

ORGANIZADOR: Rafael Castoldi

Conversando sobre **Meio Ambiente e Saúde:** uma abordagem popular

Volume III

M
MÉRIDA
PUBLISHERS



ORGANIZADOR: Rafael Castoldi

Conversando sobre

meio ambiente e saúde:

uma abordagem popular

VOLUME III

Canoas
2026



Conversando sobre meio ambiente e saúde: uma abordagem popular volume III

© 2026 Mérida Publishers

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5>

Organizador

Rafael Castoldi

Adaptação da capa e desenho gráfico

José Luis Guzmán



Canoas - RS - Brasil

contact@meridapublishers.com

www.meridapublishers.com

Todos os direitos autorais pertencem a Mérida Publishers. A reprodução total ou parcial dos trabalhos publicados, é permitida desde que sejam atribuídos créditos aos autores.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

C765 Conversando sobre meio ambiente e saúde [livro eletrônico] : uma abordagem popular. Vol. III / organização Rafael Castoldi. – 1. ed. – Canoas, RS: Mérida Publishers, 2026.
il. color. – (Conversando sobre meio ambiente e saúde; v. 3)

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-84548-43-5

1. Meio ambiente – Sustentabilidade. 2. Saúde pública – Educação popular. 3. Bioquímica – Alimentação saudável. 4. Ecologia – Impactos ambientais. 5. Educação ambiental – Brasil. I. Castoldi, Rafael.

CDD 363.7

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Equipe editorial

Editor Chefe

Prof. Dr. Luis Guillermo Ramírez Mérida
Universidad de Carabobo (UC), Venezuela.

Comitê Editorial

Prof^a. MSc. Alba Morón de Salim
Universidad de Carabobo (UC), Venezuela.

Prof^a. Dr^a. Carla Rosane Barboza Mendonça
Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Brasil.

Prof^a. Dr^a. Caroline Dellinghausen Borges
Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Brasil.

Prof^a. Dr^a. Flávia Michelin Dalla Nora
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil.

Dr^a. Ihana Aguiar Severo
Universidade Federal do Paraná (UFPR), Brasil.

Dr. Joceli Augusto Gross
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil.

Dr. José Bruno Malaquias
Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Brasil.

Dr. Luis Manuel Hernández García
Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), Brasil.

Prof^a. Dr^a. Neila Silvia Pereira dos Santos Richards
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil.

Prof. Dr. Rafael Fernández da Silva
Universidad de Carabobo (UC), Venezuela.

Prof. Dr. Richard Alberto Rodríguez Padrón
Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC), Uruguay.

Prof^a. Dr^a. Tassiane dos Santos Ferrão
Instituto Federal Farroupilha (IFFar), Brasil.

Apresentação

A democratização do conhecimento é o verdadeiro motor da evolução social. Com essa premissa, o terceiro volume da série *Conversando sobre meio ambiente e saúde*: uma abordagem popular dá continuidade à sua missão fundamental: desmistificar a ciência e aproximá-la do cotidiano de todos.

Focado na intersecção vital entre o equilíbrio ecológico e o bem-estar humano, este livro converte discussões tradicionalmente acadêmicas em uma leitura cativante, fluida e acessível. A obra não se limita a informar, mas busca capacitar o leitor, oferecendo ferramentas para que cada indivíduo assuma um papel ativo, crítico e consciente na defesa do saber científico em seu dia a dia.

Ao traduzir a complexidade dos laboratórios e centros de pesquisa para uma linguagem que ressoa com a sociedade, este volume reafirma que a ciência só cumpre seu propósito pleno quando é compartilhada. É um convite para entender que cuidar do planeta é, indissociavelmente, cuidar de nós mesmos.

Autores

Alice Bianchi de Oliveira

Mestranda do Programa de Pós graduação em Bioquímica.

Alissa Borges de Oliveira

Mestranda em Ciências Biológicas (Biologia Celular e Molecular) pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Maringá.

Ana Luiza Carvalho Vieira

Mestranda em Ciências Biológicas (Biologia Celular e Molecular) pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Maringá.

Ayla Rodrigues Trindade

Mestranda do Programa de Pós graduação em Bioquímica.

Daniel Caligari

Mestre e doutorando em Biologia Celular e Molecular pela Universidade Estadual de Maringá - UEM. Sócio e Diretor de P&D na Startup HLX Biotecnologia.

Danielly Maria Paixão Novi

Mestre pelo Programa de Pós graduação em Bioquímica pela Universidade Estadual de Maringá.

Gabriel Machado de Freitas

Mestrando em Ciências Biológicas (Biologia Celular e Molecular) pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Maringá.

Karina Goes dos Santos Borges

Mestranda em Ciências Biológicas (Biologia Celular e Molecular) pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Maringá.

Laura Bernardita Mallqui Vega

Mestranda em bioquímica (Programa de pós graduação em bioquímica).

Lucas Haruo Nakayama Pereira

Mestrando em Ciências Biológicas (Biologia Celular e Molecular) pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Maringá.

Luiz Gabriel Moreira Santos

Programa de Pós Graduação em Bioquímica.

Milena Kazue Enokida

Mestranda do Programa de Pós graduação em Bioquímica.

Rafaela Marcondes Hasse

Mestranda em Ciências Biológicas (Biologia Celular e Molecular) pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Maringá.

Rhuan Ribeiro dos Reis

Mestrando em Ciências Biológicas (Biologia Celular e Molecular) pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Maringá.

Suellen Cristina dos Passos

Mestra e doutoranda em ciências biológicas (Programa de pós graduação em biologia celular e molecular).

Vinicius Franco de Oliveira

Mestrando em Ciências Biológicas (Biologia Celular e Molecular) pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Maringá

Índice

CAPÍTULO 1.....	11
O estresse e o corpo: quando a mente adoece o físico	
Alice Bianchi de Oliveira	
CAPÍTULO 2.....	22
Como o solo e os microrganismos ajudam a planta a produzir energia	
Alissa Borges de Oliveira	
CAPÍTULO 3.....	34
Ingestão de microplásticos: uma perspectiva ambiental e da saúde	
Ana Luiza Carvalho Vieira	
CAPÍTULO 4.....	41
Bioquímica dos Bioinsumos: Ação de Microrganismos na Agricultura Sustentável	
Ayla Rodrigues Trindade	
CAPÍTULO 5.....	51
O fluxo energético da vida	
Daniel Caligari	
CAPÍTULO 6.....	61
O uso industrial das enzimas: ênfase na lacase	
Danielly Maria Paixão Novi	
CAPÍTULO 7.....	73
Bioquímica do clima: como o calor e o CO₂ alteram o metabolismo da vida	
Gabriel Machado de Freitas	

CAPÍTULO 8..... 88

Microflorestas Urbanas: entendendo a ciência por trás das pequenas florestas nas cidades

Karina Goes dos Santos Borges

CAPÍTULO 9..... 104

Plantas que cuidam da saúde: o poder oculto do *Lupinus mutabilis* (Tarwi)

Laura Bernardita Mallqui Vega

CAPÍTULO 10..... 118

Metabolômica: uso na agricultura para estudo de doenças em plantas

Lucas Haruo Nakayama Pereira

CAPÍTULO 11..... 131

Armadilhas Modernas: O Impacto dos Novos Hábitos Alimentares em um Corpo Ancestral (ou "*Hábitos Alimentares e Dietas da Moda*")

Luiz Gabriel Moreira Santos

CAPÍTULO 12..... 142

A Bioquímica da Juventude e da Proteção: A Cooperação entre Colágeno, Aminoácidos e Antioxidantes

Milena Kazue Enokida

CAPÍTULO 13..... 153

RNA: Para além de uma molécula a serviço do DNA

Rafaela Marcondes Hasse

CAPÍTULO 14..... 165

Bioquímica dos Bioinsumos: Como os microrganismos transformam o solo

Rhuan Ribeiro dos Reis

CAPÍTULO 15..... 179

Além das Calorias: Como a microbiota intestinal contribui para a regulação do peso corporal e obesidade

Suellen Cristina dos Passos

CAPÍTULO 16..... 190

Como armazenamos informação? O peso ambiental da nuvem

Vinicius Franco de Oliveira

CAPÍTULO 1

O estresse e o corpo: quando a mente adoece o físico

Alice Bianchi de Oliveira

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c1>

Resumo

Este capítulo aborda a profunda ligação entre a mente e o corpo, focando-se no impacto do estresse. Embora o estresse agudo seja uma resposta de sobrevivência natural e essencial, a sua forma crônica sobrecarrega o organismo. A ativação prolongada do eixo hipotálamo-hipófise-adrenal resulta na liberação excessiva de cortisol e de mediadores inflamatórios, prejudicando progressivamente os sistemas imunitário, cardiovascular, neurológico e metabólico. O texto detalha, de forma acessível, os mecanismos bioquímicos que traduzem a tensão psicológica persistente em doenças físicas, destacando ainda a influência direta na microbiota intestinal. Por fim, apresenta estratégias de proteção baseadas em evidências científicas — como a regulação do sono, o exercício físico, a nutrição adequada e o apoio social —, fundamentais para mitigar os danos celulares, restabelecer o equilíbrio fisiológico e promover uma saúde integrada.

Palavras-chave: Estresse crônico; Cortisol; Ligação mente-corpo; Inflamação.

Abstract

This chapter addresses the profound connection between mind and body, focusing on the impact of stress. Although acute stress is a natural and essential survival response, its chronic form overloads the organism. The prolonged activation of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis results in the excessive release of cortisol and inflammatory mediators, progressively impairing the immune, cardiovascular, neurological, and metabolic systems. The text details, in an accessible manner, the biochemical mechanisms that translate persistent psychological tension into physical diseases, also highlighting its direct influence on the gut microbiota. Finally, it presents protective strategies based on scientific evidence—such as sleep regulation, physical exercise, proper nutrition, and social support—which are essential to mitigate cellular damage, restore physiological balance, and promote integrated health.

Keywords: Chronic stress; Cortisol; Mind-body connection; Inflammation.

1. Introdução

Todo mundo já sentiu estresse. Ele aparece antes de uma prova importante, em momentos de sobrecarga no trabalho, diante de problemas familiares ou de situações inesperadas. Em pequenas doses, o estresse é natural e até necessário para a sobrevivência. O problema surge quando ele deixa de ser pontual e passa a fazer parte da rotina. Nesse cenário, aquilo que começa na mente pode, pouco a pouco, se manifestar no corpo, favorecendo o surgimento de doenças físicas.

Durante muito tempo, a ciência separou mente e corpo como se fossem sistemas independentes. Hoje, essa visão não se sustenta mais. Pesquisas em bioquímica, neurociência e fisiologia mostram que pensamentos, emoções e experiências psicológicas são capazes de alterar profundamente o funcionamento do organismo. Hormônios, neurotransmissores, células do sistema imunológico e vias metabólicas respondem diretamente ao estresse psicológico.

Aqui, vamos entender de forma simples e acessível como o estresse atua no organismo, quais são os principais mecanismos bioquímicos envolvidos e por que o estresse crônico pode contribuir para o desenvolvimento de diversas doenças. O objetivo é traduzir conceitos científicos complexos para uma linguagem clara, sem perder o rigor científico.

2. O que é estresse?

O estresse é uma resposta natural do corpo diante de situações percebidas como desafiadoras ou ameaçadoras. Ele não depende apenas do evento em si, mas da forma como o indivíduo interpreta essa situação. O mesmo acontecimento pode ser vivido como um grande estressor por uma pessoa e como algo manejável por outra.

Do ponto de vista biológico, o estresse é um conjunto de reações coordenadas que prepara o organismo para agir rapidamente. Essa resposta ficou conhecida como “luta ou fuga”, um mecanismo evolutivo que aumentava as chances de sobrevivência diante de perigos reais, como predadores.

O médico Hans Selye, considerado o pai dos estudos sobre estresse, definiu o estresse como uma resposta inespecífica do organismo a qualquer demanda que lhe seja imposta. Isso significa que o corpo reage de forma semelhante tanto a um perigo físico quanto a um problema emocional.

3. Estresse agudo e estresse crônico

Nem todo estresse é prejudicial. O estresse agudo é aquele de curta duração, que surge diante de situações pontuais e desaparece após a resolução do problema. Ele pode melhorar o foco, a atenção e o desempenho, funcionando como um estímulo adaptativo.

Um exemplo cotidiano é o frio na barriga antes de uma apresentação importante. Nesse caso, o estresse ajuda a manter a atenção e a prontidão. Após o evento, o corpo retorna ao equilíbrio.

O estresse crônico, por outro lado, ocorre quando a ativação do sistema de estresse se mantém por longos períodos, sem tempo adequado para recuperação. Problemas financeiros persistentes, conflitos emocionais, excesso de trabalho e falta de descanso são exemplos comuns.

Nesse cenário, o organismo permanece em estado constante de alerta, como se estivesse sempre esperando uma ameaça. Esse funcionamento contínuo leva ao desgaste progressivo dos sistemas fisiológicos, favorecendo o surgimento de doenças.

4. Como o cérebro percebe o estresse

Tudo começa no cérebro. Quando uma situação é interpretada como ameaçadora, regiões cerebrais específicas entram em ação. A amígdala, uma estrutura relacionada às emoções, desempenha papel central nessa avaliação. Ao identificar perigo, ela envia sinais para outras áreas do cérebro.

O hipotálamo funciona como uma ponte entre o sistema nervoso e o sistema endócrino. Ele recebe as informações emocionais e ativa respostas corporais automáticas. A partir desse ponto, duas grandes vias são acionadas: o sistema nervoso simpático e o eixo hipotálamo-hipófise-adrenal.

5. Sistema nervoso simpático: resposta imediata

A ativação do sistema nervoso simpático é rápida. Ela promove a liberação de adrenalina e noradrenalina pelas glândulas suprarrenais. Esses hormônios aumentam a frequência cardíaca, elevam a pressão arterial e direcionam mais sangue para os músculos.

Do ponto de vista bioquímico, essas substâncias estimulam a quebra de glicogênio em glicose, garantindo energia rápida. O corpo se prepara para agir, mesmo que o “perigo” seja apenas uma preocupação mental.

6. Eixo hipotálamo-hipófise-adrenal e o cortisol

Quando o estresse persiste, entra em cena o eixo hipotálamo-hipófise-adrenal, conhecido como eixo HHA. O hipotálamo libera o hormônio liberador de corticotropina, que estimula a hipófise a secretar o hormônio adrenocorticotrófico. Esse, por sua vez, induz as suprarrenais a produzirem cortisol.

O cortisol é conhecido como o principal hormônio do estresse. Ele tem funções importantes, como aumentar a disponibilidade de glicose, modular o sistema imunológico e ajudar o corpo a lidar com situações difíceis. Em curto prazo, esses efeitos são benéficos.

O problema surge quando o cortisol permanece elevado por muito tempo.

7. O cortisol e seus efeitos no organismo

O excesso de cortisol afeta diversos sistemas do corpo. No metabolismo, ele favorece o aumento da glicose no sangue, contribuindo para resistência à insulina. Isso explica por que o estresse crônico está associado ao maior risco de diabetes tipo 2.

No tecido muscular, o cortisol estimula a quebra de proteínas, levando à perda de massa muscular. No tecido adiposo, favorece o acúmulo de gordura, especialmente na região abdominal.

Além disso, o cortisol interfere no sono, no humor e na memória. Pessoas estressadas cronicamente costumam relatar cansaço constante, dificuldade de concentração e irritabilidade.

8. Estresse e o sistema imunológico

O sistema imunológico é altamente sensível ao estresse psicológico. Em situações agudas, o estresse pode até melhorar temporariamente a resposta imune, preparando o corpo para possíveis ferimentos ou infecções. Esse efeito, porém, é curto e controlado.

Quando o estresse se torna crônico, o efeito se inverte. O excesso de cortisol e de mediadores inflamatórios altera a comunicação entre as células de defesa. Com o tempo, o sistema imunológico passa a funcionar de maneira desregulada: ora responde pouco, ora reage em excesso.

De forma simples, é como um exército que recebe ordens confusas. Em alguns momentos, ele não consegue combater invasores adequadamente, aumentando a frequência de infecções. Em outros, ataca o próprio organismo, favorecendo doenças autoimunes e processos inflamatórios persistentes.

Esse desequilíbrio ajuda a explicar por que pessoas submetidas a estresse prolongado adoecem com mais facilidade, demoram mais para se recuperar e apresentam maior risco de agravamento de doenças já existentes.

9. Estresse, inflamação e doenças crônicas

A inflamação crônica funciona como um elo central entre o estresse psicológico prolongado e o surgimento de diversas doenças físicas. Em situações normais, a inflamação é um mecanismo de defesa essencial, acionado para combater infecções ou reparar tecidos lesionados. O problema ocorre quando esse processo deixa de ser pontual e passa a se manter ativo continuamente, mesmo sem uma ameaça real.

Sob estresse crônico, o organismo passa a liberar de forma persistente citocinas inflamatórias, como interleucina-6 e fator de necrose tumoral alfa. Em termos simples, essas substâncias funcionam como “mensageiros químicos” que

avisam ao corpo que algo está errado. Quando esses sinais não cessam, eles começam a causar danos.

Um exemplo do cotidiano ajuda a entender esse processo: é como se o corpo estivesse com um alarme de incêndio ligado o tempo todo. No início, o alarme protege, mas, com o passar do tempo, o barulho constante causa desgaste, estresse adicional e prejuízo ao funcionamento do ambiente.

Essa inflamação persistente afeta diretamente os vasos sanguíneos, favorecendo o endurecimento das artérias e o aumento da pressão arterial. Por isso, pessoas submetidas a altos níveis de estresse apresentam maior risco de desenvolver hipertensão e doenças cardiovasculares. Além disso, o estado inflamatório contribui para dores musculares, fadiga crônica e piora de doenças autoimunes.

10. Estresse e o cérebro

O cérebro é um dos órgãos mais sensíveis aos efeitos do estresse prolongado. Níveis elevados e persistentes de cortisol afetam estruturas cerebrais importantes, especialmente o hipocampo, região responsável pela memória, aprendizado e regulação emocional.

