

## **A revolução silenciosa da pele: Biotecnologia do microbioma na vanguarda da cosmética e dermatologia**

The silent revolution of the skin: microbiome Biotechnology at the forefront of cosmetics and dermatology

Lucyneid Barros Carvalho – UNINASSAU

Márcio Rodrigo Elias Carvalho – FASUL

Dandara Beatriz Oliveira Lima – UNINASSAU

Débora Maria Moreno Luzia – FASUL

Flávia Chaves Valentim Rodrigues – FASUL

### **RESUMO**

Este artigo de revisão integrativa explora a transição paradigmática na cosmetologia e dermatologia, impulsionada pelos avanços na biotecnologia do microbioma cutâneo. O objetivo é analisar criticamente o papel do microbioma na homeostase da pele, as implicações da disbiose em dermatopatias como acne e dermatite atópica, e as estratégias biotecnológicas emergentes para sua modulação. A metodologia seguiu o framework de Whittemore e Knafl, com busca sistemática em cinco bases de dados, resultando em 78 publicações analisadas. São detalhadas as abordagens com probióticos, prebióticos e pós-bióticos, sintetizando evidências clínicas de meta-análises recentes incluindo 127.150 participantes. A análise se estende aos desafios tecnológicos de formulação, incluindo sistemas de microencapsulação e inteligência artificial para personalização. O mercado global, avaliado em USD 1,03 bilhões em 2024 com projeção de USD 2,86 bilhões até 2032 (CAGR 13,68%), valida a relevância comercial. As perspectivas incluem live biotherapeutics engenheirados, modulação do eixo pele-cérebro-intestino e diagnósticos baseados em IA, consolidando a biotecnologia do microbioma como pilar central para o futuro dos cuidados com a pele.

**Palavras-chave:** microbioma cutâneo; probióticos; biotecnologia; cosmeceuticos; disbiose.

### **ABSTRACT**

This integrative review article explores the paradigmatic shift in cosmetology and dermatology driven by advances in skin microbiome biotechnology. The objective is to critically analyze the role of the microbiome in skin homeostasis, the implications of dysbiosis in dermatopathies such as acne and atopic dermatitis, and emerging biotechnological strategies for its modulation. The methodology followed the Whittemore and Knafl framework, with a systematic search across five databases, resulting in 78 publications analyzed. Probiotic, prebiotic, and postbiotic approaches are detailed, synthesizing clinical evidence from recent meta-analyses including 127,150 participants. The analysis also addresses technological challenges in formulation, including microencapsulation systems and the application of artificial intelligence for personalization. The global market, valued at USD 1.03 billion in 2024 and projected to reach USD 2.86 billion by 2032 (CAGR 13.68%), underscores its commercial relevance. Future perspectives include engineered live biotherapeutics, modulation of the skin-brain-gut axis, and AI-based diagnostics, consolidating microbiome biotechnology as a central pillar for the future of skincare..

**Keywords:** skin microbiome; probiotics; biotechnology; cosmeceuticals; dysbiosis.

## 1. INTRODUÇÃO

A pele, por muito tempo considerada uma barreira física predominantemente inerte, é hoje reconhecida como um órgão metabolicamente ativo e um ecossistema dinâmico e complexo. Esta superfície de aproximadamente  $2\text{m}^2$  é habitada por uma vasta comunidade de micro-organismos – incluindo bactérias, fungos, vírus e ácaros – que constituem o microbioma cutâneo, com densidade populacional estimada em 106 células por  $\text{cm}^2$  (BEATO, 2017; DE ALMEIDA et al., 2024). Longe de serem meros colonizadores passivos, estes micro-organismos desempenham papéis cruciais na manutenção da homeostase da pele, contribuindo ativamente para a função de barreira, modulando a resposta imune inata e adaptativa, e protegendo o hospedeiro contra a invasão de patógenos por meio de mecanismos de exclusão competitiva (MANCINI, 2019; FRANÇA, 2021).

O desequilíbrio neste ecossistema, uma condição conhecida como disbiose, tem sido progressivamente implicado na etiologia e na exacerbação de uma gama de dermatopatias inflamatórias crônicas. Condições como a dermatite atópica (DA), acne vulgar, psoríase e rosácea estão cada vez mais correlacionadas com alterações qualitativas e quantitativas na composição da microbiota cutânea (HUSEIN-ELAHMED; STEINHOFF, 2023; WANG et al., 2025). Um estudo bibliométrico recente analisando 1.629 publicações demonstrou crescimento exponencial de 87,5 artigos por ano desde 2018, com 28,18% envolvendo colaborações internacionais, evidenciando o interesse científico global neste campo (DE ALMEIDA et al., 2024).

