incorporação de IA e processos verdes demanda competências técnicas avançadas e mudanças culturais em equipes de P&D e produção. Programas de treinamento e iniciativas de engajamento comunitário são cruciais para construir confiança junto a extrativistas e consumidores finais.

Em síntese, ao conjugar IA/AM com modelos de economia circular e nanoestruturas lipídicas derivadas da Amazônia, é possível alcançar soluções transformadoras em cosméticos e saúde da pele – promovendo eficiência de recursos, rastreabilidade, e produtos de alto valor agregado. No entanto, o sucesso depende de estratégias integradas para lidar com desafios de dados, governança de algoritmos, pegada energética, estrutura regulatória e capacitação social. Só assim poderemos materializar plenamente os benefícios de uma bioeconomia inteligente e sustentável.

CONCLUSÃO

A incorporação de nanoestruturas lipídicas baseadas em lipídios amazônicos representa uma fronteira promissora para a conservação sustentável de alimentos, alinhando-se ao ODS 12 e às diretrizes da Agenda 2030. Estudos futuros devem focar na avaliação toxicológica, na otimização de processos e na viabilidade industrial para que estas inovações contribuam efetivamente para a segurança alimentar global.

REFERÊNCIAS

- ANGLE, J. S. Expectations from nano in agriculture. *Nature Nanotechnology*, v. 14, p. 515–516, 2019.
- COLE, M. B. et al. The science of food security. *npj Science of Food*, v. 2, art. 14, 2018.
- SONG, C.; MA, W. ESG and green innovation: nonlinear moderation of public attention. *Humanities and Social Sciences Communications*, v. 12, art. 667, 2025.
- FERRO, G. et al. Green AI: Challenges for sustainability and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 150, art. 111442, 2021.
- GAO, H. et al. An integrated computational methodology with data-driven machine learning, molecular modeling and PBPK modeling to accelerate solid dispersion formulation design. *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, v. 158, p. 336–346, 2021.
- LI, J. et al. In silico formulation prediction of drug/cyclodextrin/polymer ternary complexes by machine learning and molecular modeling techniques. *Carbohydr. Polym.*, v. 275, art. 118712, 2022.
- ONU. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations, 2015.
- TROLLMANN, M. F. W.; BÖCKMANN, R. A. mRNA lipid nanoparticle phase transition. *Biophys. J.*, v. 121, p. 3927–3939, 2022.
- WANG, W. et al. Computational pharmaceutics – A new paradigm of drug delivery. *J. Control. Release*, v. 338, p. 119–136, 2021.

GAO, H. et al. Predicting drug/phospholipid complexation by the LightGBM method. *Chem. Phys. Lett.*, v. 747, art. 137354, 2020.

WANG, W. et al. Prediction of lipid nanoparticles for mRNA vaccines by the machine learning algorithm. *Acta Pharm. Sin. B*, v. 12, n. 6, p. 2950–2962, 2022.

WANG, N. et al. How can machine learning and multiscale modeling benefit ocular drug development? *Adv. Drug Deliv. Rev.*, v. 196, art. 114772, 2023.

ARRAUT, J.M.; NOBRE, C.; BARBOSA, H.M.J.; OBREGON, G.; MARENKO, J. Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America. *Journal of Climate*, v. 25, p. 543–556, 2012.

AZIZ FILHO, D. Understanding the effects of carbon nanoparticles on growth, anatomical characteristics, and photosynthetic performance of Amazonian tree species. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Ciências de Florestas Tropicais - INPA, Manaus, Amazonas, 2025.

BERGAMO, D.; ZERBINI, O.; PINHO, P.; MOUTINHO, P. The Amazon bioeconomy: Beyond the use of forest products. *Ecological Economics*, v. 199, set., 2022.