De forma simples, o cortisol em excesso dificulta a formação de novas conexões entre os neurônios. Isso ajuda a explicar por que pessoas muito estressadas costumam relatar esquecimento, dificuldade de concentração e sensação de "mente cansada". É como tentar aprender algo novo enquanto um ruído constante impede o foco.

Além disso, o estresse altera o equilíbrio de neurotransmissores como serotonina, dopamina e noradrenalina. Essas substâncias químicas regulam o humor, a motivação e a sensação de prazer. Quando estão desequilibradas, aumentam as chances de surgimento de ansiedade, irritabilidade e depressão.

Outro ponto importante é que o estresse reduz a chamada neuroplasticidade, ou seja, a capacidade do cérebro de se adaptar e se reorganizar. Isso torna o indivíduo menos flexível emocionalmente, mais reativo e com maior dificuldade de lidar com novos desafios.

11. O papel do sono no estresse

O sono exerce papel fundamental na recuperação física e mental. Durante o descanso noturno, o organismo reduz naturalmente a produção de cortisol e ativa processos de reparo celular, consolidação da memória e equilíbrio hormonal.

O estresse, no entanto, prejudica tanto a quantidade quanto a qualidade do sono. Pensamentos acelerados, ansiedade e estado de alerta dificultam o adormecer e reduzem as fases profundas do sono. Como consequência, o corpo não consegue se recuperar adequadamente.

Um exemplo simples é o de uma bateria de celular: dormir pouco ou mal equivale a carregar o aparelho apenas parcialmente. No dia seguinte, ele funciona, mas descarrega rapidamente. Da mesma forma, o organismo até consegue manter as atividades diárias, porém com mais cansaço, irritação e menor capacidade de lidar com problemas.

Com o tempo, a privação de sono aumenta ainda mais os níveis de cortisol, prejudica o metabolismo da glicose, favorece o ganho de peso e enfraquece o sistema imunológico, criando um ciclo difícil de interromper.

12. Estresse e doenças cardiovasculares

O sistema cardiovascular é um dos mais afetados pelo estresse crônico. Em situações de alerta, o aumento da frequência cardíaca e da pressão arterial é esperado e temporário. Porém, quando esse estado se mantém por longos períodos, os vasos sanguíneos e o coração passam a sofrer sobrecarga constante.

De forma simples, pode-se comparar os vasos sanguíneos a canos que transportam água. Quando a pressão dentro desses canos aumenta repetidamente, suas paredes sofrem desgaste. No corpo humano, esse desgaste favorece o endurecimento das artérias, conhecido como aterosclerose.

O estresse também aumenta a liberação de substâncias inflamatórias que lesionam o endotélio, camada interna dos vasos. Com o tempo, esse processo

eleva o risco de hipertensão, infarto e acidente vascular cerebral. Por isso, o estresse crônico é considerado um importante fator de risco cardiovascular.

13. Estresse ao longo da vida

Os efeitos do estresse variam conforme a fase da vida em que ocorrem. Na infância e adolescência, períodos críticos de desenvolvimento, o estresse intenso ou prolongado pode interferir na maturação do sistema nervoso e endócrino.

Experiências adversas precoces estão associadas a alterações duradouras na resposta ao estresse, tornando o indivíduo mais sensível a situações desafiadoras na vida adulta. Em termos bioquímicos, isso envolve mudanças na regulação do eixo hipotálamo-hipófise-adrenal.

Na vida adulta, o estresse contínuo está mais associado ao surgimento de doenças crônicas. Já no envelhecimento, ele acelera processos de desgaste celular, contribuindo para perda funcional e pior qualidade de vida.

14. Quando o corpo fala: manifestações físicas do estresse

Nem sempre o estresse se manifesta inicialmente como sofrimento emocional evidente. Muitas vezes, o corpo é o primeiro a sinalizar que algo não está em equilíbrio.

Sintomas como dor de cabeça frequente, tensão muscular, distúrbios gastrointestinais, queda de cabelo e fadiga persistente são comuns em pessoas sob estresse crônico. Esses sinais refletem alterações hormonais, inflamatórias e metabólicas.

Pode-se dizer que o corpo "fala" por meio desses sintomas quando a mente não encontra espaço para elaborar o excesso de demandas. Reconhecer essas manifestações precocemente é fundamental para evitar o agravamento do quadro.

15. Estresse, intestino e microbiota

O intestino é frequentemente chamado de "segundo cérebro" devido à intensa comunicação que mantém com o sistema nervoso central. Essa comunicação ocorre por meio de nervos, hormônios e substâncias químicas produzidas pelas bactérias intestinais.

O estresse altera diretamente o funcionamento do intestino. Ele modifica a motilidade intestinal, aumenta a permeabilidade da mucosa e influencia a composição da microbiota. Em termos práticos, isso pode resultar em dor abdominal, diarreia, constipação e desconforto digestivo frequente.

Um exemplo comum é perceber que, em momentos de ansiedade, o intestino "responde" rapidamente. Isso não é coincidência. O estresse envia sinais químicos que alteram o ambiente intestinal.

Além disso, a microbiota participa da produção de neurotransmissores, como a serotonina. Alterações nesse equilíbrio podem afetar não apenas a digestão, mas também o humor e o comportamento, reforçando o ciclo entre mente e corpo.

16. Estratégias para reduzir os efeitos do estresse

Embora o estresse faça parte da vida moderna, é possível reduzir significativamente seus impactos negativos por meio de mudanças no estilo de vida. Essas estratégias não eliminam os problemas, mas ajudam o organismo a responder de forma mais equilibrada.

A atividade física regular é uma das ferramentas mais eficazes. Durante o exercício, o corpo libera endorfinas, substâncias associadas à sensação de bem-estar, além de ajudar a regular o cortisol. Não é necessário exercício intenso: caminhadas regulares já produzem benefícios importantes.

A alimentação também influencia diretamente o estresse. Dietas ricas em alimentos ultraprocessados favorecem inflamação, enquanto uma alimentação baseada em frutas, verduras, proteínas de boa qualidade e gorduras saudáveis fornece os nutrientes necessários para o funcionamento adequado do cérebro e do sistema imunológico.

Técnicas de relaxamento, como respiração profunda, meditação e momentos de lazer, ajudam a sinalizar ao cérebro que não há perigo imediato. Bioquimicamente, isso reduz a ativação do eixo do estresse e favorece o retorno ao equilíbrio.

17. Considerações finais

O estresse evidencia de forma clara que mente e corpo funcionam como um sistema integrado. Emoções, pensamentos e experiências psicológicas não ficam restritos ao campo subjetivo, mas desencadeiam respostas bioquímicas mensuráveis e com impacto direto na saúde.

Quando o estresse se torna crônico, o organismo entra em um estado de desequilíbrio persistente, envolvendo alterações hormonais, inflamatórias, metabólicas e neurológicas. Essas mudanças ajudam a explicar o aumento do risco de doenças cardiovasculares, metabólicas, imunológicas e mentais.

Compreender esses mecanismos é fundamental não apenas para o tratamento, mas também para a prevenção. Estratégias simples, baseadas em evidências científicas, podem reduzir os efeitos do estresse e promover uma abordagem mais integrada da saúde.

Ao reconhecer que cuidar da mente é também cuidar do corpo, abre-se espaço para uma visão mais humanizada e completa do processo saúde-doença, alinhada aos avanços da bioquímica e das ciências da vida.

Por fim, o fortalecimento de vínculos sociais e o suporte emocional funcionam como fatores de proteção. Conversar, compartilhar experiências e sentir-se acolhido reduzem a percepção de ameaça e, consequentemente, a resposta fisiológica ao estresse.

18. Referências

SELYE, Hans. *The Stress of Life*. New York: McGraw-Hill, 1956.

McEWEN, Bruce S. *The End of Stress As We Know It*. Washington, DC: Dana Press, 2002.

SAPOLSKY, Robert M. *Why Zebras Don't Get Ulcers: The Acclaimed Guide to Stress, Stress-Related Diseases, and Coping.* 3rd ed. New York: Holt Paperbacks, 2004.
(1ª ed. 1994)

GUYTON, Arthur C.; HALL, John E. *Tratado de Fisiologia Médica.* 13. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
(Obra original em inglês: *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology.*)

KANDEL, Eric R.; SCHWARTZ, James H.; JESSELL, Thomas M.; SIEGELBAUM, Steven A.; HUDSPETH, A. J. *Principles of Neural Science.* 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2013.

Autor

Alice Bianchi de Oliveira

Programa de Pós Graduação em Bioquímica, Universidade Estadual de Maringá.

CAPÍTULO 2

Como o solo e os microrganismos ajudam a planta a produzir energia

Alissa Borges de Oliveira

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c2>

Resumo

Todo organismo precisa de energia para se manter funcionando, para as plantas essa energia vem da fotossíntese. Para que isso ocorra, além da luz solar, essas plantas precisam de água, ar e também nutrientes, que vem do solo. O solo é um ambiente vivo, cheio desses nutrientes, mas também microrganismos que disponibilizam esses nutrientes no solo e ajudam as plantas em sua absorção. Em troca, a planta compartilha parte do alimento que produz com os fungos e bactérias que ficam em volta da sua raiz ou até dentro dela. Entender essa interação é fundamental para termos plantas mais saudáveis e produtivas.

Palavras-chave: rizosfera; microrganismos; interação.

Abstract

Every organism needs energy to stay alive and function. In plants, this energy comes from photosynthesis. For this process to happen, plants need more than just sunlight: they also need water, air, and nutrients, which come from the soil. The soil is a living environment, rich in nutrients and full of microorganisms that help make these nutrients available and assist plants in absorbing them. In return, the plant shares part of the food it produces with the fungi and bacteria that live around its roots or even inside them. Understanding this interaction is essential for growing healthier and more productive plants and for making better decisions in agriculture.

Keywords: rhizosphere; microorganisms; interaction.

“The soil is the great connector of lives, the source and destination of all.”

Wendell Berry

Atualmente, temos uma consciência muito maior de que nenhum ser vivo existe de forma isolada. Cada vez mais se fala sobre como nossas ações impactam outras espécies e sobre como tudo no meio ambiente está conectado, filmes, como a série Avatar tratam muito bem desse tema. Mas também, documentários e debates ambientais nos mostram que pequenas mudanças podem gerar grandes consequências dentro dos ecossistemas.

No entanto, além dessas relações visíveis, existem interações invisíveis que muitas vezes passam despercebidas. Como, por exemplo, a rede que sustenta a vida de alguns dos organismos responsáveis pela possibilidade da vida como conhecemos: as plantas. Desde a escola, ouvimos que as plantas são fundamentais para a vida no planeta, pois produzem oxigênio e formam a base da cadeia alimentar. Embora essas afirmações sejam corretas, elas costumam ser simplificadas, sem especificar os processos e interações que tornam isso possível.

Por trás desse protagonismo das plantas, no solo, há uma região ao redor das raízes, chamada rizosfera, que abriga uma grande diversidade de microrganismos que participam ativamente da ciclagem de nutrientes e do fornecimento de elementos essenciais para a planta.

Para produzir energia por meio da fotossíntese, as plantas dependem não apenas da luz solar, mas também do solo e dos microrganismos que vivem ao redor ou dentro de suas raízes. Bactérias e fungos auxiliam na absorção de nutrientes e, em troca, recebem parte do alimento produzido pelas plantas, estabelecendo uma relação de cooperação.

Estudos recentes mostram que essas interações entre plantas e microrganismos aumentam a eficiência da produção de energia e contribuem para plantas mais saudáveis e produtivas, com impactos diretos na agricultura e na sustentabilidade dos ecossistemas. Compreender essas relações vai além do conteúdo escolar tradicional e permite uma visão mais completa de como a vida na Terra é sustentada.

1. O que é “energia” para uma planta?

Pense numa placa solar, elas estão em alta hoje em dia. Como elas funcionam? Mesmo não sabendo exatamente como tudo funciona, sabemos que

ela capta a energia solar e essa energia pode ser usada para esquentar a água de uma piscina, ou até mesmo para ser utilizada para atividades cotidianas como ligar a Air Fryer. Podemos comparar esse processo, de uma maneira bem lúdica, ao processo de fotossíntese.

Durante a fotossíntese, os cloroplastos nas folhas- equivalente a placas solares, no nosso paralelo- captam essa energia solar e utilizam essa energia para formar uma molécula de açúcar. Por que utilizam energia pra isso?

As plantas não conseguem utilizar essa energia diretamente, então precisam converter, tipo um aparelho 220 numa tomada de 110, é energia, mas precisa vir do jeito certo. Quando essas moléculas de açúcar são quebradas, elas liberam energia para a planta, que então conseguem utilizá-la apropriadamente.

Inclusive, é no meio de todos esses processos que o oxigênio é liberado. Quando a planta usa a água nesse processo, elas só precisam das moléculas de H (Hidrogênio) e não do O (Oxigênio) e ele acaba sendo liberado como pode ser visto na Figura 1.



Figura 1. Diagrama ilustrativo do processo de fotossíntese mostrando a absorção de 6 moléculas água (H₂O) 6 moléculas de dióxido de carbono (CO₂) e luz solar pela planta e a produção de glicose e oxigênio (O₂). Imagem adaptada de fontes educacionais de fotossíntese. *Fonte: ilustração própria adaptada.*

2. O solo: muito mais do que “terra”

O solo é bem mais complexo do que só terra e fornece mais para a planta do que só estabilidade, ele contém partículas minerais misturadas com matéria orgânica (restos de plantas e animais em decomposição), além de água e ar. Sim, tem ar no solo. E além disso, o solo abriga milhões de microrganismos, como bactérias e fungos, que formam o chamado microbioma do solo — a comunidade de seres vivos que habita esse ambiente.

São esses microrganismos desempenham um papel fundamental na ciclagem de nutrientes, processo que possibilita a disponibilização de nutrientes— como nitrogênio, fósforo e potássio — presentes nos restos e que não poderiam ser absorvidos diretamente antes, em uma forma que as plantas conseguem absorver pelas raízes. Sem essa atividade biológica, grande parte dos nutrientes permaneceria indisponível, limitando o crescimento das plantas.

Do mesmo jeito que as plantas descartam o oxigênio e nós o usamos, as bactérias descartam esses minerais para as plantas, mas essa parceria é bem mais estabelecida que a nossa com as plantas.

3. Nutrientes do solo: peças essenciais para a energia

Tá, mas por que esses nutrientes são tão importantes? Relembrando aquela ideia de que as folhas podem ser comparadas a placas solares. Elas são as partes da planta responsáveis por captar a luz do sol. No entanto, para que essa luz seja realmente aproveitada, é necessário um “mecanismo” especial dentro das folhas. Esse mecanismo é a clorofila, um pigmento verde que absorve a energia da luz e dá início às reações da fotossíntese.

Cada nutriente tem uma função específica nesse processo. O nitrogênio é essencial para a formação da clorofila; o magnésio faz parte da estrutura dessa molécula; o ferro participa das reações químicas que permitem a transferência de energia; e o fósforo e o potássio ajudam no armazenamento e no transporte da energia produzida dentro da planta.

Quando o solo é pobre em nutrientes, a planta até recebe luz solar, mas não consegue transformá-la em energia de forma eficiente. É como ter placas solares sujas ou danificadas: o sol está lá, mas a energia não é bem aproveitada. Por isso, um solo fértil é indispensável para que a fotossíntese funcione corretamente e para que a planta cresça forte e saudável.

4. As raízes: o ponto de contato entre a planta e o solo

A região do solo que fica diretamente em contato com as raízes tem um apelo especial, ela recebe o nome de rizosfera. Esse é um dos ambientes mais vivos do planeta em termos microscópicos. Ali vivem bactérias e fungos que ajudam a planta a encontrar e absorver nutrientes essenciais.

Para manter essa parceria funcionando, as raízes liberam substâncias chamadas exsudatos radiculares. Esses exsudatos são compostos ricos em açúcares, aminoácidos e outras moléculas que servem de alimento para microrganismos benéficos. É como se a planta estivesse “alimentando” seus aliados no solo.

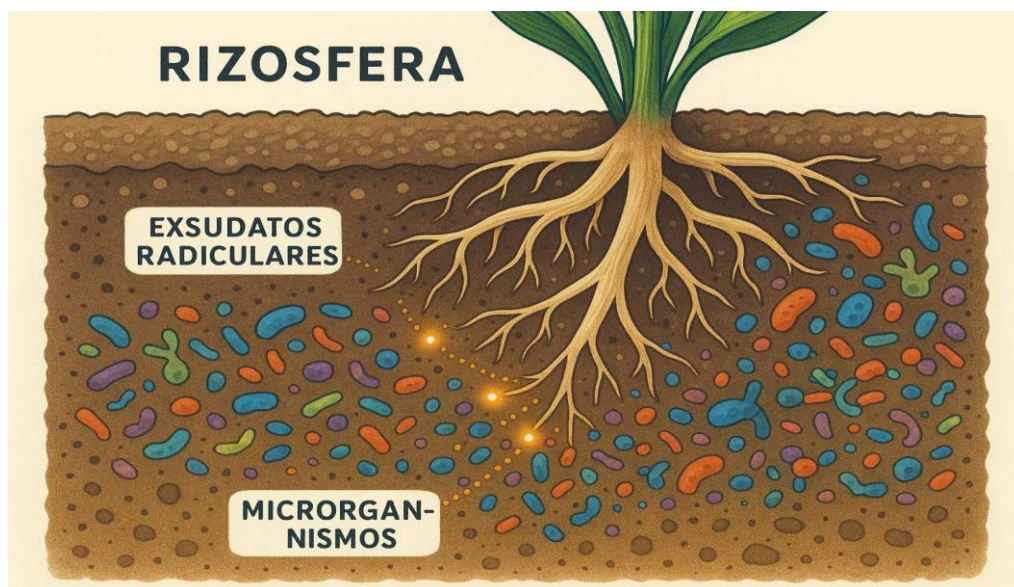


Figura 2. Representação esquemática da rizosfera, a região do solo diretamente influenciada pelas raízes das plantas. As raízes liberam exsudatos radiculares, compostos ricos em açúcares e outras moléculas, que atraem e alimentam microrganismos do solo, como bactérias e fungos.