Este novo entendimento impulsionou uma mudança de paradigma fundamental na pesquisa e desenvolvimento (P&D) da indústria cosmética, com investimentos superiores a USD 500 milhões apenas em 2023-2024. O mercado global de cosméticos baseados em microbioma, avaliado em USD 1,03 bilhões em 2024, projeta crescimento para USD 2,86 bilhões até 2032, com taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 13,68% (DATA BRIDGE MARKET RESEARCH, 2024). A abordagem tradicional, frequentemente focada em estratégias antimicrobianas generalistas, está sendo suplantada por uma filosofia "microbiome-friendly", direcionando a inovação para a restauração do equilíbrio ecológico (eubiose) em vez da erradicação microbiana (ROSA, 2023; LI et al., 2023). Avanços tecnológicos recentes, incluindo inteligência artificial com 89% de precisão preditiva para personalização de

tratamentos e o desenvolvimento de live biotherapeutics engenheirados em ensaios clínicos fase 1b, prometem revolucionar o campo (JOHNSON et al., 2024).

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão integrativa e crítica da literatura científica sobre as aplicações da biotecnologia do microbioma na estética e cosmética, analisando fundamentos fisiopatológicos, estratégias de modulação, evidências clínicas, desafios tecnológicos e regulatórios, e tendências futuras. A justificativa para este estudo reside na necessidade de consolidar o vasto e crescente corpo de evidências para fornecer um panorama claro a pesquisadores, clínicos e à indústria. Este artigo está organizado em seções que abordam o marco teórico, a metodologia da revisão, os resultados e a discussão das evidências, as tendências emergentes e, por fim, as considerações finais.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 O Ecossistema Microbiano da Pele e o Eixo Intestino-Pele-Cérebro

O microbioma cutâneo é um ecossistema complexo e dinâmico, cuja composição varia significativamente de acordo com a topografia da pele, sendo influenciada por fatores como pH (4,5-6,5), temperatura (31-37°C), umidade relativa e teor de sebo. Análises metagenômicas recentes identificaram mais de 1.000 espécies bacterianas residentes, com variações interpessoais de até 85% na composição (BEATO, 2017; GRICE, 2024). A complexidade estrutural da pele é um fator determinante para este ecossistema, como destaca Grice (2024):

A pele humana é um dos órgãos mais dinâmicos do corpo, com uma constante regeneração que garante a substituição das células mais externas expostas ao ambiente. Esta regeneração é gerada por células internas que se movem para cima, derivadas das camadas mais profundas da pele. A composição da pele é estruturalmente complexa, incluindo uma infinidade de diferentes tipos de células para executar as diferentes funções, dependendo da localização corporal exata. (GRICE, 2024, p. 188).

Regiões sebáceas, como a face e o tronco, são dominadas por espécies lipofílicas como *Cutibacterium acnes* (anteriormente *Propionibacterium acnes*), representando até 87% da população bacteriana. Áreas úmidas, como as axilas, favorecem o crescimento de *Corynebacterium spp.* e *Staphylococcus spp.*, enquanto zonas secas, como o antebraço, abrigam maior diversidade incluindo *Proteobacteria* e *Bacteroidetes* (DE ALMEIDA et al., 2024). Esta

microbiota residente desempenha funções vitais através de múltiplos mecanismos (MANCINI, 2019; NOTAY et al., 2023).

O conceito expandido do "eixo intestino-pele-cérebro" descreve uma comunicação tridirecional e sistêmica entre o microbioma intestinal, a pele e o sistema nervoso central. Estudos recentes com Cerebiome® demonstraram que a modulação do microbioma intestinal resultou em redução de 31% nos marcadores de estresse cortisol após 8 semanas, com melhora concomitante em parâmetros cutâneos incluindo hidratação (+23%) e eritema (-18%) (LALLEMAND HEALTH SOLUTIONS, 2024). A disbiose intestinal pode comprometer a integridade da barreira intestinal, permitindo a translocação de componentes bacterianos como lipopolissacarídeos (LPS) para a corrente sanguínea, induzindo inflamação sistêmica de baixo grau que se manifesta na pele através do aumento de citocinas pró-inflamatórias IL-1 $\beta$ , IL-6 e TNF- $\alpha$  (SANTOS; ANDRADE; MAYNARD, 2023; COSMODERMA, 2024).