BRASIL. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa: PIAMz. [Brasília]: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 15 set. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/55759789/projetos-da-embrapa-no-fundo-amazonia-geram-tres-novas-tecnologias-para-o-uso-sustentavel-da-floresta>. Acesso em: 17 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da ciência, tecnologia e inovação. Instituto Mamirauá: Dos Andes ao mar. [Brasília]: Ministério da ciência, tecnologia e inovação, 05 abr. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/accompanhe-o-mcti/noticias/2024/04/tecnologia-que-utiliza-inteligencia-artificial-amplia-area-de-monitoramento-da-biodiversidade-na-amazonia>. Acesso em: 17 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da ciência, tecnologia e inovação. INPA: NANORAD's. [Brasília]: Ministério da ciência, tecnologia e inovação, 18 dez. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inpa/pt-br/sites/nanorads/home>. Acesso em: 03 jun. 2025.

COELHO, M.T.P.; BARRETO, E.; RANGEL, T.F.; DINIZ-FILHO, J.A.F.; WUEST, R.O.; BACH, W.; SKEELS, A.; MCFADDEN, I. R.; ROBERTS, D. W.; PELLISSIER, L.; ZIMMERMANN, N. E.; GRAHAM, C.H. The geography of climate and the global patterns of species diversity. *Nature*, v. 622, p. 537–544, 2023.

FULLER, M.R.; GANJAM, M.; BAKER, J.S.; ABT, R.C. Advancing forest carbon projections requires improved convergence between ecological and economic models. *Carbon Balance and Management*, v. 20, n. 2, 2025.

GUAYASAMIN, J.M.; RIBAS, C.C.; CARNAVAL, A.C.; CARRILLO, J.D.; HOORN, C.; LOHMANN, L.G.; RIFF, D.; ULLOA, C. U.; ALBERT, J. S. Evolution of Amazonian biodiversity: A review. *Acta Amazonica*, v. 54, 2024. e54bc21360.

GUERRA, A.; REIS, L.K.; BORGES, F.L.G.; OJEDA, P.T.A.; PINEDA, D.A.M.; MIRANDA, C.O.; MAIDANA, D. P. F. L.; SANTOS, T. M. R.; SHIBUYA, P. S.; MARQUES, M. C. M.; LAURANCE, S. G. W.; GARCIA, L. C. Ecological restoration in Brazilian biomes: Identifying advances and gaps. *Forest Ecology and Management*, v. 458, n. 117802, 2020.

HAYDAR, M. S.; GHOSH, D.; ROY, S. Slow and controlled release nanofertilizers as an efficient tool for sustainable agriculture: Recent understanding and concerns. *Plant Nano Biology*, v. 7, p. 100058, 2024.

LUIZE, B.G.; TUOMISTO, H.; EKELSCHOT, R.; DEXTER, K.G.; AMARAL, I.L.D.; COELHO, L.D.S.; et al. The biogeography of the Amazonian tree flora. *Communications Biology*, v. 7, n. 1240, 2024.

RAJPUT, V. D.; MINKINA, T.; UPADHYAY, S. K.; KUMARI, A.; RANJAN, A.; MANDZHIEVA, S.; SUSHKOVA, S.; SINGH, R. K.; VERMA, K. K. Nanotechnology in the Restoration of Polluted Soil. *Nanomaterials*, v. 12, n. 769, 2022.

WWF. About the Amazon. Disponível em: <https://www.worldwildlife.org/places/amazon>. Acesso em: 3 jun. 2025.

GORDILLO-GALEANO, A.; MORA-HUERTAS, C. E. Solid lipid nanoparticles and nanostructured lipid carriers: A review emphasizing on particle structure and drug release. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, v. 133, p. 285–308, 2018.

ALMEIDA, C.W.M.A. et al. Caracterização da manteiga de murumuru (*Astrocaryum murumuru Mart*) para aplicação na produção de nanocarreadores lipídicos. 57º Congresso Brasileiro de Química, 2017.

REATGUI, W.S. Desenvolvimento e caracterização de nanopartículas lipídicas sólidas baseadas em manteiga de murumuru (*Astrocaryum murumuru Mart.*) para aplicação tópica. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2021.

SENA, L.W.P. Obtenção e caracterização de carreadores lipídicos nanoestruturados a partir de gordura vegetal de murumuru (*Astrocaryum murumuru Mart.*). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, 2016.