Fonte: <https://agrotecnico.com.br/rizosfera-e-o-impacto-em-planta-microrganismo-para-productividade/>

5. A importância dos exsudatos radiculares para a especificidade das interações

Mas também não é qualquer bactéria ou fungo que vai ajudar a planta nesse processo, há especificidade. E ela não acontece por acaso. Um dos principais responsáveis por essa seleção é o próprio exsudato radicular. Cada espécie de planta libera um tipo de exsudato diferente, com proporções próprias desses compostos. Isso significa que cada planta favorece microrganismos específicos, selecionando aqueles que trazem maiores benefícios para seu crescimento e metabolismo energético. Esse processo é conhecido como especificidade da interação planta–microrganismo.

Podemos comparar o exsudato a um cardápio. Assim como diferentes pessoas preferem alimentos distintos, os microrganismos também respondem de forma diferente aos compostos liberados pelas raízes. Quando uma planta produz um determinado perfil de exsudatos, ela atrai microrganismos capazes de ajudar na absorção de nutrientes, na proteção contra patógenos ou no aumento da eficiência da fotossíntese.

Dessa forma, a planta não é um organismo passivo no solo. Ao liberar exsudatos específicos, ela participa ativamente da escolha de seus parceiros microbianos, estabelecendo relações mais eficientes e equilibradas. Essa interação refinada ajuda a explicar por que plantas diferentes apresentam respostas distintas mesmo quando cultivadas no mesmo solo.

6. Microrganismos e nutrientes: uma parceria essencial

De forma bem didática, integrando todo esse conhecimento, a Figura 3 nos ajuda a visualizar como a planta, o solo e os microrganismos trabalham juntos.

No centro da imagem, vemos a raiz, que funciona como a ponte entre a planta, que está acima do solo, e o ambiente subterrâneo.

No lado esquerdo da imagem, estão representados os processos químicos induzidos pela raiz. Tudo que já vimos sobre a absorção de nutrientes e modificação da rizosfera pela liberação de prótons, carboxilatos e enzimas,

que ajudam a soltar nutrientes como fósforo, ferro, zinco, manganês e cobre, que muitas vezes estão presos às partículas do solo. Esse processo pode acidificar a rizosfera e facilitar a disponibilidade desses nutrientes. Em outras palavras, a raiz “prepara o terreno” para conseguir se alimentar melhor. Mas lembramos que não são todos os nutrientes que esses processos conseguem dissolver.

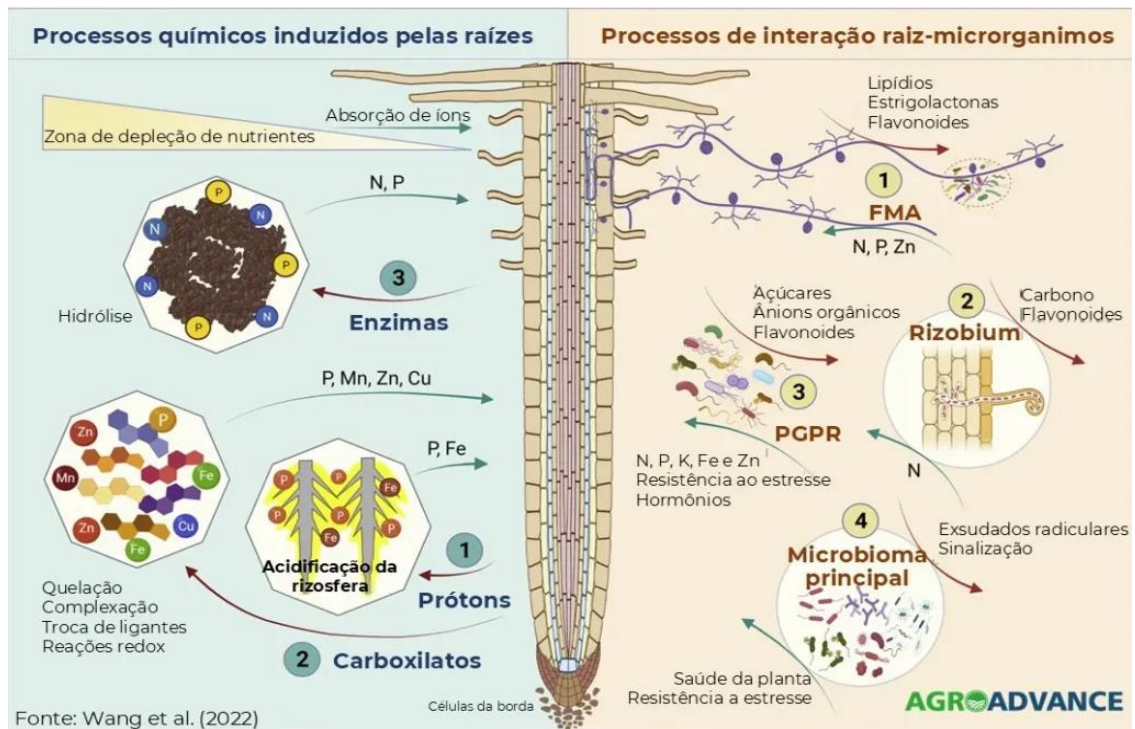


Figura 3. Processos bioquímicos (à esquerda) e microbianos (à direita) da rizosfera influenciados pelas raízes. *Fonte: Wang et al. (2022).*

E no lado direito da imagem, aparecem os processos de interação entre raiz e microrganismos. Os microrganismos destacados são:

- FMA (Fungos Micorrízicos Arbusculares), que são fungos que se associam diretamente às raízes. Eles funcionam como uma extensão delas, ajudando principalmente na absorção de fósforo, zinco e água.
- Rizóbio, que são bactérias associadas às raízes, formando nódulos, conhecidas por auxiliar na obtenção de nitrogênio, um nutriente essencial para o crescimento da planta.

- PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria), que são bactérias promotoras de crescimento vegetal. Elas ajudam na absorção de nutrientes como nitrogênio, fósforo, potássio, ferro e zinco, além de produzirem hormônios e aumentarem a resistência da planta ao estresse.

Assim, a planta alimenta os microrganismos, e os microrganismos ajudam a planta a acessar os nutrientes do solo, formando uma parceria essencial para a saúde e o crescimento vegetal.

7. Rizóbio

Nem todas as bactérias promotoras de crescimento de plantas (BPCP) são do tipo Rizóbio, mas grande parte são. Esse é um grupo de bactérias do solo que estabelece uma relação apenas com as raízes de determinadas plantas, é o caso das leguminosas, como feijão.

Aqueles exsudatos liberados “avisam” o rizóbio de que aquela raiz é um parceiro adequado. Em resposta, a bactéria se aproxima da raiz e inicia a formação de estruturas chamadas nódulos radiculares.

Na Figura 4, utilizada neste trabalho, é possível observar esses nódulos ao longo da raiz. Eles aparecem como pequenas protuberâncias e são o local onde ocorre a fixação biológica do nitrogênio. Nesse processo, o rizóbio transforma o nitrogênio presente no ar do solo em formas assimiláveis pela planta, como amônia. Esse nutriente é essencial para a produção de proteínas, enzimas e clorofila, estando diretamente ligado à fotossíntese e ao metabolismo energético vegetal.

Em troca, a planta fornece ao rizóbio açúcares produzidos na fotossíntese, garantindo energia para a bactéria. Essa troca transforma o solo em um sistema dinâmico: nutrientes que antes estavam inacessíveis passam a circular entre solo, microrganismos e planta. Estudos recentes destacam que essa associação reduz a dependência de fertilizantes nitrogenados e aumenta a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.



Figura 4. Raiz de planta leguminosa apresentando nódulos radiculares formados pela associação com bactérias do gênero *Rhizobium*. Esses nódulos são estruturas especializadas onde ocorre a fixação biológica do nitrogênio, permitindo a conversão do nitrogênio atmosférico em formas assimiláveis pela planta. *Fonte: Thomas Koffel, CC-BY-NC.*

8. Fungos micorrízicos: a internet subterrânea

Os fungos micorrízicos formam uma das parcerias mais impressionantes da natureza. Eles se conectam às raízes das plantas e crescem para dentro e para fora do solo, formando uma vasta rede de filamentos microscópicos.

Essa rede aumenta enormemente a área de absorção das raízes, permitindo que a planta alcance água e nutrientes que, sozinha, não conseguiria. O fósforo, por exemplo, é um nutriente essencial para a produção de energia, mas se move lentamente no solo. Os fungos micorrízicos resolvem esse problema.



Figura 5. Raiz de planta colonizada por fungos micorrízicos arbusculares (FMA), visíveis como uma rede esbranquiçada de hifas fúngicas envolvendo e penetrando o sistema radicular. *Fonte:* <https://en.renovablesverdes.com/mycorrhiza/>

9. O impacto das ações humanas no solo

Muitas ações humanas recentes têm alterado esse equilíbrio de forma rápida e intensa, afetando diretamente a capacidade das plantas de produzir energia, os próximos parágrafos desenvolvem a maleficência delas para a planta.

O desmatamento é um dos exemplos mais claros. Quando a vegetação é removida, o solo fica exposto ao sol intenso e à chuva, perdendo matéria orgânica e umidade. Com isso, grande parte dos microrganismos do solo — como fungos micorrízicos arbusculares (FMA), rizóbios e bactérias promotoras de crescimento vegetal (PGPR) — perde seu ambiente de sobrevivência. Sem esses parceiros, a planta encontra mais dificuldade para absorver nutrientes essenciais à fotossíntese, como fósforo e nitrogênio.

Outro fator é o uso excessivo de agrotóxicos e fertilizantes químicos. Embora esses produtos tenham sido desenvolvidos para aumentar a produtividade, seu uso indiscriminado pode reduzir drasticamente a diversidade microbiana do solo. Muitos desses compostos não distinguem microrganismos

benéficos de patógenos, como alguns tratamentos para câncer que não conseguem ser específicos pra células cancerígenas e acabam afetando as boas. O resultado é um solo cada vez mais dependente de insumos externos e uma planta menos eficiente.

A compactação do solo, causada por máquinas pesadas e manejo inadequado, também traz sérias consequências. Solos compactados apresentam menos poros, o que reduz a entrada de ar e a infiltração de água. Isso dificulta a respiração das raízes e dos microrganismos, limita o crescimento das hifas dos fungos micorrízicos e reduz a movimentação de nutrientes. Mesmo com luz solar disponível, a planta passa a operar “no limite”, com baixa eficiência fotossintética.

Por outro lado, práticas sustentáveis mostram que é possível reverter ou minimizar esses impactos.

10. Agricultura sustentável e energia das plantas

Práticas como a adubação orgânica ajudam a devolver ao solo matéria orgânica e nutrientes de forma gradual, as compostagens são bem conhecidas e práticas. Esse tipo de adubação alimenta não só a planta, mas também os microrganismos aumentam sua atividade e tornam os nutrientes mais acessíveis às raízes, por ter mais alimento disponível.

A rotação de culturas também é uma prática essencial, pois estimula uma maior diversidade de microrganismos. Cada planta libera exsudatos radiculares distintos, como já foi explicado, atraindo diferentes comunidades microbianas. Isso torna o solo mais equilibrado e resiliente, reduzindo a incidência de pragas e doenças e melhorando a nutrição das plantas.

Já o uso reduzido de produtos químicos evita danos aos microrganismos benéficos e preserva as interações naturais da rizosfera. Com menos estresse químico, o solo mantém sua capacidade de reciclar nutrientes e de sustentar plantas saudáveis.

Quando essas práticas são adotadas em conjunto, o solo se torna mais saudável e como resultado, as plantas sofrem menos com estresse hídrico e

nutricional e conseguem transformar a luz solar em energia de forma mais eficiente. A longo prazo, a agricultura sustentável promove plantas mais produtivas, resistentes e energeticamente eficientes, ao mesmo tempo em que preserva o solo como base da vida e da produção de alimentos.

11. Referências

Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. A. (2023). Soil biodiversity and soil ecosystem services. *Sustainability*, 15(4), 2890. <https://doi.org/10.3390/su15042890>

Philippot, L., Raaijmakers, J. M., Lemanceau, P., & van der Putten, W. H. (2024). Going back to the roots: The microbial ecology of the rhizosphere. *Environmental Microbiome*, 19, 12. <https://doi.org/10.1186/s40793-024-00489-1>

Shi, S., Nuccio, E. E., Shi, Z. J., He, Z., Zhou, J., & Firestone, M. K. (2023). The interconnected rhizosphere: High microbial connectivity drives plant–soil feedbacks. *Nature Communications*, 14, 1124. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36862-5>

Singh, B. K., Trivedi, P., Egidi, E., Macdonald, C. A., & Delgado-Baquerizo, M. (2025). Linking soil microbial diversity to plant productivity and ecosystem sustainability. *Microbiology and Ecology Reviews* (PubMed Review).

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2023). Photosynthesis, nutrients and plant energy metabolism. *Annual Review of Plant Biology*, 74, 1–28. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-070522-033221>

Trivedi, P., Leach, J. E., Tringe, S. G., Sa, T., & Singh, B. K. (2025). Plant–microbiome interactions: From ecology to agronomy. *Cell Host & Microbe*, 33(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2025.01.003>

Wang, X., Song, D., Liang, G., Zhang, Q., Ai, C., & Zhou, W. (2022). Rhizosphere biochemical and microbial processes regulating nutrient availability. *Soil Biology and Biochemistry*, 165, 108517. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108517>

Autor

Alissa Borges de Oliveira

Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Maringá.

CAPÍTULO 3

Ingestão de microplásticos: uma perspectiva ambiental e da saúde

Ana Luiza Carvalho Vieira

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c3>

Resumo

Os microplásticos (MPs) são partículas de polímeros com dimensões inferiores a 5 mm, presentes no ambiente devido à fragmentação de resíduos plásticos e à fabricação industrial. A contaminação global por esses materiais rompeu a barreira ecológica e consolidou-se como uma emergência de saúde pública, dada a confirmação de sua presença nos alimentos e na água potável. Este capítulo examina a trajetória dos microplásticos desde a exposição ambiental até a interação com as células do corpo humano. É importante frisar a perspectiva bioquímica e molecular, detalhando como a ingestão dessas partículas desencadeia mecanismos de toxicidade celular, incluindo a ruptura da barreira epitelial intestinal, a indução de estresse oxidativo via espécies reativas de oxigênio (ROS) e a ativação de cascatas inflamatórias. Discute-se também o fenômeno das mudanças na flora intestinal e as consequências sistêmicas, que incluem riscos aos sistemas reprodutivo, respiratório e neurológico. O texto busca traduzir a complexidade das interações do corpo para uma linguagem acessível, alertando para os impactos crônicos desse poluente invisível.

Palavras chave: Microplásticos. Estresse Oxidativo. Barreira Intestinal.

Abstract

Microplastics (MPs) are polymer particles smaller than 5 mm in size, present in the environment due to the fragmentation of plastic waste and industrial manufacturing. Global contamination by these materials has broken the ecological barrier and become a public health emergency, given the confirmation of their presence in food and drinking water. This chapter examines the trajectory of microplastics from environmental exposure to interaction with human body cells. It is important to emphasize the biochemical and molecular perspective, detailing how the ingestion of these particles triggers mechanisms of cellular toxicity, including the disruption of the intestinal barrier, the induction of oxidative stress via reactive oxygen species (ROS), and the activation of inflammatory cascades. The phenomenon of changes in the intestinal flora and the systemic consequences, which include risks to the reproductive, respiratory, and neurological systems, are also discussed. The text seeks to translate the complexity of the body's interactions into accessible language, warning of the chronic impacts of this invisible pollutant.

Keywords: Microplastics. Oxidative Stress. Intestinal Barrier.

1. Introdução: o invisível que nos habita

A era moderna é frequentemente definida pela conveniência e durabilidade dos polímeros sintéticos. No entanto, o que foi projetado para ser indestrutível tornou-se um dos maiores passivos ambientais da história. Estudos recentes estimam que o ser humano médio pode ingerir quantidades alarmantes de plástico semanalmente, uma realidade que transforma a poluição ambiental em uma questão de toxicologia interna.

MPs são partículas com diâmetro entre 0,1µm e 5 mm. Eles podem ser classificados como primários, quando fabricados intencionalmente em tamanhos microscópicos (como em cosméticos e fármacos), ou secundários, resultantes da degradação física, química e biológica de objetos maiores, como garrafas plásticas, pneus e tecidos sintéticos.

A onipresença desses materiais é absoluta. Eles foram detectados desde as fossas oceânicas mais profundas até o topo de montanhas, permeando a água de torneira, o sal de cozinha, etc. O cenário atual não permite mais questionar "se" estamos expostos, mas sim, quais são as consequências dessa exposição crônica. Diferente de um objeto inerte que apenas atravessa o corpo, as evidências científicas apontam que os microplásticos interagem ativamente com nossas células, provocando reações bioquímicas que podem comprometer a homeostase do corpo.

Este capítulo propõe uma jornada pelo caminho que essas partículas percorrem, focando não apenas na ecologia, mas principalmente na biologia molecular e imunologia do processo, traduzindo como o corpo humano reage a essa invasão microscópica.

2. Rotas de exposição: do prato às células

A ingestão é a principal via de exposição humana aos microplásticos. Ocorre aqui o fenômeno da bioacumulação e biomagnificação trófica: organismos na base da cadeia alimentar ingerem as partículas, que se acumulam em seus tecidos; quando predadores maiores os consomem, a concentração de plástico aumenta progressivamente. As fontes comumente conhecidas incluem:

- a. Água e bebidas engarrafadas em plásticos:** mesmo que pareça paradoxal, a água engarrafada apresenta concentrações de MPs superiores à água da torneira, devido à liberação de partículas da própria embalagem e da tampa;
- b. Alimentos marinhos:** ostras, mexilhões e peixes pequenos, muitas vezes consumidos inteiros, são vetores diretos, pois filtram grandes volumes de água contendo partículas de MPs;
- c. Produtos processados:** a contaminação durante o processamento e empacotamento industrial introduz plásticos em alimentos como açúcar, sal e cerveja.