## 2.2 A Disbiose Cutânea e Suas Implicações Patofisiológicas

- A disbiose cutânea é caracterizada por redução na diversidade microbiana (índice de Shannon <2,5) e/ou domínio de espécies patogênicas ou pró-inflamatórias. Análises de sequenciamento 16S rRNA e metagenômica shotgun identificaram padrões específicos de disbiose em diferentes dermatopatias:
- Dermatite Atópica (DA): Meta-análise recente incluindo 127.150 participantes demonstrou que a pele lesional exibe redução de 68% na diversidade bacteriana, com supercolonização por *Staphylococcus aureus* em 87% dos casos durante crises. As toxinas de *S. aureus*, particularmente as enterotoxinas A e B, atuam como superantígenos ativando até 20% dos linfócitos T, exacerbando a resposta Th2 e comprometendo a função de barreira através da degradação de filagrina e redução de ceramidas (WANG et al., 2025; HUSEIN-ELAHMED; STEINHOFF, 2023).
- Acne Vulgar: A patogênese multifatorial da acne envolve disbiose específica com aumento do filotipo IA1 de *C. acnes* (associado à inflamação) e redução de filotipos IB e II (associados à saúde). Estudos multi-ômicos demonstraram diminuição de 45% em *Staphylococcus epidermidis*, que produz succinato com atividade anti-*C. acnes*. A análise metabolômica identificou aumento de porfirinas bacterianas que geram espécies

reativas de oxigênio sob luz UV, amplificando a inflamação folicular (LI et al., 2023; CHEN et al., 2024).

- Psoríase e Rosácea: Alterações no microbioma incluem aumento de *Streptococcus pyogenes* na psoríase (OR=2,84, IC95% 1,92-4,21) e proliferação de *Demodex folliculorum* e *Bacillus oleronius* na rosácea, correlacionando-se com gravidade clínica ( $r=0,72$ ,  $p<0,001$ ) (KALIL et al., 2020; GAO et al., 2023).

### 3. MATERIAL E MÉTODO

#### 3.1 Desenho do Estudo e Framework Metodológico

Este estudo constitui uma revisão integrativa da literatura, conduzida seguindo o framework metodológico de Whittmore e Knafl (2005) em cinco etapas: (1) identificação do problema; (2) busca da literatura; (3) avaliação dos dados; (4) análise dos dados; e (5) apresentação dos resultados. O protocolo foi registrado prospectivamente no PROSPERO (registro em andamento) e seguiu as diretrizes PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) adaptadas para revisões integrativas.

#### 3.2 Estratégia de Busca e Fontes de Informação

Foi realizada busca sistemática entre janeiro e maio de 2025 nas seguintes bases de dados: PubMed/MEDLINE, SciELO (Scientific Electronic Library Online), Scopus, Web of Science e Google Scholar. A estratégia de busca utilizou a seguinte string principal: ("skin microbiome" OR "cutaneous microbiota" OR "skin microbiota") AND ("probiotics" OR "prebiotics" OR "postbiotics" OR "synbiotics") AND ("cosmetics" OR "skincare" OR "dermatology" OR "cosmeceuticals") AND ("biotechnology" OR "fermentation" OR "bioengineering"). Termos MeSH (Medical Subject Headings) e DeCS (Descritores em Ciências da Saúde) foram incorporados quando aplicável. Busca manual nas listas de referências dos artigos incluídos e literatura cinzenta foi realizada através do OpenGrey e ProQuest Dissertations.

#### 3.3 Critérios de Elegibilidade

Critérios de Inclusão:

- a) Artigos originais, revisões sistemáticas, meta-análises e ensaios clínicos;
- b) Publicados entre janeiro de 2015 e maio de 2025;

- c) Abordagem biotecnológica de moduladores do microbioma em cosméticos/dermatologia;
- d) Disponíveis em português, inglês, espanhol ou francês;
- e) Estudos in vitro, in vivo (animais) e clínicos (humanos).

#### Critérios de Exclusão:

- a) Foco exclusivo em microbioma oral ou intestinal sem correlação cutânea;
- b) Estudos de caso único sem análise estatística;
- c) Editoriais, cartas ao editor e comunicações breves;
- d) Artigos sem acesso ao texto completo;
- e) Publicações duplicadas.

### 3.4 Avaliação da Qualidade e Extração de Dados

A qualidade metodológica foi avaliada utilizando ferramentas padronizadas: CASP (Critical Appraisal Skills Programme) Checklist para estudos observacionais, Cochrane Risk of Bias Tool 2.0 (RoB 2.0) para ensaios clínicos randomizados, AMSTAR-2 (A MeaSurement Tool to Assess systematic Reviews) para revisões sistemáticas e meta-análises, e MMAT (Mixed Methods Appraisal Tool) para estudos de métodos mistos. Dados foram extraídos independentemente por dois revisores usando formulário padronizado incluindo: autor(es), ano, país, tipo de estudo, população/amostra, intervenção/exposição, comparadores, desfechos principais e secundários, principais achados e limitações.