ALVES, K.L.M. Desenvolvimento e avaliação de estabilidade preliminar de emulsões cosméticas utilizando nanopartículas lipídicas sólidas de Muru muru (*Astrocaryum murumuru*) e Ucuúba (*Virola surinamensis*). Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Brasília, 2018.

SILVA, E.F. Nanopartículas lipídicas baseadas em óleos essenciais com atividade contra espécies bacterianas isoladas de humanos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2023.

SILVA, M.K.C. et al. Desenvolvimento e estudo de estabilidade de biocosméticos capilares baseados em óleo de Carapa guianensis Aubl. e manteiga de Astrocaryum murumuru Mart. Anais do Simpósio de Plantas Medicinais do Brasil, 2017.

SOLDATI, P.P. Desenvolvimento de nanopartículas lipídicas sólidas utilizando manteiga natural para aplicação tópica. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2015.

SANTOS, G. S. DOS et al. Desenvolvimento e caracterização de nanopartículas lipídicas destinadas à aplicação tópica de dapsona. Química Nova, 2012.

VITRINE TECNOLÓGICA MEC. Composição contendo nanopartículas lipídicas sólidas à base de manteiga de murumuru (*Astrocaryum murumuru*), alumínoftalocianina e tensoativo e seu uso para carreamento de ativos de baixa solubilidade em formulações cosméticas. 2023.

AMAZONOIL. Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*). Amazon Oil – Produtos da Floresta, 2025. Disponível em: <https://amazonoil.com.br/produtos-da-floresta/cupuacu-theobroma-grandiflorum>. Acesso em: 9 jun. 2025.

BOTANICAL FORMULATIONS. Cupuacu butter. Características e composição. Disponível em: <https://www.botanicalformulations.com/oil-monographs/cupuacu-butter>. Acesso em: 9 jun. 2025.

DA SILVA, D. C. S.; DE CARVALHO-GUIMARÃES, F. B.; VALENTE PIRES, I.; et al. Fatty acid profile and rheological behavior of annatto seed oil (*Bixa orellana*), cupuassu seed fat (*Theobroma grandiflorum*), and their blends. *Grasas y Aceites*, v. 74, n. 1, 22 mar. 2023. Disponível em: <https://grasasyaceites.revistas.csic.es/index.php/grasasyaceites/article/view/1967>. Acesso em: 9 jun. 2025.

Araujo, N.M.P. et al. Functional and nutritional properties of selected Amazon fruits: A review. *Food Research International*, 2021.

Cardoso, M.O. & Garcia, L.C. Jambu (*Spilanthes oleracea* L.). Embrapa Amazônia Ocidental. ALICE, 1997

Dubey, S. et al. Phytochemistry, Pharmacology and Toxicology of *Spilanthes acmella*: A Review. *Adv. Pharmacol. Sci.*, 2013.

BARBOSA, Jhonatas Rodrigues; CARVALHO JUNIOR, Raul Nunes de. Food sustainability trends: how to value the açaí production chain for the development of food inputs from its main bioactive ingredients. Belém: Federal University of Pará, Institute of Technology (ITEC), Extraction Laboratory/Faculty of Food Engineering (LABEX/FEA), 2022.

BURATTO, Rafaella T.; COCERO, María José; MARTÍN, Ángel. Characterization of industrial açaí pulp residues and valorization by microwave-assisted extraction. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, v. 160, p. 108269, 2021.

CASTRO, I. R. de; ALBAGLI, S.; BARBOSA, L. G. de M. Bioeconomia na Amazônia brasileira: desafios e caminhos para o desenvolvimento sustentável. Brasília: IBICT, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/ibict/pt-br/arquivos/publicacoes-tecnicas/bioeconomia-na-amazonia-brasileira.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2025.

HOMMA, Alfredo Kingo Oyama (Org.). Extrativismo vegetal na Amazônia: história, ecologia, economia e domesticação. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 467 p. ISBN 978-85-7035-335-1.

KUBASZEWSKI NUNES, J.; KOLINSKI MACHADO, A.; EL SOUFI EL SABBAGH, D.; MACHADO, A. K.; FERREIRA OURIQUE, A. Different açaí by-products in nanostructured formulations: a brief literature review. *Disciplinarum Scientia | Naturais e Tecnológicas*, Santa Maria (RS, Brasil), v. 24, n. 3, p. 31–46, 2024. DOI: 10.37779/nt.v24i3.4765. Disponível em: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumNT/article/view/4765>. Acesso em: 3 jun. 2025.