Uma vez ingeridos, a estabilidade química do plástico torna-se um desafio para nosso corpo: o sistema digestório humano não possui proteínas capazes de degradar esses polímeros de forma eficiente. Consequentemente, eles persistem no organismo, podendo causar danos físicos diretos ou iniciar processos inflamatórios complexos.

3. A interação bioquímica: o fim da inércia

A visão de que o plástico é biologicamente inerte está ultrapassada. Especialmente o poliestireno (PS), amplamente utilizado em estudos, promove respostas defensivas que podem evoluir para doenças crônicas.

d. A disfunção da barreira intestinal:

O intestino funciona como uma barreira seletiva sofisticada, permitindo a absorção de nutrientes e bloqueando toxinas. Essa proteção é mantida por uma camada de muco natural e por estruturas biológicas chamadas junções de oclusão, que mantêm as células epiteliais unidas.

Estudos científicos demonstram que a exposição a microplásticos compromete severamente essa artimanha celular. Partículas de PS, por exemplo, demonstraram a capacidade de reduzir a secreção de mucina intestinal, afinando a camada protetora do muco natural do intestino. Além da redução do muco, ocorre uma regulação negativa na produção de proteínas cruciais das junções de oclusão.

Sem essas "colas" moleculares, o espaço entre as células aumenta, resultando no fenômeno de "intestino permeável". Isso permite que não apenas os microplásticos, mas também bactérias e toxinas, translocam do intestino para o sangue, ativando o sistema imunológico de forma perigosa.

e. O estresse oxidativo: a "ferrugem" celular

Um dos mecanismos centrais da toxicidade é o estresse oxidativo. Quando as células tentam processar essas partículas estranhas, ocorre um excesso de Espécies Reativas de Oxigênio, conhecidas popularmente como Radicais Livres. Esse processo funciona como uma "ferrugem" biológica:

- i. **Danos às membranas:** ocorre a peroxidação lipídica, destruindo as gorduras boas que protegem as células;
- ii. **Colapso energético:** as mitocôndrias, estruturas celulares que produzem energia, sofrem disfunção, aumentando ainda mais a produção de ROS em um ciclo vicioso de morte celular (apoptose).

f. A via inflamatória NF-κB/NLRP3: a gestão de crise

Do ponto de vista imunogenético, o corpo responde ao plástico através de um "botão" da inflamação: o fator nuclear kappa B (NF-κB):

- i. Ao ser ligado pelo estresse oxidativo, o NF-κB ordena a produção de moléculas específicas (citocinas inflamatórias);
- ii. Isso prepara o um complexo de proteínas (inflamassoma NLRP3) para liberar uma forte mensagem de inflamação (a IL-1β);
- iii. O aumento de IL-1β estimula a proteína MLCK, que altera o esqueleto da célula e força a abertura das junções de oclusão. Assim, a inflamação gera mais permeabilidade, que permite a entrada de mais plástico, retroalimentando o ciclo destrutivo do corpo.

4. O microbioma e a disbiose: um ecossistema em colapso

Nosso intestino abriga trilhões de microrganismos que desempenham papéis fundamentais na digestão, imunidade e metabolismo. A introdução de

microplásticos nesse ambiente causa uma perturbação ecológica conhecida como disbiose.

As partículas plásticas não são apenas inertes fisicamente; elas podem servir de alimento para o desenvolvimento de populações bacterianas seletivas. Estudos indicam que a presença de MPs altera a composição da microbiota, reduzindo a diversidade de bactérias benéficas (como os *Bacteroidetes*) e favorecendo a proliferação de patógenos e bactérias oportunistas (como *Proteobacteria* e *Staphylococcus*).

Essa alteração na flora bacteriana tem consequências metabólicas profundas no organismo. Bactérias benéficas são responsáveis por produzir ácidos graxos que nutrem as células do intestino e regulam o sistema imune. Com a sua diminuição, o intestino torna-se mais vulnerável à inflamações e infecções. Além disso, os microplásticos podem atuar como vetores, ou "cavalos de Troia", transportando bactérias resistentes a antibióticos e outros contaminantes químicos absorvidos do ambiente diretamente para o intestino.

5. Além do intestino: impactos sistêmicos

Uma vez que a barreira intestinal é rompida, partículas menores (nanoplásticos) entram na corrente sanguínea. Estas já foram detectadas no fígado, placenta, leite materno e até no sangue humano.

5.1. O eixo intestino-cérebro:

A inflamação intestinal libera moléculas no sangue que podem atingir o sistema nervoso e comprometer a barreira hematoencefálica. No cérebro, essas partículas ou a inflamação sistêmica ativam a microglia (células de defesa cerebral), gerando uma neuroinflamação crônica, que é fator de risco para doenças como Alzheimer e Parkinson.

5.2. Riscos reprodutivos e respiratórios:

No sistema reprodutivo, o estresse oxidativo pode danificar células germinativas e reduzir a qualidade do espermatozoide. Além disso, aditivos como bisfenol e ftalatos atuam como disruptores endócrinos, mimetizando hormônios e prejudicando a fertilidade e o desenvolvimento fetal.

Na via respiratória, partículas inaladas podem causar lesões pulmonares e inflamação crônica semelhantes às observadas no intestino, sendo muitas vezes deglutidas após a limpeza mucociliar.

6. Discussão e conclusão:

A ingestão de microplásticos representa um desafio contemporâneo que une a crise ambiental à biologia celular. O que antes era visto apenas como "sujeira" nos oceanos, agora é compreendido como um agente tóxico complexo capaz de interagir com a maquinaria molecular da vida.

A ciência demonstra que os microplásticos agem como estressores físicos e químicos. Eles desgastam o revestimento protetor do intestino, induzem as células a um estado de estresse oxidativo, ativam vias inflamatórias potentes e desequilibram a flora intestinal. As consequências não são locais, mas sistêmicas, com riscos potenciais para o cérebro, a reprodução e o metabolismo.

Entender esses mecanismos bioquímicos é o primeiro passo para mitigar os danos. No entanto, a solução definitiva reside na redução da produção e consumo de plásticos, no aprimoramento das tecnologias de filtragem de água e na biorremediação. A saúde humana é indissociável da saúde ambiental; proteger o meio ambiente de polímeros sintéticos é, em última análise, uma medida de medicina preventiva para preservar a integridade celular das futuras gerações.

7. Referências

BORA, S. S.; GOGOI, R.; SHARMA, M. R.; ANSHU; BORAH, M. P.; DEKA, P.; BORA, J.; NAOREM, R. S.; DAS, J.; TELI, A. B. *Microplastics and human health: unveiling the gut microbiome disruption and chronic disease risks*. **Frontiers in Cellular and Infection Microbiology**, v. 14, 1492759, 2024.

CHARTRES, N.; COOPER, C. B.; BLAND, G.; PELCH, K. E.; GANDHI, S. A.; BAKENRA, A.; WOODRUFF, T. J. *Effects of Microplastic Exposure on Human Digestive, Reproductive, and Respiratory Health: A Rapid Systematic Review*. **Environmental Science & Technology**, v. 58, p. 22843–22864, 2024.

HUFNAGL, K.; SOFIELD, C. E.; ANDERTON, R. S.; GORECKI, A. M. *Mind over Microplastics: Exploring Microplastic-Induced Gut Disruption and Gut-Brain-Axis*

Consequences. **Current Issues in Molecular Biology**, v. 46, p. 4186–4202, 2024.

JOMOVA, K.; KADAC-CZAPSKA, K.; OŠKO, J.; KNEZ, E.; GREMBECKA, M. *Microplastics and Oxidative Stress - Current Problems and Prospects*. **Antioxidants**, v. 13, n. 5, 579, 2024.

WU, S.; ZENG, G.; LI, J.; WANG, Y.; SU, J.; LU, Z.; ZHANG, F.; DING, W. *Polystyrene microplastic-induced oxidative stress triggers intestinal barrier dysfunction via the NF- κ B/NLRP3/IL-1 β /MLCK pathway*. **Environmental Pollution**, v. 345, 123473, 2024.

Autores

Ana Luiza Carvalho Vieira

Programa de Pós graduação em Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Maringá

CAPÍTULO 4

Bioquímica dos Bioinsumos: Ação de Microrganismos na Agricultura Sustentável

Ayla Rodrigues Trindade

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c4>

Resumo

O aumento da demanda global por alimentos estabelece a necessidade de sistemas agrícolas mais sustentáveis e eficientes. O modelo convencional, baseado no uso intensivo de fertilizantes sintéticos e defensivos químicos, embora tenha ampliado a produtividade, tem causado impactos ambientais negativos e comprometido a saúde do solo. Nesse cenário, a biotecnologia e a bioquímica do solo surgem como alternativas promissoras para a segurança alimentar. Este trabalho aborda o papel da microbiota do solo nos processos bioquímicos essenciais à fertilidade e à nutrição vegetal. São discutidas as interações entre plantas e microrganismos na rizosfera, que favorecem o crescimento vegetal, aumentam a resistência a estresses ambientais e reduzem a dependência de insumos químicos. Além disso, são apresentados os bioinsumos como tecnologias sustentáveis capazes de promover a economia circular e a conservação ambiental. Conclui-se que a valorização da atividade microbiana do solo é fundamental para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais produtivos e ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: Agricultura sustentável; Microrganismo; Bioformulação; Simbiose.

Abstract

The increase in global food demand establishes the need for more sustainable and efficient agricultural systems. The conventional model, based on the intensive use of synthetic fertilizers and chemical pesticides, although having increased productivity, has caused negative environmental impacts and compromised soil health. In this scenario, biotechnology and soil biochemistry emerge as promising alternatives for food security. This work addresses the role of soil microbiota in the biochemical processes essential for fertility and plant nutrition. It discusses the interactions between plants and microorganisms in the rhizosphere, which favor plant growth, increase resistance to environmental stresses, and reduce dependence on chemical inputs. Furthermore, bioinputs are presented as sustainable technologies capable of promoting the circular economy and environmental conservation. It is concluded that valuing soil microbial activity is fundamental for the development of more productive and environmentally responsible agricultural systems.

Keywords: Sustainable agriculture; Microorganism; Bioformulation; Symbiosis.

1. A Produção Agrícola

O grande desafio global do século XXI consiste em implementar práticas agrícolas sustentáveis capazes de alimentar uma população estimada entre 9,5 e 10 bilhões de pessoas até o ano de 2050 (ALOO et al., 2022; KUMAR et al., 2022). Projeções indicam que a demanda mundial por alimentos deverá crescer cerca de 70%, impondo uma pressão sem precedentes sobre os recursos naturais e os ecossistemas agrícolas (BOUHZAM et al., 2025; HERNÁNDEZ-ÁLVAREZ et al., 2023).

Historicamente, o aumento da produtividade agrícola foi alcançado por meio da intensificação do uso da terra, associada à aplicação massiva de fertilizantes sintéticos e defensivos químicos. Embora esse modelo tenha promovido expressivos ganhos produtivos, também resultou em impactos ambientais relevantes e em riscos à saúde humana (ALOO et al., 2022; BOTELHO et al., 2020). Diante das limitações de expansão das áreas cultiváveis e dos efeitos das mudanças climáticas, a ciência passou a buscar, na biotecnologia e na bioquímica, alternativas capazes de garantir a segurança alimentar de forma regenerativa e sustentável (FLORENCIO et al., 2022; MIRANDA et al., 2024).

Este capítulo tem como objetivo apresentar, de forma acessível e cientificamente fundamentada, os principais mecanismos bioquímicos envolvidos na ação dos microrganismos no solo agrícola. Ao aproximar a ciência do cotidiano, busca-se evidenciar que a saúde das plantas e a segurança alimentar futura dependem diretamente da compreensão e da preservação das reações químicas invisíveis que ocorrem no solo.

2. Agricultura Convencional e seus Impactos

O modelo agrícola convencional, consolidado após a Segunda Guerra Mundial e impulsionado pela Revolução Verde, baseia-se no uso intensivo de fertilizantes minerais e agrotóxicos (BOTELHO et al., 2020; SANTOS et al., 2024). Embora tenha contribuído para o aumento expressivo da produção de alimentos, esse sistema atingiu um ponto crítico de saturação ambiental. Estima-se que apenas 30% a 40% dos nutrientes aplicados por meio da fertilização

química sejam efetivamente absorvidos pelas plantas, enquanto o restante é perdido para o ambiente (KUMAR et al., 2022; MIRANDA et al., 2024).

As consequências dessas perdas são significativas. A lixiviação de nitrogênio e fósforo contribui para a eutrofização de corpos d'água, enquanto a volatilização da ureia resulta na liberação de óxido nitroso, um gás de efeito estufa com elevado potencial de aquecimento global (ALOO et al., 2022; FLORENCIO et al., 2022).

Junto a isso, o uso prolongado de insumos químicos altera o pH do solo, reduz a biodiversidade microbiana e compromete a ciclagem natural de nutrientes (ALOO et al., 2022; DAUNORAS; KAČERGIUS; GUDIUKAITĖ, 2024). No contexto da saúde humana, a exposição crônica a agrotóxicos está associada ao desenvolvimento de doenças como câncer, distúrbios endócrinos e malformações congênitas (BOTELHO et al., 2020; MENEZES et al., 2021).

3. Importância da Saúde e da Microbiota do Solo

O solo não atua apenas como suporte físico para as plantas, mas constitui um dos ecossistemas mais complexos e biodiversos do planeta, abrigando mais de 50.000 espécies de microrganismos por grama de solo (JESUS et al., 2024). Esse ambiente integra minerais, matéria orgânica, água e ar, funcionando como um sistema essencial de suporte à vida. A microbiota do solo é responsável pela decomposição da matéria orgânica e pela regulação dos ciclos biogeoquímicos do carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre (DAUNORAS; KAČERGIUS; GUDIUKAITĖ, 2024).

A atividade microbiana é fundamental para a manutenção da fertilidade e da estrutura física do solo. Enzimas como desidrogenases, ureases e fosfatases atuam como bioindicadores da vitalidade do ecossistema. Quando preservada, a microbiota contribui para a melhoria da porosidade, da capacidade de retenção de água e da resistência das culturas a estresses ambientais, como seca e salinidade (DAUNORAS; KAČERGIUS; GUDIUKAITĖ, 2024; KHOSRAVI et al., 2024).

No ciclo do nitrogênio, bactérias como *Rhizobium*, *Azotobacter* e outros microrganismos convertem o nitrogênio atmosférico (N_2) em amônia (NH_3),

forma assimilável pelas plantas. Esse processo ocorre por meio da enzima nitrogenase, podendo estabelecer-se de forma simbiótica, associativa ou livre no solo (FLORENCIO et al., 2022; REYES et al., 2024).

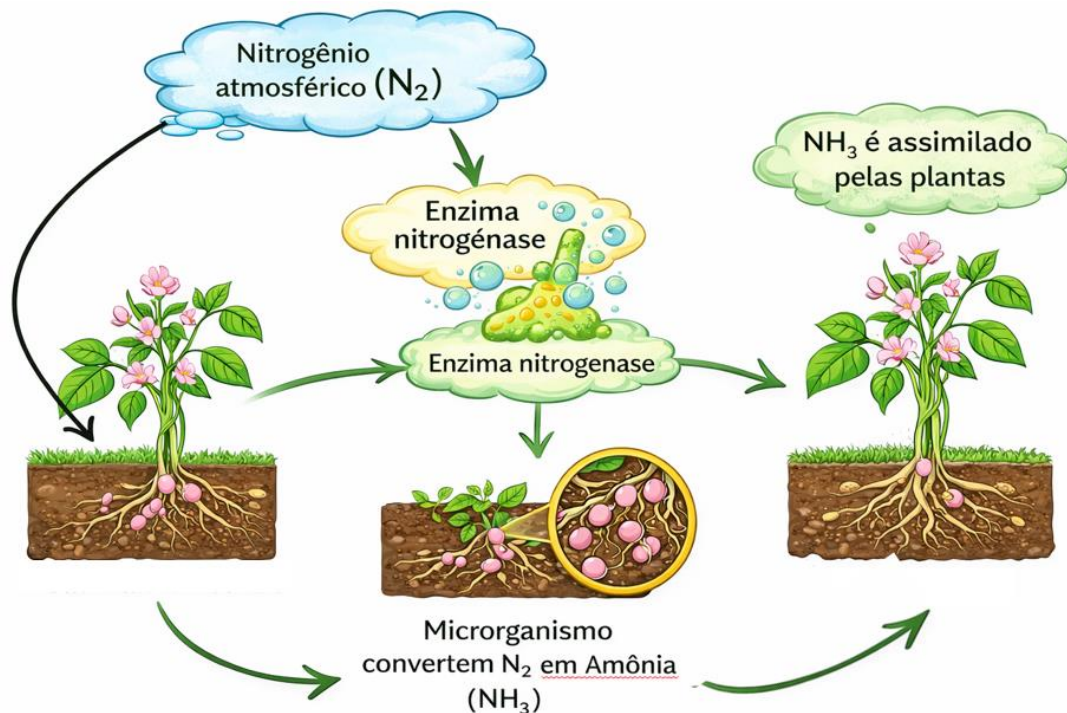


Figura 1. Fixação do nitrogênio por microrganismos. Fonte: adaptado de SAMANTARAY et al., 2024.

De forma semelhante, o ciclo do fósforo é regulado pela ação microbiana. Microrganismos solubilizadores de fosfato, como espécies dos gêneros *Bacillus* e *Pseudomonas*, secretam ácidos orgânicos e enzimas que promovem a liberação de fósforo mineral e orgânico, ampliando sua disponibilidade para as raízes (KUMAR et al., 2022; ALOO et al., 2022; SAMANTARAY et al., 2024).

Além disso, os microrganismos regulam a disponibilidade de micronutrientes, como o ferro, por meio da produção de sideróforos. Essas moléculas facilitam a absorção do elemento pelas plantas e restringem o acesso de patógenos, contribuindo para o crescimento vegetal (KUMAR et al., 2022; FLORENCIO et al., 2022).