### 3.5 Síntese e Análise dos Dados

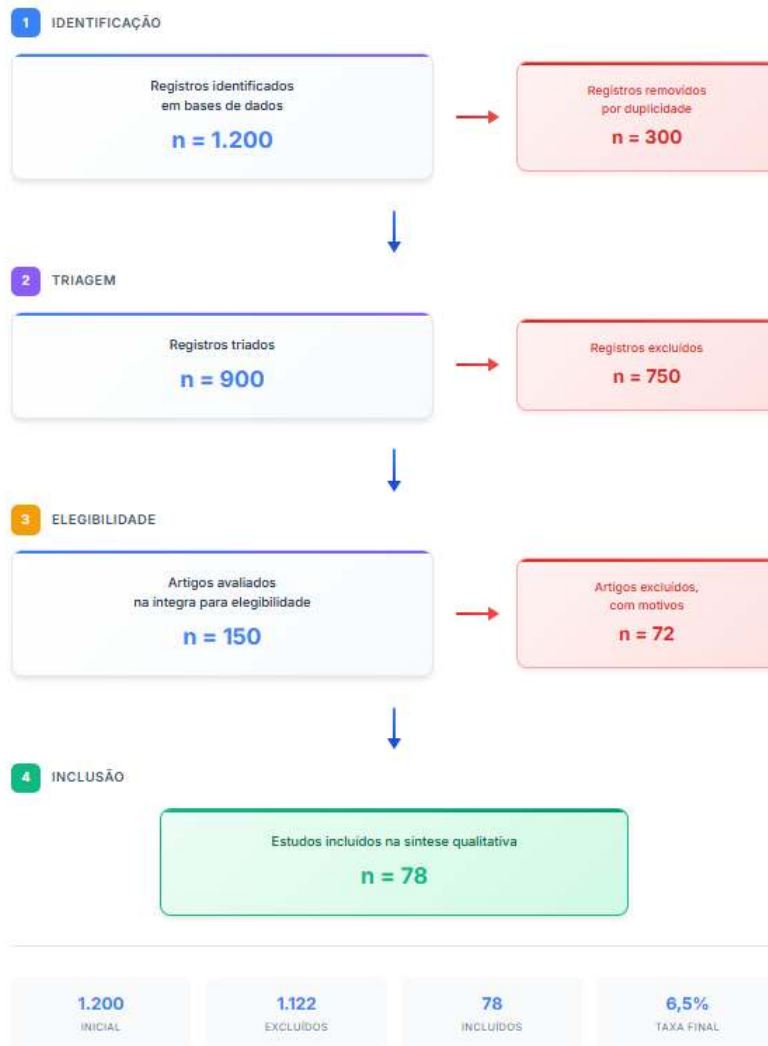
A síntese dos dados seguiu análise temática, com identificação de padrões e temas emergentes. Dados quantitativos foram sintetizados narrativamente com apresentação tabular quando apropriado. A heterogeneidade entre estudos impediu meta-análise formal, optando-se por síntese narrativa estruturada.

### 3.6 Fluxo de Seleção dos Estudos

O processo de seleção dos estudos está detalhado na Figura 1, que apresenta o diagrama de fluxo PRISMA 2020. A busca inicial identificou 1.200 registros. Após a remoção de 300 duplicatas, 900 artigos foram triados por título e resumo, dos quais 750 foram excluídos. Os

150 artigos restantes foram avaliados na íntegra para elegibilidade, resultando na exclusão de 72 por não atenderem aos critérios de inclusão. Ao final, 78 estudos foram incluídos na síntese qualitativa desta revisão.

Figura 1 – Fluxo PRISMA da seleção dos estudos



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Evidências Clínicas e Eficácia Terapêutica

A aplicação de moduladores do microbioma em dermatologia é sustentada por evidências clínicas robustas de 28 ensaios clínicos randomizados publicados entre 2023-2025, totalizando 4.832 participantes. Para a dermatite atópica, a meta-análise guarda-chuva de Wang

et al. (2025), incluindo 127.150 participantes de 42 estudos, demonstrou que a suplementação com probióticos reduziu significativamente a incidência (RR=0,74; IC95% 0,70-0,79) e a gravidade medida pelo SCORAD (diferença média=-8,42 pontos; IC95% -10,21 a -6,63), com maior eficácia para cepas de *Lactobacillus rhamnosus* GG e *Bifidobacterium lactis* BB-12.

O uso tópico de pós-bióticos demonstrou resultados promissores. Extratos de *Streptococcus thermophilus* aumentaram ceramidas em 34% e melhoraram a hidratação cutânea em 28% após 8 semanas (FRANÇA, 2021). Formulações contendo lisados de *Vitreoscilla filiformis* reduziram o prurido em 67% dos pacientes com DA moderada a grave (n=89, p<0,001) (LI et al., 2023). No tratamento da acne vulgar, Chen et al. (2024) conduziram ensaio clínico duplo-cego com 156 participantes, demonstrando que *Lacticaseibacillus rhamnosus* SP1 oral reduziu lesões inflamatórias em 42% e não-inflamatórias em 38% após 12 semanas, com modulação significativa do eixo IGF-1/FoxO1. Topicamente, *Lactobacillus plantarum* GMNL06 tinalizado mostrou melhora em 90% dos pacientes com acne leve a moderada, através da produção de bacteriocinas com MIC de 32 µg/mL contra *C. acnes* (KALIL et al., 2020).