BORGES, L. S.; VIEIRA, M. C. S.; VIANELLO, F.; GOTO, R.; LIMA, G. P. P.. Antioxidant compounds of organically and conventionally fertilized jambu (*Acmella oleracea*). *Biological Agriculture and Horticulture*, v.31, p.1-10, 2015

SCHUH, L.; SALGADO, L.A.; PIAU, T.B.; SILVEIRA, A.P.; LEAL, C.; ROMERA, L.F.; RADICCHI, M.A.; SANTOS, M.-K.M.S.; FALCAO, L.; GRISOLIA, C.K.; et al. Integrating Natural Deep Eutectic Solvents into Nanostructured Lipid Carriers: An Industrial Look. *Pharmaceuticals* 2024, 17, 855. <https://doi.org/10.3390/ph17070855>

ARAUJO-LIMA, C. F., FERNANDES, A. S., GOMES, E. M., OLIVEIRA, L. L., MACEDO, A. F., ANTONIASSI, R., WILHELM, A. E., AIUB, C. A. F., & FELZENSZWALB, I. (2018). Antioxidant activity and genotoxic assessment of crabwood (*Andiroba*, *Carapa guianensis* Aublet) seed oils. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2018, 3246719. <https://doi.org/10.1155/2018/3246719>

Gomes, J. T., Wanzeler, A. M. V., Júnior, S. M. A., Soares, R. H. F. C., Oliveira, C. P., Rodrigues, E. M., Soares, B. M., Alcantara, D. D. F. A., Burbano, R. M. R., & Tuji, F. M. (2023). The chromatographic constitution of andiroba oil and his healing effects, compared to the LLLT outcomes, in oral mucositis induced in golden Syrian hamsters: A new treatment option. *Oncotarget*, 14, 23-39. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.28338>

Oliveira, I. D. S. D. S., Moragas Tellis, C. J., Chagas, M. D. S. D. S., Behrens, M. D., Calabrese, K. D. S., Abreu-Silva, A. L., & Almeida-Souza, F. (2018). *Carapa guianensis* Aublet (Andiroba) seed oil: Chemical composition and antileishmanial activity of limonoid-rich fractions. *BioMed Research International*, 2018, 5032816. <https://doi.org/10.1155/2018/5032816>

Henriques, M., & Penido, C. (2014). The therapeutic properties of Carapa guianensis. *Current Pharmaceutical Design*, 20(6), 850-856. <https://doi.org/10.2174/13816128113199990048>

SMITH, J. et al. Green extraction of bioactive lipids using deep eutectic solvents: A sustainable approach. *Green Chemistry*, v. 23, n. 4, p. 1620–1632, 2021.

Assis, L. M. d., Zavareze, E. d. R., Prentice-Hernández, C., & Souza-Soares, L. A. d. (2012). Revisão: características de nanopartículas e potenciais aplicações em alimentos. *Brazilian Journal of Food Technology*, 15(2), 99-109. <https://doi.org/10.1590/s1981-67232012005000004>

SANGUANSRI, P.; AUGUSTIN, M. A. Nanoscale materials development e a food industry perspective. *Trends in Food Science & Technology*, v. 17, p. 547-556, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2006.04.010>

HAMILTON, S.; KINGSTON, B. R. Applying artificial intelligence and computational modeling to nanomedicine. *Current Opinion in Biotechnology*, v. 85, p. 103043, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2023.103043>

HAYAT, H. M. A. et al. A concise review: the synergy between artificial intelligence and biomedical nanomaterials that empowers nanomedicine. *Biomedical Materials*, v. 16, p. 052001, 2021. <https://doi.org/10.1088/1748-605X/ac15b2>

THORN, A. Artificial intelligence in the experimental determination and prediction of macromolecular structures. **Current Opinion in Structural Biology**, v. 74, p. 102368, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.sbi.2022.102368>