A atividade dos microrganismos também é fundamental para manter a qualidade física do solo. Ao produzirem substâncias naturais, como os

exopolissacarídeos e a glomalina esses organismos ajudam a unir as partículas do solo, melhorando sua estrutura. Esse processo favorece a aeração, aumenta a porosidade e amplia a capacidade do solo de reter água, condições essenciais para o bom desenvolvimento das plantas. Além disso, a presença e a atividade de enzimas microbianas, como desidrogenases, ureases e fosfatases, são amplamente utilizadas como indicadores biológicos da fertilidade e da saúde do solo (DAUNORAS; KAČERGIUS; GUDIUKAITĖ, 2024).

Esses mesmos processos bioquímicos tornam as plantas mais resistentes a situações ambientais desfavoráveis, como a presença de metais pesados no solo. Além disso, certos microrganismos são capazes de degradar agroquímicos persistentes, contribuindo para a redução da contaminação do solo e da água e para a recuperação ambiental (SZPYRKA et al., 2025).

Nesse contexto, a atividade bioquímica dos microrganismos é o que faz os bioinsumos funcionarem, regulando a saúde das plantas através da produção de enzimas e hormônios naturais. Essas substâncias funcionam como mensagens químicas que orientam o crescimento, a nutrição e a proteção vegetal. O solo, portanto, deixa de ser apenas uma base e se torna um meio ativo de comunicação e trocas vitais entre a terra e a planta. (DAUNORAS; KAČERGIUS; GUDIUKAITĖ, 2024).

4. Interação Planta–Microrganismo: Comunicação Química no Solo

A rizosfera constitui o principal ambiente de interação entre plantas e microrganismos, mediado por um sofisticado diálogo bioquímico. As plantas liberam composto radiculares ricos em açúcares, aminoácidos e flavonoides, que atuam como sinais químicos capazes de atrair microrganismos benéficos, processo conhecido como quimiotaxia (HASHE; TABASSUM; ABD_ALLAH, 2019; KUMAR et al., 2022).

Microrganismos associados às raízes podem formar biofilmes que aumentam a eficiência da troca de nutrientes e protegem as plantas contra patógenos. Além disso, esses organismos ativam mecanismos de defesa vegetal, como a resistência sistêmica induzida, preparando as plantas para

enfrentar estresses bióticos futuros (HASHE; TABASSUM; ABD_ALLAH, 2019; ZEHRA et al., 2021).

5. Bioinsumos: Uma Tecnologia da Natureza

Os bioinsumos representam uma alternativa sustentável ao modelo agrícola convencional. São definidos como produtos ou processos derivados de recursos biológicos, como microrganismos, enzimas ou extratos naturais, destinados a promover o desenvolvimento e a produtividade das plantas (REYES et al., 2024; PIMENTA et al., 2025). Diferentemente dos insumos químicos, os bioinsumos são biodegradáveis e contribuem para a restauração do equilíbrio biológico do solo (ALOO et al., 2022; BOTELHO et al., 2020).

O desenvolvimento de bioinsumos envolve etapas técnicas rigorosas, que incluem a bioprospecção, o isolamento e a seleção de microrganismos, seguidos de testes laboratoriais, validações em casa de vegetação e ensaios agrônômicos em campo. Em escala industrial, os processos de produção englobam fases de cultivo, formulação e aplicação, com o desafio de manter a viabilidade e a eficácia dos microrganismos até o momento do uso (FLORENCIO et al., 2022; KUMAR et al., 2022).

6. Impacto Ambiental e Economia Circular

O uso de bioinsumos contribui diretamente para a promoção da economia circular na agricultura, ao transformar resíduos agroindustriais, como esterco, camas de frango e cascas vegetais, em substratos para a produção de microrganismos benéficos. Essa estratégia permite que materiais antes considerados passivos ambientais sejam convertidos em insumos de alto valor agrônômico. Além disso, a reutilização desses resíduos contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e diminui o risco de contaminação de mananciais, promovendo sistemas agrícolas mais sustentáveis (BOUHZAM et al., 2025; GARRIDO et al., 2018).

Evidências científicas indicam que biofertilizantes formulados com microrganismos como *Bacillus subtilis*, são capazes de reduzir significativamente

as perdas de nitrogênio no solo, contribuindo para a mitigação da poluição química associada ao uso excessivo de fertilizantes sintéticos (CHENG et al., 2025; DING et al., 2025).

Apesar do elevado potencial agrônômico e ambiental, a adoção dos bioinsumos em larga escala ainda enfrenta desafios técnicos, econômicos e institucionais que limitam sua consolidação como alternativas aos insumos químicos convencionais. Um dos principais obstáculos está relacionado à variabilidade de resultados em condições de campo. A eficiência dos bioinsumos pode variar consideravelmente em função de fatores como tipo de solo, pH, temperatura e disponibilidade hídrica, o que gera insegurança entre os agricultores, sobretudo quando comparada à resposta imediata e mais previsível dos fertilizantes e defensivos químicos (SAMANTARAY et al., 2024).

Outro desafio importante diz respeito à estabilidade e à vida de prateleira dos produtos biológicos. Por serem constituídos por microrganismos vivos ou células em estado dormente, os bioinsumos são mais sensíveis a condições adversas durante o armazenamento e o transporte, como altas temperaturas e exposição à radiação solar. Essas limitações podem comprometer a viabilidade microbiana e, conseqüentemente, a eficácia do produto no campo, tornando necessária a adoção de formulações mais estáveis e de sistemas logísticos adequados (KHOSRAVI et al., 2024).

Além disso, o investimento inicial exigido para a produção de bioinsumos em escala industrial ainda é elevado. A ausência de materiais carreadores de baixo custo e com ampla compatibilidade para diferentes cepas microbianas dificulta a padronização dos processos produtivos e contribui para o aumento do custo final do produto. Somam-se a esses fatores as barreiras relacionadas ao conhecimento técnico, uma vez que muitos agricultores e aplicadores ainda carecem de informações claras sobre o modo de ação, os benefícios e as condições ideais de uso dos bioinsumos. Em diversas regiões, marcos regulatórios lentos ou pouco adaptados às especificidades dos produtos biológicos também restringem sua difusão e adoção no setor agrícola (SAMANTARAY et al., 2024).

7. O Futuro dos Bioinsumos na Agricultura

O futuro dos bioinsumos na agricultura indica uma integração cada vez maior entre biologia, bioquímica e tecnologias avançadas, com o objetivo de tornar os resultados em campo mais eficientes, estáveis e previsíveis. Nesse contexto, a engenharia genética e a biotecnologia tendem a ocupar um papel central, permitindo o desenvolvimento de microrganismos mais eficientes na fixação de nutrientes, na produção de compostos benéficos às plantas e no controle de pragas e doenças (REYES et al., 2024). Associadas a ferramentas genômicas modernas, como o sequenciamento de nova geração, essas abordagens possibilitam a criação de bioinoculantes “sob medida”, adaptados às características específicas do solo, do clima e das culturas agrícolas (ALOO et al., 2022).

Paralelamente, a nanotecnologia surge como uma das fronteiras mais promissoras para o avanço dos bioinsumos. O desenvolvimento de nanobiofertilizantes, baseados em sistemas de nanoencapsulamento, permite a liberação lenta e controlada de nutrientes e microrganismos, aumentando a estabilidade das formulações e a eficiência de absorção pelas plantas. Como resultado, há redução das perdas por lixiviação e volatilização, o que diminui o desperdício e os impactos ambientais associados à fertilização convencional (BOTELHO et al., 2020).

Esses avanços científicos e tecnológicos refletem-se também no crescimento expressivo do mercado de bioinsumos. Estimativas indicam que o mercado global de biofertilizantes apresente taxas anuais de crescimento entre 12% e 15%, impulsionado pela expansão da agricultura orgânica, pela demanda por sistemas produtivos mais sustentáveis e pela implementação de políticas públicas voltadas à redução do uso de insumos químicos sintéticos (ALOO et al., 2022). Diante disso, a transição para uma agricultura baseada na biodiversidade microbiana não representa apenas uma inovação tecnológica, mas uma necessidade estratégica para assegurar que o motor invisível do solo continue sustentando a produção de alimentos de maneira ambientalmente responsável (PIMENTA et al., 2025).

8. Referências

- ALOO, B. N. et al. Plant growth-promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1-21, 2022. DOI: 10.3389/fpls.2022.1002448.
- BOTELHO, M. G. L. et al. Agrotóxicos na agricultura: agentes de danos ambientais e a busca pela agricultura sustentável. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e396985806, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i8.5806.
- BOUHZAM, I. et al. Assessing environmental impacts of various biofertilizers in Europe: A step toward circular economy transition. **Sustainable Production and Consumption**, v. 56, p. 460-476, 2025. DOI: 10.1016/j.spc.2025.04.012.
- CHENG, X. et al. Biofertilizer has stronger mitigation effects on greenhouse gas emissions and C sequestration effects on ecosystems than chemical fertilizer. **Industrial Crops & Products**, v. 232, p. 121244, 2025. DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.121244.
- DAUNORAS, J.; KAČERGIUS, A.; GUDIUKAITĖ, R. Role of Soil Microbiota Enzymes in Soil Health and Activity Changes Depending on Climate Change and the Type of Soil Ecosystem. **Biology**, v. 13, n. 85, p. 1-42, 2024. DOI: 10.3390/biology13020085.
- DING, B. et al. Biofertilizers improve cotton yield by regulating microbial communities and N cycling processes in cotton fields under irrigated water with different salinity levels. **Field Crops Research**, v. 331, p. 109998, 2025. DOI: 10.1016/j.fcr.2025.109998.
- FLORENCIO, C. et al. Avanços na produção e formulação de inoculantes microbianos visando uma agricultura mais sustentável. **Química Nova**, v. 45, n. 9, p. 1133-1145, 2022.. DOI: 10.21577/0100-4042.20170909.
- GARRIDO, E. C. et al. Tecnologias para a Produção de Biofertilizantes: tendências e oportunidades. **Cadernos de Prospecção**, Salvador, v. 12, n. 3, p. 665, 2018. DOI: 10.9771/cp.v12n3p665.
- HASHEM, A.; TABASSUM, B.; ABD_ALLAH, E. F. Bacillus subtilis: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 26, p. 1291-1297, 2019. DOI:10.1016/j.sjbs.2019.05.004.
- HERNÁNDEZ-ÁLVAREZ, C. et al. A study of microbial diversity in a biofertilizer consortium. **PLoS ONE**, v. 18, n. 8, p. e0286285, 2023. DOI: 10.1371/journal.pone.0286285.
- JESUS, J. F. V. et al. Composição microbiológica e indicadores físicos e químicos de biofertilizantes líquidos. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 11, n. 28, p. 997-1018, 2024. DOI: 10.21438/rbgas(2024)112832.

KHOSRAVI, H. et al. Exploring the landscape of biofertilizers containing plant growth-promoting rhizobacteria in Iran: Progress and research prospects.

Current Research in Microbial Sciences, v. 7, p. 100268, 2024. DOI: 10.1016/j.crmicr.2024.100268.

KUMAR, S. et al. Biofertilizers: An ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 3, p. 100094, 2022. DOI: 10.1016/j.crmicr.2021.100094.

MENEZES, J. F. F. et al. Contaminação de águas superficiais por agrotóxicos: análise dos impactos causados na saúde humana e ambiental. **Perspectivas Online: Biológicas & Saúde**, v. 11, n. 37, p. 19-35, 2021. DOI: 10.25242/8868113720212259

MIRANDA, A. M. et al. Advances in the Development of Biofertilizers and Biostimulants from Microalgae. **Biology**, v. 13, n. 3, p. 199, 2024. DOI: 10.3390/biology13030199.

PIMENTA, R. M. B. et al. Conhecimento científico sobre biofertilizantes ao longo de 120 anos de pesquisa. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 9, 2025. DOI: 10.54033/cadpedv22n9-341.

REYES, P. et al. Uso de la biodiversidad para mejorar la agricultura: tendencias en la investigación y el mercado en biofertilizantes en Colombia. **Naturaleza y Sociedad. Desafíos Medioambientales**, v. 10, p. 185-211, 2024. DOI: 10.53010/nys10.06.

SAMANTARAY, A. et al. Advances in microbial based bio-inoculum for amelioration of soil health and sustainable crop production. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 7, p. 100251, 2024. DOI: 10.1016/j.crmicr.2024.100251.

SANTOS, E. L. et al. Impactos causados pelo uso excessivo de agroquímicos na agricultura familiar: uma revisão. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 3, p. 1-15, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n3-113.

SZPYRKA, E. et al. Effect of effective microorganisms on the bioremediation of acetonitrile contaminated soil. **Scientific Reports**, v. 15, p. 1-12, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-10351-0.

ZEHRA, A. et al. Efficiency of microbial bio-agents as elicitors in plant defense mechanism under biotic stress: A review. **Current Research in Microbial Sciences**, v. 2, p. 100054, 2021. DOI: 10.1016/j.crmicr.2021.100054.

Autores

Ayla Rodrigues Trindade

Programa de Pós-graduação em Bioquímica, Universidade Estadual de Maringá

CAPÍTULO 5

O fluxo energético da vida

Daniel Caligari

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c5>

Resumo

Este capítulo tem o objetivo de popularizar conceitos fundamentais da bioquímica, explicando de forma clara e acessível como os seres vivos captam, armazenam e utilizam a energia. Utilizando analogias do cotidiano — como usinas solares e hidrelétricas —, o texto descreve o fluxo energético biológico, desde a captação da luz solar pelos organismos fotossintetizantes até a conversão dessa energia nas ligações químicas das moléculas orgânicas (combustíveis). Aborda-se também o papel dos cloroplastos, o funcionamento da enzima ATP sintase e a importância do ATP como "moeda energética" universal que viabiliza o trabalho celular e a biossíntese da vida. O foco é demonstrar, para o público geral, a alta complexidade e eficiência da infraestrutura energética biológica.

Palavras-chaves: Fluxo Energético; Fotossíntese; ATP; Bioquímica; Metabolismo.

Abstract

This chapter aims to popularize fundamental biochemistry concepts by explaining in a clear and accessible way how living beings capture, store, and utilize energy. Using everyday analogies — such as solar power plants and hydroelectric dams —, the text describes the biological energy flow, from the capture of sunlight by photosynthetic organisms to the conversion of this energy into the chemical bonds of organic molecules (fuels). It also addresses the role of chloroplasts, the function of the ATP synthase enzyme, and the importance of ATP as the universal "energy currency" that enables cellular work and the biosynthesis of life. The focus is to demonstrate, to the general public, the high complexity and efficiency of the biological energy infrastructure.

Key words: Energy Flow; Photosynthesis; ATP; Biochemistry; Metabolism.

1. Do que as coisas que existem são feitas?

É importante termos na ponta da língua noções básicas sobre: do que as coisas que existem são feitas (estamos falando tanto de você que está lendo quanto de uma pedra, poeira ou qualquer outra coisa que ocupa algum lugar no espaço). As “coisas que existem fisicamente” nós chamamos tecnicamente de matéria: o que ocupa espaço e possui massa. Do que é feita? Uma boa analogia para começarmos é imaginar a matéria como um “agregado”, “aglomerado” ou uma sopinha de pequenas partículas, porém que pode chegar a um nível altíssimo de organização, com ligações totalmente específicas entre si. Quanto mais partículas iguais ou uma mistura delas estiverem juntas, maior a massa dessa matéria. A propósito, estas pequenas partículas são realmente muito, muito pequenas, e dessas todos já ouvimos falar: são os átomos.

Agora o assunto começa a ficar interessante pois a conexão que estes átomos estabelecem um com os outros é a chave para a possibilidade da subida no nível de complexidade da vida. Ligações fortes entre os átomos formam as moléculas, existindo infindáveis possibilidades. Se tudo é feito de átomos, tudo é feito de moléculas. Temos agora dois níveis de organização (átomos – moléculas) bem definidos. Apesar de ser importante recapitular sobre átomos e moléculas, a informação relevante destes dois parágrafos é que as moléculas guardam em si uma outra coisa que ainda não falamos, mas que é a base para que as coisas – que existem – aconteçam (sair da possibilidade para a realidade, sair do estado de potência para o estado de ação): a energia.

A energia em certos casos fica guardada em uma molécula como uma “mola comprimida”. Precisou de um tanto de energia para juntar um átomo com outro e formar uma molécula, por isso se esta ligação for quebrada, uma quantidade proporcional de energia será liberada. E é mesmo como uma mola esticando rapidamente após soltar, sendo que a energia que se aplica ao comprimir a mola se torna potencial e depois cinética – ou chame de movimento – quando a mola é solta. Trabalhamos sem perceber um outro conceito fundamental: a energia é conservada, ela muda de estado, forma, lugar, aspecto, mas continua tendo a mesma quantidade total.

Os seres vivos sempre “souberam” disso e todo o fluxo energético da vida utiliza a energia presente nas moléculas orgânicas para viabilizar absolutamente

todos os processos biológicos. Para facilitar o entendimento, as moléculas orgânicas de que falo são combustíveis no sentido mais puro da palavra. Pense que o gás da sua cozinha é composto por moléculas orgânicas que possuem energia armazenada (potencial) em sua composição. Dizemos que ela é “orgânica” quando é uma molécula com estrutura de carbono (um dos átomos da qual falamos anteriormente) e geralmente originada a partir de moléculas que de origem biológica. O gás butano que sai no fogão da sua casa possui quatro carbonos ligados entre si com alta estabilidade. Estas ligações possuem elétrons compartilhados com altíssimo nível de energia. Para separar um carbono do outro é necessário uma outra molécula (gás oxigênio O_2 , o mesmo que respiramos) que possui a capacidade de desfazer esta ligação entre os carbonos. Neste nosso exemplo o O_2 tem uma verdadeira atração e necessita adquirir um carbono do butano – tecnicamente o que ele quer mesmo são os elétrons de alta energia que fazem parte da ligação entre dois carbonos. Quando ocorre esta reação o oxigênio se junta com um carbono e parte da energia que estava armazenada na ligação rompida é liberada como calor e energia luminosa (eletromagnética). Esta lógica vale para caracterizar o conceito de combustível e podemos replicar este exemplo com virtualmente todos os combustíveis conhecidos do nosso cotidiano como gasolina, etanol e outros.