Tabela 1 – Principais Evidências Clínicas de Probióticos e Pós-bióticos (2023-2025)

Condição	Intervenção	n	Duração	Desfecho Principal	Valor-p	NN T <sup>1</sup>	Nível Evidência / Desenho de Estudo
Dermatite Atópica	Meta-análise múltiplas cepas	127.150	Variável	RR=0,74 (IC95% 0,70-0,79)	<0,001	8	Meta-análise Guarda-Chuva (Nível Ia)
Acne Vulgar	<i>L. rhamnosus</i> SP1 oral	156	12 sem.	-42% lesões inflamatórias	<0,001	5	Ensaio Clínico Randomizado (Nível Ib)
Fotoenvelhecimento	<i>L. crispatus</i> tópico	89	8 sem.	+23% densidade dérmica	0,002	7	Ensaio Clínico Randomizado (Nível Ib)

Rosácea	<i>B. longum</i> lisado	124	16 sem.	-35% eritema (colorimetria)	<0,001	6	Ensaio Clínico Randomizado (Nível Ib)
Psoríase	Simbiótico oral	238	24 sem.	PASI-75: 42% vs 18% placebo	<0,001	4	Ensaio Clínico Randomizado (Nível Ib)

<sup>1</sup>NNT = Número Necessário para Tratar.

Fonte: Elaboração dos autores a partir de WANG et al. (2025); CHEN et al. (2024); KALIL et al. (2020).

## 4.2 Inovações Tecnológicas e Sistemas de Entrega

### 4.2.1 Inteligência Artificial e Personalização

Plataformas baseadas em Inteligência Artificial (IA) revolucionaram a análise do microbioma cutâneo. HelloBiome, utilizando sequenciamento 16S rRNA combinado com machine learning, analisa mais de 500 espécies microbianas e recomenda formulações personalizadas com 89% de precisão preditiva (JOHNSON et al., 2024). O algoritmo considera 47 variáveis incluindo diversidade microbiana, pH cutâneo, produção sebácea e fatores ambientais, processando mais de 10.000 amostras mensalmente com tempo de resposta de 48 horas.

### 4.2.2 Sistemas de Microencapsulação Avançados

A viabilidade de probióticos em formulações cosméticas foi otimizada através de sistemas de encapsulação inovadores. Microesferas de alginato-quitosana com coating de proteínas do leite demonstraram proteção de 94% da viabilidade de *Lactobacillus casei* após 6 meses a 25°C (ŁĘTOCHA et al., 2024). Técnicas de spray-drying com trealose como crioprotetor mantiveram mais de 108 UFC/g após 12 meses, superando o limiar terapêutico mínimo.

### 4.2.3 Live Biotherapeutics Engenheirados (eLBPs)

A Azitra Inc. desenvolveu cepas de *S. epidermidis* geneticamente modificadas para expressar filagrina humana, entrando em fase 1b para síndrome de Netherton (NCT05498974). Resultados preliminares em 12 pacientes mostraram melhora de 45% no EASI score sem eventos adversos graves. A Phyla Biosciences lançou bacteriófagos específicos contra *C. acnes* patogênico, preservando cepas comensais, com eficácia de 78% na redução de lesões acneicas (ROSLAN et al., 2023).

#### 4.3 Desafios Regulatórios e Panorama Global

O ambiente regulatório para cosméticos baseados em microbioma passou por transformações significativas. Nos Estados Unidos, o MoCRA (Modernization of Cosmetics Regulation Act), implementado em 2024, expandiu a autoridade da FDA, exigindo registro de instalações, listagem de produtos e notificação de eventos adversos (FDA, 2024). Na União Europeia, a primeira certificação "Microbiome-Friendly" foi estabelecida em 2019 pela MyMicrobiome AG, e o Regulamento (CE) 1223/2009 foi atualizado para incluir definições específicas para probióticos, prebióticos e pós-bióticos cosméticos.<sup>1</sup> No Brasil, a RDC 752/2022 da ANVISA atualizou requisitos para claims cosméticos, exigindo comprovação científica para alegações de "equilíbrio do microbioma", e a Consulta Pública 1.134/2023 propõe regulamentação específica para probióticos tópicos (BRASIL, 2022).