Dentre os combustíveis que a vida utiliza, os principais são muito bem conhecidos pelo público em geral, pois sempre estão nas nossas refeições, exatamente devido ao fato de que estes também são os nossos combustíveis. Estamos falando de três tipos de moléculas principais: açúcares, gorduras e proteínas. Os açúcares não são apenas os doces, mas estamos falando de carboidratos como o amido do arroz, do milho, celulose, e o açúcar que usamos na cozinha. Estas moléculas são compostas de carbono, hidrogênio e oxigênio, e as ligações presentes entre os átomos dos carboidratos possuem energia armazenada e é usada pelos organismos para obtenção de energia rápida. As gorduras são moléculas com grande quantidade de energia armazenada, compõe grande parte dos nossos alimentos e é utilizada energeticamente como uso secundário (estocagem). As proteínas também podem ser utilizadas como fonte de energia de modo indireto e o nosso corpo, por exemplo, utiliza em situações de escassez. É válido lembrar que estamos tratando apenas do

aspecto energético destas moléculas pois seria impossível em um único livro discutir sobre todas as outras funções e utilizações que estas moléculas possuem no contexto biológico. Esse detalhe não é só importante, mas também intrigante e superinteressante. De fato, a vida utiliza as mesmas moléculas em funções que vão desde o uso como combustível, como ruas celulares (microtúbulos), como “carros” para locomoção nestas ruas (cinesinas), como geradores em “usinas” (ATP sintetases), como máquinas que realizam funções específicas em uma linha de produção industrial (enzimas). Mas isto é assunto para outro livro.

2. A energia que liga o sistema da vida vem de uma grande usina estelar

A próxima pergunta a ser respondida para entendermos o fluxo da energia da vida é: de onde vem a energia que está armazenada nas moléculas? Como estas moléculas são produzidas se é necessário energia para que as ligações entre os carbonos de um açúcar, por exemplo, sejam estabelecidas? Em outras palavras: de onde vem a energia para “apertar a mola”?

Vamos responder estas questões iniciando com um breve detalhamento da lei da conservação de energia que foi citado no primeiro tópico. De acordo com esta lei a energia de um sistema – neste caso vamos encarar como um sistema o nosso universo – é constante, não aumenta, não diminui, apenas muda de forma. Tendo isso em mente, todo o sistema da biosfera obtém energia a partir da transformação da energia da luz solar em energia química. Trocando em miúdos, a energia que vem do sol é transformada em energia armazenada em ligações químicas pelos organismos vivos que realizam a fotossíntese. Esse processo é um caso aparte e com certeza muito interessante. Já voltamos a ele, primeiro vamos lidar com o fato de que tudo (em termos energéticos) vem do sol e processar esta informação de modo mais detalhado.

A usina primária que abastece o fluxo de energia da vida é o sol. É uma usina de fusão nuclear que consome hidrogênio devido à grande pressão que estes átomos estão lá dentro, fazendo com que um átomo de hidrogênio se funda com outro gerando um novo átomo. Veja que neste caso é diferente da energia armazenada em moléculas orgânicas, que entre um átomo e outro existe uma

ligação que carrega esta energia potencial. O sol funde dois átomos em um único átomo: um novo átomo, o conhecido gás hélio (He). Esta fusão é a mesma de uma bomba de fusão atômica, e libera uma quantidade de energia absurdamente grande. Esta energia é liberada pelo sol em diversas formas, uma delas é a na forma de energia luminosa, que contém ondas eletromagnéticas (um tipo de onda estudada na física) com diversos níveis de energia (ondas com frequências baixas, como a luz infravermelha e radiações altas como o raio-X, além de todas as frequências do espectro observável que geram as cores do arco-íris). A luz por ter um caráter de onda-partícula, viaja em pacotes que são partículas de energia luminosa que chamamos na academia de fótons, que contém um certo nível de energia consigo.

Como a vida capta e transforma a energia solar em energia química

Aqui começamos a falar da questão mais intrigante para mim, e que me motivou a escolher este tema: o fato de os seres fotossintetizantes como plantas, algas e outros organismos produzem o seu próprio combustível. Assim como uma placa fotovoltaica converte a energia luminosa em energia elétrica, os seres fotossintetizantes convertem a energia luminosa em energia química. O sistema da fotossíntese parece mesmo com um sistema de captação de luz ou uma antena parabólica, e o início de tudo está em um complexo de proteínas e moléculas fotossensíveis (pigmentos como clorofila) que damos o nome de complexo antena. Vamos nos situar: estamos falando de algo que ocorre nas células vegetais (sim, isso é microscópio, é uma placa microscópica), especificamente dentro delas em um compartimento chamado “cloroplasto”. Este compartimento possui uma membrana que delimita a parte interna e é precisamente nesta membrana (chamada tilacóide) que está localizado o complexo antena. Imagina que este complexo possui muitas proteínas e pigmentos organizados de um modo a concentrar o máximo de luz solar e o máximo de frequências possíveis (pigmentos vermelhos absorvem ondas com menor frequência, por exemplo) em um único ponto. Parece mesmo com um jogo de espelhos que você mira no sol e é concentrado em um ponto específico desejado. Aquele lugar esquenta porque a energia da luz foi concentrada em um ponto. Este ponto no complexo antena é chamado de centro de reação. Deste

modo, os fótons ao incidirem sobre a membrana tilacóide são captados por todas as moléculas fotossensíveis, sendo a energia destes fótons é parcialmente absorvida e o mesmo, com menos energia, é transmitido por um caminho concêntrico, de um captador até o outro, até esse fóton chegar ao centro da reação. Neste ponto, onde toda a energia é concentrada, estão presentes as famosas moléculas de clorofila, que são proteínas que absorvem o fóton. A energia do fóton é utilizada para excitar elétrons nesta proteína, que ficam energizados e são transferidos para outras moléculas: os aceptores de elétrons – que são como capacitores que são carregados e descarregam em momentos e lugares específicos. São moléculas que podem “pegar” elétrons com alta carga energética proveniente da clorofila e literalmente transportar para outras regiões, outras moléculas, outras vias e reações. Tecnicamente podemos citar alguns aceptores: NADH^+ , NADPH , FADH_2^+ , dentre outros que participam deste processo.

O outro destino dos elétrons energizados que saem das clorofilas são os transportadores de elétrons. Estes não são como baterias ou capacitores, mas como cabos de alta tensão. Estes “cabos” são proteínas específicas que se localizam ao longo da membrana, ao redor dos complexos antena. Elas não utilizam esta energia em outro lugar como os aceptores, mas na própria membrana tilacóide. O que eles fazem? Ao receber os elétrons altamente energizados do centro da reação este elétron é então repassado para o próximo transportador, gerando pontos de transmissão de energia ao longo do percurso na membrana. Como todo fio de alta tensão libera calor como perda da energia ao transmitir de um ponto ao outro, quando um transportador passa um elétron para outro, parte da energia é utilizada para transferir um próton (H^+) que se localiza fora da membrana tilacóide para dentro da membrana (no estroma, a parte mais interna do cloroplasto. Esse processo necessita de energia pois a quantidade de H^+ é muito maior internamente, então o próton não passa espontaneamente para dentro. A membrana interna gera uma verdadeira barragem que impede a passagem de H^+ para dentro, mas com a energia da transmissão dos elétrons pelos transportadores é possível, com trabalho, bombear estes para dentro mesmo contra o gradiente de concentração. Vamos falar da hidrelétrica daqui a pouco.

Outro ponto importante é o papel da água no processo da fotossíntese e é o motivo pelo qual as plantas precisam tanto de água para realizar esta função: a água age como um doador de elétrons para repor o elétron perdido pela clorofila a receber a energia luminosa. Quando a luz bate na molécula de água no centro de reação ocorre um processo de quebra (fotólise) da molécula, gerando hidrogênio (chamamos de próton ou H^+ , pois está sem o seu elétron) e uma molécula do gás oxigênio, exatamente os constituintes da água (lembra-se da sigla: H_2O ?), além de um elétron que entra no lugar do elétron perdido pela clorofila quando recebeu a luz solar. O oxigênio gerado no processo é o oxigênio que dizemos que as plantas liberam na atmosfera. Viu como um evento bioquímico altamente complexo pode ser observado simplesmente ao respirar?

Mas, e o próton (H^+) que foi gerado na fotólise? Este fica dentro do estroma e se junta aos outros H^+ bombeados para dentro a partir dos transportadores citados acima. Falamos muito sobre usinas, energia, mas ainda não entramos em um sistema idêntico a uma hidrelétrica que funciona dentro dos cloroplastos: Daí para frente podemos considerar a analogia de uma hidrelétrica: os prótons que se acumulam dentro do estroma possuem o mesmo tipo de energia que um rio represado por uma barragem.

A água quer passar pela barragem pois tem uma energia potencial dada pela gravidade tentando empurrá-la para baixo. Quando abrimos uma passagem pequena, a água passa por ela com muita energia cinética (movimento da água). Nestas passagens, as usinas hidrelétricas colocam turbinas que transformam o movimento da água em energia elétrica ao rodar as turbinas e, junto com elas, rodar geradores de eletricidade. Sim, é um pouco constrangedor pois parece mesmo que copiamos tudo: nas “barragens” da fotossíntese, canais são abertos e, de fato, possui uma proteína motora que mais parece uma turbina que gira (literalmente ela gira conforme a passagem dos H^+). A força potencial do H^+ querendo sair devido a grande concentração deles em relação ao lado de fora da “barragem”, somada ao fato de que só tem o canal com a sua turbina para sair, temos uma energia suficiente para carregar as moedas de troca da vida: o ATP. A ATP sintetase é a proteína que gira no canal e liga um fosfato inorgânico (um átomo de fósforo ligado com 4 oxigênios) com uma molécula de ADP (que é o cartão ou ficha descarregada), gerando a ficha carregada, o cartão

carregado, a bateria carregada, como queiram chamar. Este é o ponto nevrálgico do aproveitamento energético. Imagina que todas as máquinas que funcionam dentro das células, fazendo qualquer trabalho, só consiga funcionar com uma ficha carregada de energia. Esta ficha é o ATP. O ATP é uma molécula que possui muita energia armazenada e pode ser utilizada em “máquinas” que possuem o encaixe para que ele chegue e libere a energia armazenada especificamente para a realização de um trabalho, no local correto, na reação correta, na quantidade correta. Tudo economicamente regulado.

3. O processo de fabricação dos combustíveis, das peças, das estruturas e das próprias máquinas das linhas de produção das fábricas da vida.

Finalmente, agora sabemos como as plantas captam a energia da luz e armazenam em formato químico, de modo que esteja em baterias utilizáveis nas linhas de produções da vida. O próximo passo é descobrir como os combustíveis – as moléculas complexas e cheias de energia com os açúcares – e as outras estruturas como máquinas, paredes e peças são construídas, e como o processo de fabricação utiliza a energia armazenada nas baterias. Não menos importante, falaremos de modo superficial sobre como os organismos que não produzem os combustíveis a partir da energia solar (como nós) utilizam os combustíveis para produzir seus próprios ATPs se alimentando dos combustíveis produzidos pelas plantas e respirando o oxigênio também produzido por elas. Isto é necessário pois os organismos que não fazem fotossíntese não podem utilizar diretamente os combustíveis obtidos quando se alimentam, pois o funcionamento das máquinas internas de uma célula, como as nossas, também dependem do mesmo tipo de ficha: o ATP. Estamos querendo dizer que não é possível que uma molécula de glicose, mesmo que tenha grande quantidade de energia em suas ligações químicas, seja utilizada como uma ficha que possibilita o uso desta energia para rodar seus maquinários internos. Isto por dois motivos principais: o primeiro é que se toda a energia da glicose for liberada de uma vez é possível que a célula aqueça até fritar. O outro motivo é que a glicose não é uma ficha universal que cabe em todas as máquinas, o ATP é.

Primeiro vamos elucidar como as plantas produzem o seu próprio alimento utilizando as baterias energéticas carregadas com a luz solar. Esse

processo chamamos de biossíntese e cada tipo de molécula possui rotas metabólicas específicas, com reações distintas e custo energético diferente. Por exemplo: a síntese de sacarose (o açúcar de cozinha) que é um carboidrato de alto valor energético e de uso rápido possui um conjunto de reações que realizam a junção de uma molécula de glicose com uma de frutose, formando um dissacarídeo (um açúcar composto por 2 tijolinhos, ou monômeros). Para esta reação ocorrer a planta necessita já ter de antemão moléculas de glicose e frutose, uma enzima (uma máquina especialista em utilizar a energia do ATP para possibilitar que as reações impossíveis de acontecerem aconteçam em tempo hábil) e claro: o ATP. Do mesmo modo, a síntese de proteínas possui uma rota – infinitamente elaborada – que lê a informação dos genes e traduz na linguagem das proteínas (uma proteína é um polímero formado por blocos de aminoácidos, cada proteínas tem uma sequência específica deles). Para isso são gastos muitos ATPs.

Mas, além desses exemplos, precisamos falar da fonte primária de combustível após as baterias estarem carregadas com a energia solar: o primeiro combustível que todas as plantas sintetizam é obtido em um ciclo chamado de “Ciclo de Calvin”. Neste ciclo, uma molécula intermediária chamada ribulose (um açúcar de 5 carbonos) sempre tem que existir de antemão, e aquele CO_2 que ouvimos falar que as plantas captam, limpando o ambiente, é exatamente o CO_2 que, com a ajuda de uma enzima importantíssima para a vida (chamada rubisco), é ligado na ribulose, gerando como produto um açúcar de 6 carbonos. Esse carbono adicionado era inorgânico, e agora faz parte de uma molécula orgânica, e a energia armazenada nesta ligação já é uma outra forma de aproveitamento da energia solar, tanto para a própria planta funcionar no que diz respeito aos seus outros processos moleculares internos, como também para os organismos que se alimentarão desta planta utilizar esta energia em seus processos de geração de ATP. Baseado nesta primeira molécula de 6 carbonos e em alguns outros passos que não convém aprofundar neste escopo, todas as outras macromoléculas, gorduras, açúcares complexos, nucleotídeos podem ser sintetizadas. No próximo capítulo, iremos elaborar um pouco mais sobre como tanto as plantas como os animais e virtualmente todos os seres vivos quebram as moléculas de açúcar – e outras – liberando CO_2 e utilizando a energia

presente nessas ligações rompidas para, novamente, carregar aceptores de elétrons e, agora nas mitocôndrias, utilizar esta energia para fazer a hidrelétrica da mitocôndria funcionar, o que é análogo a hidrelétrica dos cloroplastos na fotossíntese, com um fluxo de H^+ fazendo as turbinas (ATP sintases) girar e produzir ATPs.

4. Referências

AMABIS, José Mariano; MARTHO, Gilberto Rodrigues. **Biologia: Biologia das células: volume 1**. 4. ed. São Paulo: Moderna, 2015.

NELSON, David L.; COX, Michael M. **Princípios de Bioquímica de Lehninger**. 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2019.

PETCHEY, Sara; TREAGUST, David; NIEBERT, Kai. Improving University Life Science Instruction with Analogies: Insights from a Course for Graduate Teaching Assistants. **CBE—Life Sciences Education**, v. 22, n. 2, ar24, 2023. DOI: 10.1187/cbe.22-07-0142.

TRUJILLO, Caleb M.; ANDERSON, Trevor R.; PELAEZ, Nancy J. A Model of How Different Biology Experts Explain Molecular and Cellular Mechanisms. **CBE—Life Sciences Education**, v. 14, n. 2, ar20, 2015. DOI: 10.1187/cbe.14-12-0229.

Autores

Daniel Caligari

Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Maringá

CAPÍTULO 6

O uso industrial das enzimas: ênfase na lacase

Danielly Maria Paixão Novi

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c6>

Resumo

As enzimas têm se consolidado como ferramentas essenciais para o desenvolvimento de processos industriais mais eficientes, sustentáveis e ambientalmente responsáveis. Por atuarem como catalisadores biológicos altamente específicos, essas biomoléculas permitem a realização de reações químicas sob condições brandas de temperatura, pH e pressão, reduzindo o consumo energético e a geração de subprodutos tóxicos. Nesse contexto, a lacase destaca-se como uma das enzimas de maior versatilidade biotecnológica, sendo amplamente aplicada na degradação de poluentes, no tratamento de efluentes industriais, na indústria têxtil, no setor de papel e celulose, na biorremediação ambiental e em processos de química verde. Este capítulo apresenta uma revisão descritiva sobre o uso industrial das enzimas, com ênfase na lacase, abordando suas características bioquímicas, fontes microbianas, estratégias de produção, aplicações industriais e perspectivas futuras, de forma acessível, visando a popularização da bioquímica e a aproximação entre ciência, indústria e sociedade.

Palavras-chave: enzimas industriais; lacase; biotecnologia; biorremediação; sustentabilidade.

Abstract

Enzymes have become essential tools for the development of more efficient, sustainable, and environmentally friendly industrial processes. Acting as highly specific biological catalysts, enzymes enable chemical reactions under mild conditions of temperature, pH, and pressure, reducing energy consumption and the generation of toxic by-products. In this context, laccase stands out as one of the most versatile biotechnological enzymes, being widely applied in pollutant degradation, industrial wastewater treatment, textile industry, pulp and paper sector, environmental bioremediation, and green chemistry processes. This chapter presents a descriptive review of the industrial use of enzymes, with emphasis on laccase, addressing its biochemical characteristics, microbial sources, production strategies, industrial applications, and future perspectives, using accessible language aimed at the popularization of biochemistry and the connection between science, industry, and society.

Keywords: industrial enzymes; laccase; biotechnology; bioremediation; sustainability.

1. Introdução

O crescimento industrial e o avanço tecnológico das últimas décadas trouxeram benefícios significativos para a sociedade, mas também intensificaram problemas ambientais, como a geração de resíduos, a contaminação de solos e águas e o aumento da demanda energética. Diante desse cenário, torna-se cada vez mais urgente o desenvolvimento de processos produtivos mais sustentáveis, capazes de conciliar eficiência econômica e responsabilidade ambiental.