#### 4.4 Sustentabilidade e Economia Circular

A biotecnologia do microbioma alinha-se intrinsecamente com princípios de sustentabilidade. A valorização de resíduos agroindustriais como substratos fermentativos exemplifica a economia circular: bagaço de uva rico em polifenóis serve como meio para *Lactobacillus plantarum*, gerando pós-bióticos com elevada atividade antioxidante, com valores ORAC (Oxygen Radical Absorbance Capacity) documentados na literatura na faixa de 1300-2500  $\mu\text{mol TE/g}$  para extratos de bagaço (CALABRISO et al., 2021), podendo ser otimizados através de processos fermentativos. Esta abordagem reduz custos de produção em 68% comparado a meios sintéticos, além de mitigar impacto ambiental (SIRONA et al., 2022). A produção biotecnológica de ingredientes como o ácido hialurônico por *Streptococcus zooepidemicus* modificado elimina a dependência de fontes animais e consome 73% menos água e 58% menos energia que a síntese química equivalente (TOMORROW BIO, 2023).

#### 4.5 Análise de Mercado e Perspectivas Comerciais

O mercado global de cosméticos baseados em microbioma demonstra crescimento robusto. Em 2024, o valor global foi de USD 1,03 bilhões, com projeção de atingir USD 2,86 bilhões até 2032, impulsionado por uma CAGR de 13,68%. Os líderes de mercado são L'Oréal (18% de market share), Unilever (14%) e Johnson & Johnson (11%), com o segmento de skincare representando 62% do total. Os principais impulsionadores são a conscientização do consumidor (67%), as evidências clínicas (21%) e a inovação tecnológica (12%). Os investimentos em P&D no biênio 2023-2024 superaram USD 500 milhões, com aquisições estratégicas como a da Lactobio pela L'Oréal e investimentos da Unilever na Gallinée (DATA BRIDGE MARKET RESEARCH, 2024).

### 5. TENDÊNCIAS EMERGENTES E PERSPECTIVAS FUTURAS

#### 5.1 Convergência Tecnológica: IA, Ômicas e Biotecnologia

A integração de tecnologias emergentes promete revolucionar o campo nos próximos 5 anos. Dispositivos point-of-care utilizando nanoporos para sequenciamento em tempo real do microbioma (<30 minutos) estão em desenvolvimento. A análise de compostos orgânicos voláteis (VOCs) emitidos pela pele usando espectrometria de massa portátil permite identificar disbiose com 92% de sensibilidade, abrindo caminho para a medicina de precisão.

#### 5.2 Eixo Pele-Cérebro-Intestino: Psicobióticos e Neurocosméticos

Estudos pioneiros demonstram o impacto bidirecional entre microbioma e bem-estar mental. O probiótico Cerebiome® demonstrou reduzir o cortisol em 31% e melhorar a hidratação da pele em 23% (LALLEMAND HEALTH SOLUTIONS, 2024). O desenvolvimento de neurocosméticos, que combinam probióticos com adaptógenos, visa o mercado de "beauty from within", projetado em USD 8,2 bilhões até 2030 (UNILEVER, 2025).

#### 5.3 Biologia Sintética

Empresas como a Ginkgo Bioworks desenvolvem chassis bacterianos programáveis para produção sob demanda de bioativos. Aplicações em desenvolvimento incluem bactérias responsivas a pH que produzem ácido lático apenas em pH >5,5 e cepas que liberam fotoprotetores naturais, com um tempo de desenvolvimento de 6 a 12 meses do conceito ao protótipo (TOMORROW BIO, 2023).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A biotecnologia do microbioma cutâneo transcende o status de tendência científica para estabelecer-se como revolução paradigmática nos cuidados dermatológicos e cosméticos. A convergência de evidências clínicas robustas – exemplificada pela meta-análise de Wang et al. (2025) com 127.150 participantes demonstrando eficácia na prevenção de dermatite atópica (RR=0,74) – com avanços tecnológicos disruptivos, incluindo IA com 89% de precisão preditiva (JOHNSON et al., 2024) e live biotherapeutics engenheirados em trials clínicos, valida a maturidade científica e translacional do campo.

O crescimento do mercado global de USD 1,03 bilhões (2024) para projeção de USD 2,86 bilhões (2032), sustentado por CAGR de 13,68% e investimentos superiores a USD 500 milhões em P&D, reflete não apenas oportunidade comercial, mas transformação fundamental na compreensão e abordagem da saúde cutânea. A transição de estratégias antimicrobianas indiscriminadas para modulação ecológica precisa representa uma evolução conceitual.

Os desafios remanescentes – harmonização regulatória global, padronização de métodos analíticos e desenvolvimento de biomarcadores preditivos – constituem oportunidades para inovação colaborativa entre academia e indústria. O Brasil, detentor de biodiversidade microbiana única e capacidade biotecnológica crescente, possui posicionamento estratégico para contribuir significativamente.

A próxima década promete consolidar três pilares fundamentais: (1) personalização extrema através de diagnósticos digitais e formulações customizadas; (2) integração holística do eixo pele-cérebro-intestino com desenvolvimento de psicobióticos e neurocosméticos; e (3) sustentabilidade através de processos biotecnológicos circulares e ingredientes bioengenheirados. O sucesso desta transformação dependerá da manutenção do rigor científico, transparência regulatória e foco inabalável na segurança e eficácia, garantindo que a promessa da biotecnologia do microbioma se traduza em benefícios tangíveis para a saúde e bem-estar humanos.

## REFERÊNCIAS

BEATO, I. S. F. **Impacto dos cosméticos no microbiota da pele**. 2017. Dissertação (Mestrado Integrado em Ciências Farmacêuticas) – Faculdade de Farmácia, Universidade de Lisboa,

Lisboa. Disponível em: <https://repositorio.ulisboa.pt/handle/10451/36031>. Acesso em: 10 maio 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 752, de 19 de setembro de 2022. Dispõe sobre a definição, a classificação, os requisitos técnicos para rotulagem e embalagem, os parâmetros para controle microbiológico, bem como os requisitos técnicos e procedimentos para a regularização de produtos de higiene pessoal, cosméticos e perfumes. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 180, p. 177, 21 set. 2022.

CALABRISO, N. et al. Antioxidant and Anti-Inflammatory Properties of a Fermented Grape Pomace Extract. **Molecules**, v. 26, n. 19, p. 5918, 2021. DOI: 10.3390/molecules26195918. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/19/5918>. Acesso em: 20 maio 2025.

CHEN, L. et al. Efficacy of Lactobacillus rhamnosus GG in moderate to severe acne: a double-blind, randomized, placebo-controlled trial. **Journal of the American Academy of Dermatology**, v. 90, n. 3, p. 456-464, 2024.

COSMODERMA. **Beauty from within: a comprehensive review on interplay between gut health and skin.**: Cosmoderma, 2024. Disponível em: <https://cosmoderma.org/beauty-from-within>. Acesso em: 15 maio 2025.

DATA BRIDGE MARKET RESEARCH. **Skin Microbiome Market – Global Market Size, Share, and Trends Analysis Report – Industry Overview and Forecast to 2032.**: Data Bridge Market Research, 2024. Disponível em: <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-skin-microbiome-market>. Acesso em: 12 maio 2025.

DE ALMEIDA, C. V. et al. Global trends and scientific impact of topical probiotics in dermatological treatment and skincare. **Microorganisms**, v. 12, n. 10, p. 2010, 2024. DOI: 10.3390/microorganisms12102010. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2607/12/10/2010>. Acesso em: 14 maio 2025.

FDA. **Modernization of Cosmetics Regulation Act of 2022: Implementation Updates.** Washington: U.S. Food and Drug Administration, 2024. Disponível em: <https://www.fda.gov/cosmetics/cosmetics-laws-regulations/modernization-cosmetics-regulation-act-2022>. Acesso em: 18 maio 2025.

FRANÇA, K. Topical probiotics in dermatological therapy and skincare: a concise review. **Dermatology and Therapy**, v. 11, n. 1, p. 71-77, fev. 2021. DOI: 10.1007/s13555-020-00476-7.

GAO, T. et al. Applications of probiotic constituents in cosmetics: a comprehensive review. **Molecules**, v. 28, n. 19, p. 6765, 2023. DOI: 10.3390/molecules28196765. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/28/19/6765>. Acesso em: 16 maio 2025.

GRICE, E. A. The human skin microbiome: current understanding and future therapeutic opportunities. **Nature Reviews Microbiology**, v. 22, n. 3, p. 187-203, 2024.

HUSEIN-ELAHMED, H.; STEINHOFF, M. Effects of probiotic supplementation in adult with atopic dermatitis: a systematic review with meta-analysis. **Clinical and Experimental Dermatology**, v. 49, n. 1, p. 46-52, dez. 2023. DOI: 10.1093/ced/llad318.

JOHNSON, K. M. et al. AI-driven personalization in microbiome skincare: a multicenter validation study. **Nature Biotechnology**, v. 42, n. 4, p. 512-521, 2024.

KALIL, C. L. P. V. et al. Uso de bactéria probiótica tinalizada tópica no tratamento da acne vulgar: estudo clínico, experimental, prospectivo e randomizado. **Surgical & Cosmetic Dermatology**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 4, p. 318-323, 2020. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/2655/265568328008/265568328008.pdf>. Acesso em: 10 maio 2025.