A bioquímica surge como uma ciência central nesse processo de transformação, especialmente por meio do estudo e da aplicação das enzimas. Essas biomoléculas, produzidas naturalmente por organismos vivos, desempenham funções essenciais nos sistemas biológicos e, quando aplicadas industrialmente, permitem substituir processos químicos agressivos por alternativas mais limpas e eficientes¹².

As enzimas industriais já são amplamente utilizadas em setores como alimentos, detergentes, fármacos, biocombustíveis, papel e celulose, tratamento de efluentes e biorremediação ambiental. Entre elas, a lacase tem despertado grande interesse científico e tecnológico³ devido à sua ampla capacidade oxidativa, baixo impacto ambiental e versatilidade de aplicações⁴. Este capítulo tem como objetivo apresentar, de forma acessível e fundamentada, o papel das enzimas na indústria moderna, com ênfase especial na lacase, destacando sua importância como ferramenta biotecnológica para a construção de processos mais sustentáveis e inovadores.

2. Enzimas de interesse industrial

As enzimas podem ser definidas como catalisadores biológicos capazes de acelerar reações químicas específicas sem serem consumidas durante o processo. Diferentemente dos catalisadores químicos tradicionais, as enzimas atuam de maneira altamente seletiva, reconhecendo seus substratos com grande precisão, o que reduz a formação de produtos indesejáveis e aumenta a eficiência do processo⁵.

Do ponto de vista industrial, essa especificidade representa uma vantagem estratégica. Processos enzimáticos geralmente ocorrem em condições mais brandas de temperatura, pH e pressão, o que resulta em menor consumo energético e menor desgaste de equipamentos, além de reduzir riscos ocupacionais e impactos ambientais⁶.

Entre as principais classes de enzimas utilizadas industrialmente destacam-se as hidrolases (como amilases, proteases e lipases), as oxidoredutases (como lacases e peroxidases), as transferases e as isomerases. Cada uma dessas classes possui aplicações específicas, dependendo do tipo de reação desejada e do setor industrial envolvido.

As oxidoredutases, em especial, vêm ganhando destaque por sua capacidade de promover reações de oxidação e redução utilizando, muitas vezes, o oxigênio molecular como aceptor final de elétrons. Esse é o caso das lacases, enzimas multicobre que catalisam a oxidação de compostos fenólicos e não fenólicos, reduzindo o oxigênio a água, o que as torna particularmente atraentes sob a perspectiva da química verde⁽⁷⁾⁽⁸⁾.

Além disso, avanços na biotecnologia permitiram ampliar o uso industrial das enzimas por meio de estratégias:

- otimização das condições de cultivo,
- expressão heteróloga,
- imobilização enzimática,
- aplicação de mediadores redox,
- seleção de microrganismos produtores,

Essas abordagens têm contribuído para tornar os processos enzimáticos mais estáveis, reutilizáveis e economicamente viáveis em escala industrial⁹.

Dentro desse contexto, a lacase destaca-se como uma enzima modelo para demonstrar como a bioquímica pode ser aplicada de forma prática na indústria, unindo eficiência catalítica, sustentabilidade ambiental e inovação tecnológica.

3. Lacase: características bioquímicas e mecanismo de ação

A lacase é uma enzima pertencente à classe das oxidoredutases e é classificada como uma polifenol oxidase multicobre (EC 1.10.3.2). Sua principal característica é a capacidade de catalisar reações de oxidação de uma ampla variedade de compostos fenólicos e não fenólicos, utilizando o oxigênio molecular comoceptor final de elétrons e produzindo água como único subproduto da reação⁽⁵⁾⁽¹⁰⁾.

Do ponto de vista estrutural, a lacase apresenta quatro átomos de cobre organizados em três tipos distintos de centros catalíticos: Cobre Tipo 1 (T1): responsável pela oxidação do substrato;

Cobre Tipo 2 (T2) e Cobre Tipo 3 (T3): formam um centro trinuclear, onde ocorre a redução do oxigênio molecular a água.

Essa organização permite que a lacase funcione como uma espécie de “bateria biológica”, armazenando elétrons provenientes das reações de oxidação do substrato até que quatro elétrons estejam disponíveis para reduzir completamente uma molécula de oxigênio⁽⁴⁾⁽⁷⁾.

Quando um substrato fenólico é oxidado pela lacase, ocorre a formação de radicais livres altamente reativos. Esses radicais podem seguir diferentes caminhos reacionais, como polimerização, despolimerização ou rearranjos estruturais, o que explica a ampla diversidade de aplicações dessa enzima em processos industriais e ambientais¹¹.

Uma característica particularmente relevante da lacase é sua capacidade de atuar em sistemas mediados. Nesse caso, pequenas moléculas conhecidas como mediadores redox são inicialmente oxidadas pela lacase e, posteriormente, transferem elétrons para substratos que, isoladamente, não seriam oxidados pela enzima. Essa estratégia amplia significativamente o espectro de compostos passíveis de degradação, incluindo poluentes complexos e recalcitrantes⁽¹²⁾⁽¹³⁾.

4. Fontes microbianas de lacase

As lacases estão amplamente distribuídas na natureza e podem ser encontradas em plantas, insetos, bactérias e fungos. No entanto, os fungos,

especialmente os basidiomicetos, são considerados as principais fontes de lacase com relevância industrial, devido à elevada atividade enzimática, estabilidade e facilidade de produção⁽¹⁾⁽²⁾.

Entre os fungos produtores de lacase, destacam-se os chamados fungos de podridão branca, como *Trametes versicolor*, *Pleurotus ostreatus*, *Phlebia radiata* e *Ganoderma lucidum*. Esses microrganismos possuem a capacidade de degradar a lignina da biomassa vegetal, um polímero altamente complexo e resistente, o que evidencia o elevado potencial oxidativo de suas lacases⁽³⁾⁽⁴⁾.

Além dos fungos, lacases bacterianas têm despertado crescente interesse, principalmente devido à sua maior estabilidade em condições extremas de pH, temperatura e salinidade. Espécies bacterianas como *Streptomyces*, *Serratia* e algumas cianobactérias demonstram potencial promissor para aplicações em ambientes industriais severos⁽⁵⁾⁽⁶⁾.

A diversidade de fontes microbianas permite selecionar lacases com propriedades específicas, adequadas a diferentes processos industriais, o que amplia a flexibilidade de aplicação dessa enzima.

5. Produção de lacase e fatores que influenciam a atividade enzimática

A produção de lacase é influenciada por diversos fatores relacionados às condições de cultivo do microrganismo produtor. Entre os principais parâmetros estão a composição do meio de cultura, a fonte de carbono e nitrogênio, o pH, a temperatura, a agitação e a presença de indutores químicos⁽⁷⁾⁽⁸⁾.

5.1 Fonte de carbono e nitrogênio

As fontes de carbono mais comumente utilizadas incluem glicose, frutose, maltose, lactose e substratos lignocelulósicos. No entanto, concentrações elevadas de glicose podem inibir a produção de lacase, enquanto substratos poliméricos, como celulose e resíduos agroindustriais, tendem a favorecer sua expressão⁽⁴⁾⁽⁹⁾.

A produção de lacase é frequentemente associada à limitação de nitrogênio no meio de cultivo, embora esse efeito varie entre diferentes espécies

e cepas fúngicas. A relação carbono/nitrogênio exerce papel fundamental na regulação da expressão gênica da lacase⁽⁷⁾.

5.2 Temperatura e pH

A faixa ótima de temperatura para a produção e atividade da lacase geralmente varia entre 25 °C e 50 °C, dependendo da origem microbiana da enzima. Algumas lacases fúngicas mantêm elevada atividade mesmo em temperaturas mais altas, o que é desejável para aplicações industriais⁽⁸⁾.

O pH também influencia significativamente a atividade da lacase, sendo comum a observação de um perfil em forma de sino. Em geral, valores de pH entre 4,0 e 6,0 são considerados ideais tanto para a produção quanto para a atividade catalítica da enzima⁽¹⁰⁾.

5.3 Indutores e metais

A adição de compostos aromáticos, como álcool veratrílico e xilidina, bem como íons metálicos, especialmente cobre, pode aumentar significativamente a produção de lacase. O cobre atua não apenas como componente estrutural da enzima, mas também como indutor da expressão gênica⁽⁸⁾⁽¹¹⁾.

6. Aplicações industriais da lacase

A lacase tem se consolidado como uma das enzimas mais versáteis da biotecnologia industrial moderna. Sua ampla especificidade por substratos, aliada ao uso do oxigênio molecular como acceptor final de elétrons e à geração de água como único subproduto, torna essa enzima altamente atrativa para processos industriais sustentáveis. Diferentemente de muitos catalisadores químicos, a lacase atua sob condições mais brandas de pH e temperatura, reduzindo custos energéticos e impactos ambientais⁽¹⁾⁽⁴⁾.

Nos últimos anos, avanços em produção microbiana, engenharia genética e imobilização enzimática ampliaram significativamente o uso da lacase em diferentes setores industriais, conforme discutido a seguir.

6.1 Aplicações da lacase na indústria de papel e celulose

Na indústria de papel e celulose, a lacase é empregada principalmente em processos de deslignificação e branqueamento enzimático. Tradicionalmente, essas etapas utilizam grandes quantidades de compostos clorados e outros reagentes químicos agressivos, que geram resíduos tóxicos ao meio ambiente.

O uso da lacase, isoladamente ou em sistemas lacase-mediador, permite a oxidação seletiva da lignina, facilitando sua remoção e reduzindo a necessidade de produtos químicos convencionais. Esse processo contribui para a diminuição da carga poluente dos efluentes industriais e para a produção de papel com menor impacto ambiental⁽²⁾⁽³⁾.

Além disso, a aplicação da lacase melhora a qualidade da polpa celulósica e se alinha aos princípios da química verde, tornando-se uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente responsável.

6.2 Uso da lacase na indústria têxtil

A indústria têxtil é uma das maiores geradoras de efluentes coloridos e tóxicos, devido ao uso intensivo de corantes sintéticos. A lacase tem sido amplamente estudada para a descoloração e detoxificação de corantes azo, antraquinônicos e reativos, presentes nos efluentes têxteis.

Estudos demonstram que a lacase é capaz não apenas de remover a coloração visível, mas também de reduzir a toxicidade dos produtos de degradação, tornando o efluente menos nocivo aos organismos aquáticos⁽⁵⁾⁽⁶⁾. Esse aspecto é fundamental, pois a simples remoção da cor não garante a segurança ambiental do efluente tratado.

A aplicação da lacase nesse setor representa uma alternativa eficiente aos métodos físico-químicos tradicionais, que frequentemente demandam altos custos e geram resíduos secundários.

6.3 Aplicações da lacase na indústria alimentícia

Na indústria alimentícia, a lacase é utilizada principalmente em processos de clarificação, estabilização e melhoria sensorial de produtos. Exemplos incluem a clarificação de sucos, vinhos e cervejas, onde a enzima atua na remoção de compostos fenólicos responsáveis por turbidez, escurecimento e sabores indesejáveis.

Além disso, a lacase pode ser aplicada na modificação controlada de componentes alimentares, contribuindo para a melhoria da textura e estabilidade de determinados produtos⁽¹⁾⁽³⁾.

Por se tratar de uma enzima de origem natural, seu uso é bem aceito pela indústria e pelos consumidores, especialmente em um contexto de crescente demanda por alimentos mais naturais e processos menos agressivos.

6.4 Lacase em processos industriais sustentáveis e economia circular

A lacase desempenha papel central em estratégias de economia circular, especialmente no aproveitamento de resíduos agroindustriais e lignocelulósicos. Esses resíduos podem ser utilizados tanto como substrato para a produção da enzima quanto como alvos de processos de degradação e valorização⁽⁸⁾.

Diversos estudos relatam o uso da lacase na biorremediação de solos e águas contaminadas por pesticidas, fármacos, plastificantes e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾.

Essas aplicações demonstram como a bioquímica pode contribuir diretamente para soluções ambientais, conectando ciência, indústria e sustentabilidade de forma integrada.

6.5 Imobilização enzimática como estratégia industrial

Apesar de suas vantagens, o uso industrial da lacase em sua forma livre apresenta limitações, como baixa estabilidade operacional e dificuldade de recuperação da enzima após o processo. Para contornar esses desafios, técnicas de imobilização enzimática têm sido amplamente desenvolvidas.

A imobilização da lacase em suportes como sílica, quitosana, nanotubos de carbono e materiais magnéticos aumenta sua estabilidade térmica, resistência a variações de pH e possibilidade de reutilização, reduzindo custos operacionais⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾⁽²¹⁾.

Essas estratégias são fundamentais para viabilizar a aplicação da lacase em processos industriais contínuos e em larga escala.

6.6 Engenharia genética e produção em larga escala de lacase

O avanço das técnicas de engenharia genética tem permitido a produção heteróloga de lacases em microrganismos como leveduras e bactérias, aumentando o rendimento enzimático e facilitando o controle do processo produtivo.

A expressão de lacases fúngicas em sistemas como *Yarrowia lipolytica* e *Pichia pastoris*, bem como o uso de ferramentas modernas como CRISPR/Cas9, tem ampliado o potencial de aplicação industrial dessas enzimas⁽²²⁾⁽²³⁾⁽⁴⁾.

Esses avanços representam um passo importante para a consolidação da lacase como um biocatalisador estratégico na indústria do futuro.

7. Perspectivas futuras e popularização da bioquímica

A crescente preocupação com os impactos ambientais dos processos industriais tem impulsionado o interesse por soluções baseadas em enzimas. A lacase exemplifica como o conhecimento bioquímico pode ser traduzido em aplicações práticas, eficientes e sustentáveis.

A popularização da bioquímica, ao tornar esses conceitos acessíveis a públicos não especializados, contribui para aproximar ciência e sociedade. Compreender que enzimas naturais podem substituir processos poluentes reforça a importância da biotecnologia como ferramenta de transformação social e ambiental⁽¹⁾.

8. Considerações finais

A lacase destaca-se como uma enzima-chave para a transição rumo a processos industriais mais sustentáveis. Sua ampla aplicabilidade, aliada aos avanços em produção, imobilização e engenharia genética, consolida seu papel como um dos biocatalisadores mais promissores da biotecnologia moderna.

Ao integrar ciência básica, inovação tecnológica e aplicações industriais, a lacase representa um exemplo concreto de como a bioquímica pode contribuir para o desenvolvimento sustentável e para a construção de um futuro mais equilibrado.

9. Referências

1. AFREEN, Sumbul et al. Screening and optimization of laccase from cyanobacteria with its potential in decolorization of anthraquinonic dye Remazol Brilliant Blue R. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 10, p. 403–410, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.05.004>.
2. AHMAD, Imran et al. Catalytic insights into laccase for sustainable remediation of multifaceted pharmaceutically active micropollutants from water matrices: A state-of-art review. *Journal of Water Process Engineering*, v. 70, p. 106901, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106901>.
3. ALEXANDRINO, Ana Maria et al. Aproveitamento do resíduo de laranja para a produção de enzimas lignocelulolíticas por *Pleurotus ostreatus* (Jack: Fr). *Food Science and Technology*, v. 27, p. 364–368, 2007.
4. BACKES, Emanuelli et al. Production of fungal laccase on pineapple waste and application in detoxification of malachite green. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, v. 57, n. 2, p. 90–101, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/03601234.2022.2025739>.
5. BANKOLE, Paul Olusegun et al. Enhanced removal of dibutyl phthalate in a laccase-mediator system: optimized process parameters, kinetics, and environmental impact. *Journal of Environmental Management*, v. 348, p. 119227, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119227>.
6. DAMASCENO, Andrey Azedo. *Purificação e caracterização da lacase do fungo Trametes cubensis (Mont.) Sacc. 1891*. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal, Brasil, 2016.
7. DE FREITAS, Emanuelle Neiverth et al. Removal of bisphenol A by laccases from *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus pulmonarius* and evaluation of ecotoxicity of degradation products. *Chemical Engineering Journal*, v. 330, p. 1361–1369, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.08.051>.