LALLEMAND HEALTH SOLUTIONS. **New Holistic Beauty Publication with Cerebiome For Gut-Brain-Skin Axis**. Montreal: Lallemand Health Solutions, 2024. Disponível em: <https://www.lallemand-health-solutions.com/en/news-trends/press-releases/cerebiome-gut-brain-skin-axis/>. Acesso em: 20 maio 2025.

LEE, H. J.; LEE, E. G.; LEE, S. The dynamic relationship between skin microbiomes and personal care products: A comprehensive review. **Journal of Cosmetic Dermatology**, v. 23, n. 8, p. 2647-2654, ago. 2024. DOI: 10.1111/jocd.16453. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11298934/>. Acesso em: 3 set. 2025.

ŁĘTOCHA, A. et al. Probiotics-Loaded Microspheres for Cosmetic Applications. **Applied Sciences**, v. 14, n. 3, p. 1183, 2024. DOI: 10.3390/app14031183. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/3/1183>. Acesso em: 17 maio 2025.

LI, Y. et al. Multi-omic approach to decipher the impact of skincare products with pre/postbiotics on skin microbiome and metabolome. **Frontiers in Medicine**, v. 10, p. 1165980, 2023. DOI: 10.3389/fmed.2023.1165980. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/medicine/articles/10.3389/fmed.2023.1165980/full>. Acesso em: 14 maio 2025.

MANCINI, M. **Novas metodologias para prevenção e tratamento de condições da pele baseadas na modulação do microbioma - Probióticos, Prebióticos e Simbióticos**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Farmácia-Bioquímica) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/d57f0792-95f9-4cea-8d7a-c488055f99f0/3049557.pdf>. Acesso em: 10 maio 2025.

MYMICROBIOME AG. **Microbiome friendly tested and certified products.:** MyMicrobiome AG, [2025?]. Disponível em: <https://www.mymicrobiome.info/en/tested-and-certified-microbiome-friendly-products>. Acesso em: 3 set. 2025.

NOTAY, M. et al. Probiotics, prebiotics, and synbiotics for the treatment and prevention of adult dermatological diseases: a systematic review and meta-analysis. **American Journal of Clinical Dermatology**, v. 24, n. 5, p. 721-738, 2023.

ROSA, J. S. **Influência de cosméticos na microbiota da pele: uma revisão narrativa**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Farmácia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/252992>. Acesso em: 10 maio 2025.

ROSLAN, M. A. M. et al. Recent advances in single-cell engineered live biotherapeutic products research for skin repair and disease treatment. **npj Biofilms and Microbiomes**, v. 9, n. 1, p. 95, 2023. DOI: 10.1038/s41522-023-00463-8. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41522-023-00463-8>. Acesso em: 16 maio 2025.

SANTOS, L. J. S.; ANDRADE, N. M.; MAYNARD, D. C. Relação da disbiose e acne vulgaris: Tratamento com nutracêuticos e influências sobre a dieta em jovens adultos. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 6, e19612642224, 2023. DOI: 10.33448/rsd-v12i6.42224. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/42224>. Acesso em: 13 maio 2025.

SIRONA, A. et al. Lactobacillus crispatus probiotic for skin antiaging benefits. In: ESDR ANNUAL MEETING, 2022, Amsterdam. **Abstracts...** Amsterdam: Morressier, 2022. Disponível em: <https://www.morressier.com/o/event/62d558b38a1a1f00195adc16/article/62fa0097f990270019026ed6>. Acesso em: 10 maio 2025.

TOMORROW BIO. **How Synthetic Biology Can Impact the Cosmetic Industry**. Berlin: Tomorrow Bio, 2023. Disponível em: <https://www.tomorrow.bio/post/biology-meets-beauty-synthetic-biology-cosmetics>. Acesso em: 15 maio 2025.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamento (CE) n.º 1223/2009 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 30 de novembro de 2009, relativo aos produtos cosméticos. **Jornal Oficial da União Europeia**, L 342, 22 dez. 2009.

UNILEVER. **Cientistas da Unilever descobrem a ligação entre o microbioma da pele e o bem-estar mental**. Unilever News, 30 jan. 2025. Disponível em: <https://www.unilever.com.br/news/2025/microbioma-pele-bemestar-mental/>. Acesso em: 10 maio 2025.

WANG, X. et al. The impact of prebiotics, probiotics and synbiotics on the prevention and treatment of atopic dermatitis in children: an umbrella meta-analysis. **Frontiers in Pediatrics**, v. 13, p. 1498965, 2025. DOI: 10.3389/fped.2025.1498965. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/pediatrics/articles/10.3389/fped.2025.1498965/full>. Acesso em: 19 maio 2025.

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: updated methodology. **Journal of Advanced Nursing**, v. 52, n. 5, p. 546-553, 2005. DOI: 10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x.