8. DE QUEIROZ BAPTISTA, Nelânia Maria et al. Produção das enzimas lignina peroxidase e laccase por fungos filamentosos. *Scientia Plena*, v. 8, n. 1, 2012.
9. HERMOSILLA, E. et al. Redox mediator system: Expanding the potential of laccase-like nanozymes towards pollutant remediation. *Results in Engineering*, p. 104656, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104656>.
10. IARK, Daiane et al. Enzymatic degradation and detoxification of azo dye Congo red by a new laccase from *Oudemansiella canarii*. *Bioresource Technology*, v. 289, p. 121655, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121655>.
11. KYOMUHIMBO, Hilda Dinah; BRINK, Hendrik G. Applications and immobilization strategies of the copper-centred laccase enzyme: a review. *Heliyon*, v. 9, n. 2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13156>.
12. LI, Yangyang et al. A CRISPR/Cas9-based visual toolkit enabling multiplex integration at specific genomic loci in *Aspergillus niger*. *Synthetic and Systems Biotechnology*, v. 9, n. 2, p. 209–216, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.synbio.2024.01.014>.
13. ORLANDELLI, R. C.; SPECIAN, V.; FELBER, A. C.; PAMPHILE, J. A. Enzimas de interesse industrial: produção por fungos e aplicações. *SaBios – Revista de Saúde e Biologia*, v. 7, n. 3, 2012. Disponível em: <https://revista2.grupointegrado.br/revista/index.php/sabios/article/view/1346>. Acesso em: 8 jan. 2026.
14. PAIVA, Cindy Kurovski de Castro. *Produção de laccase por fungo isolado de sedimento marinho*. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal, Brasil, 2016.
15. PANIGRAHY, Namita et al. A comprehensive review on eco-toxicity and biodegradation of phenolics: Recent progress and future outlook. *Environmental Technology & Innovation*, v. 27, p. 102423, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102423>.
16. PATEL, Sanjay K. S. et al. Immobilization of laccase on SiO₂ nanocarriers improves its stability and reusability. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 24, n. 5, p. 639–647, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4014/jmb.1401.01025>.
17. SINGH, Anil Kumar et al. Laccase-based biocatalytic systems application in sustainable degradation of pharmaceutically active contaminants. *Journal of Hazardous Materials*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136803>.
18. SODHI, A. S.; BHATIA, S.; BATRA, N. Laccase: sustainable production strategies, heterologous expression and potential biotechnological

- applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135745>.
19. TAVARES, Ana P. M. et al. Laccase immobilization over multi-walled carbon nanotubes: kinetic, thermodynamic and stability studies. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 454, p. 52–60, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.04.054>.
 20. THEERACHAT, Monnat et al. Engineering and production of laccase from *Trametes versicolor* in the yeast *Yarrowia lipolytica*. *Bioresource Technology*, v. 125, p. 267–274, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.117>.
 21. UBER, Thaís Marques et al. Comparative detoxification of Remazol Brilliant Blue R by free and immobilized laccase of *Oudemansiella canarii*. *Biocatalysis and Biotransformation*, v. 40, n. 1, p. 17–28, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/10242422.2020.1835873>.
 22. UBER, Thaís Marques et al. Enzymes from basidiomycetes—Peculiar and efficient tools for biotechnology. In: *Biotechnology of Microbial Enzymes*. Academic Press, 2023. p. 129–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19059-9.00023-2>.
 23. UR RAHMAN, Mujeeb et al. Harnessing the power of bacterial laccases for xenobiotic degradation in water: A 10-year overview. *Science of the Total Environment*, v. 918, p. 170498, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170498>.
 24. ZAINITH, Surabhi et al. Microbial ligninolytic enzymes and their role in bioremediation. In: *Microorganisms for Sustainable Environment and Health*. Elsevier, 2020. p. 179–203. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819001-2.00009-7>.
 25. ZENG, Jun et al. Effects of polycyclic aromatic hydrocarbon structure on PAH mineralization and toxicity to soil microorganisms after oxidative bioremediation by laccase. *Environmental Pollution*, v. 287, p.

Autores

Danielly Maria Paixão Novi

Programa de Pós graduação em Bioquímica, Universidade Estadual de Maringá

CAPÍTULO 7

Bioquímica do clima: como o calor e o CO₂ alteram o metabolismo da vida

Gabriel Machado de Freitas

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c7>

Resumo

Este capítulo explora as mudanças climáticas sob uma perspectiva bioquímica, analisando como o aumento das concentrações de dióxido de carbono (CO₂) e a elevação da temperatura global afetam o metabolismo de plantas, animais e microrganismos. O texto aborda os fundamentos termodinâmicos e cinéticos das reações celulares, demonstrando como o estresse climático induz respostas integradas, como o redirecionamento do fluxo energético, o estresse oxidativo mediado por espécies reativas de oxigênio (ROS) e a adaptação das membranas biológicas. Discutem-se também as implicações dessas alterações para a agricultura, a conservação da biodiversidade e a dinâmica dos ecossistemas. Conclui-se que o entendimento dos limites bioquímicos e da plasticidade metabólica é essencial para o desenvolvimento de estratégias interdisciplinares de mitigação e adaptação frente às rápidas transformações ambientais globais.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Metabolismo celular; Estresse oxidativo; Bioquímica ambiental.

Abstract

This chapter explores climate change from a biochemical perspective, analyzing how increased concentrations of carbon dioxide (CO₂) and rising global temperatures affect the metabolism of plants, animals, and microorganisms. The text addresses the thermodynamic and kinetic foundations of cellular reactions, demonstrating how climate stress induces integrated responses, such as energy flux redirection, oxidative stress mediated by reactive oxygen species (ROS), and the adaptation of biological membranes. The implications of these alterations for agriculture, biodiversity conservation, and ecosystem dynamics are also discussed. It is concluded that understanding biochemical limits and metabolic plasticity is essential for developing interdisciplinary mitigation and adaptation strategies in the face of rapid global environmental transformations.

Keywords: Climate change; Cellular metabolism; Oxidative stress; Environmental biochemistry.

1. Introdução

Nas últimas décadas, as mudanças climáticas passaram a ocupar posição central nos debates científicos e sociais, sendo amplamente reconhecidas como um dos maiores desafios ambientais do século XXI. Esse processo está fortemente associado às atividades humanas, especialmente à queima de combustíveis fósseis, ao desmatamento e às mudanças no uso e ocupação do solo, que intensificaram a liberação de gases de efeito estufa para a atmosfera. Entre esses gases, destacam-se o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e os gases fluoretados, cujas concentrações atmosféricas aumentaram de forma significativa desde o início da Revolução Industrial.

O efeito estufa é um fenômeno natural essencial à vida na Terra, pois permite a retenção de parte do calor irradiado pela superfície, mantendo temperaturas adequadas aos processos biológicos. Contudo, o aumento excessivo da concentração desses gases tem intensificado esse efeito, provocando elevação da temperatura média global e agravando processos de degradação ambiental, incluindo a intensificação da poluição atmosférica. Avaliações sistemáticas conduzidas pelo IPCC demonstram que o aquecimento global observado desde o período pré-industrial está diretamente relacionado às emissões antrópicas de CO_2 , resultando em mudanças profundas nos sistemas naturais e biológicos.

O Quinto Relatório de Avaliação do IPCC indica que a influência humana constitui a principal causa do aquecimento observado desde meados do século XX, com aumento médio da temperatura global de aproximadamente $0,85\text{ }^\circ\text{C}$ entre 1880 e 2012, valor que já ultrapassa $1,5\text{ }^\circ\text{C}$ em diversas regiões do planeta (IPCC, 2013). Esse aquecimento tem sido acompanhado pelo aumento da frequência e da intensidade de eventos climáticos extremos, como secas, inundações, ondas de calor e tempestades, gerando impactos significativos sobre sistemas naturais, atividades humanas e economias locais.

Nesse contexto, modelos climáticos globais indicam que o aquecimento projetado para o século XXI é persistente e consistente em

diferentes cenários de emissão, com maior intensidade sobre os continentes em relação aos oceanos. Esse padrão possui implicações diretas para os sistemas biológicos terrestres, uma vez que intensifica o estresse térmico e altera a disponibilidade de água, afetando processos fisiológicos e metabólicos essenciais à vida.

Diversos estudos têm documentado mudanças nos ciclos biológicos de plantas e animais, incluindo alterações nos períodos de floração, frutificação, migração e reprodução, como respostas diretas às novas condições térmicas e hidrológicas impostas pelo clima. Essas alterações indicam que os organismos vivos estão sendo progressivamente forçados a ajustar seus processos internos para sobreviver em ambientes em rápida transformação, evidenciando que os impactos das mudanças climáticas não se limitam à escala ecológica, mas atingem as bases bioquímicas que sustentam a vida.

Outro aspecto amplamente discutido na literatura refere-se à irreversibilidade parcial das mudanças climáticas. Mesmo que as emissões de gases de efeito estufa sejam estabilizadas, parte do aquecimento global persistirá por séculos, devido à elevada inércia térmica dos oceanos. Isso significa que os organismos não responderão apenas a perturbações temporárias, mas a um novo estado climático de longo prazo, cujas implicações fisiológicas e metabólicas ainda estão sendo intensamente investigadas.

Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de compreender os impactos das mudanças climáticas a partir de uma perspectiva bioquímica. Alterações na concentração de CO₂, no regime térmico e na presença de poluentes afetam diretamente enzimas, vias metabólicas, sistemas redox e mecanismos de regulação celular. Assim, a bioquímica emerge como uma interface fundamental entre as mudanças ambientais globais e as respostas biológicas observadas, permitindo compreender como fatores climáticos modulam o metabolismo de plantas, animais e microrganismos, tema que será desenvolvido ao longo deste capítulo.

2. Fundamentos bioquímicos da interação entre clima e metabolismo

O metabolismo pode ser compreendido como o conjunto integrado de reações químicas que ocorrem no interior das células e que permitem aos organismos obter, transformar e utilizar energia e matéria para a manutenção da vida. Reações organizam-se em vias metabólicas interconectadas, tradicionalmente classificadas em processos catabólicos, responsáveis pela degradação de moléculas e liberação de energia, e processos anabólicos, voltados à síntese de compostos mais complexos.

O funcionamento adequado dessas vias depende de sistemas altamente regulados, que envolvem a ação de enzimas e mecanismos de sinalização celular capazes de ajustar o metabolismo às condições do ambiente. Dessa forma, o metabolismo representa a principal interface entre os organismos e o meio externo, sendo sensível a variações de temperatura, disponibilidade hídrica, concentração de CO₂ e presença de contaminantes ambientais.

Embora as reações bioquímicas resultem na formação de estruturas organizadas, os organismos vivos não violam as leis da termodinâmica, pois constituem sistemas abertos que mantêm sua organização interna à custa da dissipação de energia para o ambiente. A espontaneidade das reações metabólicas é determinada pela variação da energia livre de Gibbs, que depende das condições celulares, incluindo temperatura e proporção entre substratos e produtos.

Esse princípio é essencial para o funcionamento de vias metabólicas centrais, como o ciclo do ácido cítrico, fundamental para a produção de energia e para a biossíntese de aminoácidos. O fluxo direcional dessas vias é mantido por mecanismos bioquímicos como o acoplamento energético e a remoção contínua de produtos.

Além disso, o metabolismo celular apresenta elevado grau de regulação, permitindo ajustes rápidos frente às mudanças ambientais. Em condições de estresse, observa-se frequentemente o redirecionamento do fluxo metabólico para a manutenção celular, em detrimento do crescimento e da reprodução, refletindo uma estratégia adaptativa fundamental.

3. Efeitos do aumento de CO₂ sobre as vias metabólicas

Nesse sentido, a compreensão dos efeitos do aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono sobre o metabolismo dos organismos exige uma visão que vá além do papel clássico do CO₂ como substrato da fotossíntese. Embora o enriquecimento de CO₂ possa, em um primeiro momento, favorecer a assimilação de carbono, esse aumento também promove ajustes importantes em outras vias metabólicas, especialmente na respiração celular, que constitui o principal processo de liberação de energia para o funcionamento dos organismos vegetais. A respiração está diretamente associada ao balanço energético celular e ao fluxo interno de carbono, desempenhando papel central na manutenção da homeostase metabólica.

Estudos indicam que, sob condições de CO₂ elevado, a respiração das plantas não responde de maneira uniforme ou proporcional ao aumento da fotossíntese. Em muitos casos, observa-se que as taxas respiratórias em nível celular ou tecidual permanecem inalteradas ou até diminuem, resultado de ajustes bioquímicos relacionados à composição química dos tecidos, à eficiência das enzimas respiratórias e à reorganização do metabolismo energético. Esses ajustes sugerem que o aumento de CO₂ pode levar a uma utilização mais eficiente do carbono assimilado, reduzindo a necessidade de respiração para suprir demandas energéticas imediatas.

Entretanto, quando essas respostas são analisadas em escalas mais amplas, como no nível da planta inteira ou do ecossistema, os efeitos tornam-se mais complexos. O aumento da biomassa vegetal frequentemente associado ao CO₂ elevado pode resultar em maior respiração total do sistema, especialmente nas raízes, ainda que a respiração específica por unidade de tecido não aumente. Dessa forma, os ajustes metabólicos observados em nível celular podem se traduzir em respostas distintas quando considerados os fluxos globais de carbono, evidenciando a importância da escala de análise na interpretação dos efeitos metabólicos do CO₂.

Dessa perspectiva, o trabalho de González-Meler et al. (2004) reforça que a resposta respiratória ao aumento do CO₂ atmosférico representa um componente crítico e ainda incerto no entendimento do papel dos ecossistemas

terrestres como sumidouros de carbono. A respiração vegetal, ao controlar uma fração significativa do retorno de CO₂ para a atmosfera, exerce influência direta sobre o balanço global de carbono. Assim, as alterações bioquímicas induzidas pelo CO₂ elevado não apenas modulam o metabolismo energético dos organismos, mas também possuem implicações mais amplas para o funcionamento dos ecossistemas e para as projeções climáticas futuras.

Dessa forma, a análise integrada das respostas metabólicas ao CO₂ evidencia que os efeitos desse gás são multifacetados e dependem da interação com outros fatores ambientais, como temperatura e disponibilidade hídrica. Esses resultados reforçam a necessidade de uma abordagem bioquímica integrada para compreender como as mudanças climáticas afetam as vias metabólicas dos organismos vivos, estabelecendo uma base conceitual sólida para a discussão dos efeitos combinados do aquecimento global e de outros estressores ambientais nos tópicos subsequentes.

4. Impacto do aumento da temperatura nas vias metabólicas dos organismos

O aumento da temperatura média global constitui um dos aspectos mais consistentes e amplamente documentados das mudanças climáticas contemporâneas, exercendo influência direta sobre o funcionamento dos sistemas biológicos. Do ponto de vista bioquímico, a temperatura representa um fator determinante para a dinâmica das reações metabólicas, uma vez que afeta simultaneamente a cinética enzimática, a estabilidade estrutural das biomoléculas e o equilíbrio termodinâmico das vias metabólicas. Assim, a elevação contínua da temperatura ambiental impõe desafios significativos à manutenção da homeostase metabólica em plantas, animais e microrganismos.

As reações bioquímicas catalisadas por enzimas apresentam forte dependência da temperatura, com um intervalo ótimo no qual a velocidade de reação é maximizada. O aumento da temperatura eleva a energia cinética das moléculas, favorecendo a formação do complexo enzima-substrato e acelerando as reações metabólicas. No entanto, quando os limites térmicos são ultrapassados, ocorre a desnaturação parcial ou total das proteínas, resultando

na perda da atividade catalítica e na desorganização funcional das vias metabólicas. Esse efeito compromete processos essenciais, como a respiração celular, a fotossíntese e a síntese de macromoléculas, evidenciando a estreita relação entre temperatura e estabilidade bioquímica.

Em plantas, o aumento da temperatura está frequentemente associado ao estresse térmico, que afeta de maneira integrada diferentes componentes do metabolismo. O calor excessivo compromete a integridade das membranas celulares, altera a fluidez lipídica e interfere no funcionamento do aparato fotossintético, especialmente nos fotossistemas e nas enzimas envolvidas na fixação de carbono. Além disso, a elevação da temperatura intensifica a produção de espécies reativas de oxigênio em cloroplastos e mitocôndrias, resultantes do aumento do fluxo eletrônico e da instabilidade das cadeias transportadoras de elétrons. Como resposta, as plantas ativam sistemas antioxidantes e promovem ajustes metabólicos que priorizam a manutenção celular em detrimento do crescimento e da produtividade.

Nos animais, especialmente nos organismos ectotérmicos, a temperatura ambiental exerce influência direta sobre o metabolismo energético, uma vez que a regulação da temperatura corporal depende majoritariamente das condições externas. O aumento da temperatura pode elevar as taxas metabólicas basais, intensificando o consumo de substratos energéticos e a produção de calor metabólico. Em situações de estresse térmico prolongado, esses ajustes tornam-se energeticamente custosos, podendo levar ao desequilíbrio ácido-base, à disfunção mitocondrial e à redução da eficiência metabólica. Tais alterações bioquímicas refletem-se em respostas fisiológicas observáveis, como redução do crescimento, comprometimento reprodutivo e maior suscetibilidade a doenças.

O metabolismo microbiano também é fortemente influenciado pela temperatura, apresentando respostas rápidas às variações térmicas. O aumento da temperatura tende a acelerar a atividade metabólica dos microrganismos, intensificando processos como a decomposição da matéria orgânica e a respiração do solo. Embora essa aceleração possa aumentar temporariamente a disponibilidade de nutrientes, ela também contribui para a liberação de grandes quantidades de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa,

estabelecendo mecanismos de retroalimentação positiva do aquecimento global. Dessa forma, as respostas bioquímicas microbianas à temperatura desempenham papel central na regulação dos ciclos biogeoquímicos e na dinâmica climática global.

Diante desse cenário, o aumento da temperatura atua como um estressor ambiental de ampla abrangência, capaz de interferir simultaneamente na cinética das reações bioquímicas, na estabilidade das biomoléculas, no equilíbrio redox e na alocação energética dos organismos vivos. Embora os sistemas biológicos apresentem elevada plasticidade metabólica, existem limites fisiológicos e moleculares para a adaptação ao aquecimento contínuo. A compreensão desses limites é fundamental para interpretar os impactos das mudanças climáticas sobre a funcionalidade dos sistemas biológicos e para integrar os efeitos da temperatura com outros fatores ambientais, como o aumento da concentração de dióxido de carbono e a intensificação da poluição, que serão discutidos no capítulo seguinte.

5. Respostas bioquímicas integradas ao estresse climático

Do ponto de vista bioquímico, essas respostas refletem ajustes coordenados em diferentes níveis de organização celular, envolvendo a modulação de vias metabólicas, a regulação enzimática, o controle do equilíbrio redox e a reorganização do metabolismo energético, com o objetivo de manter a homeostase frente às pressões ambientais impostas pelo estresse climático.

Um dos principais eixos das respostas bioquímicas integradas ao estresse climático é a alteração do metabolismo energético. Sob condições de estresse térmico, hídrico ou químico, os organismos frequentemente redirecionam o fluxo metabólico, priorizando vias associadas à manutenção celular e à sobrevivência em detrimento de processos anabólicos relacionados ao crescimento e à reprodução. Esse redirecionamento metabólico tem sido amplamente descrito em plantas, animais e microrganismos como uma estratégia adaptativa de curto prazo, mas que implica aumento do custo energético e redução da eficiência metabólica global quando o estresse se torna prolongado.

O estresse oxidativo constitui outro componente central das respostas bioquímicas integradas às mudanças climáticas. Diferentes estressores ambientais, incluindo altas temperaturas, déficit hídrico, excesso de CO₂ e poluentes atmosféricos, convergem para o aumento da produção de espécies reativas de oxigênio em compartimentos celulares como mitocôndrias, cloroplastos e peroxissomos. Embora essas espécies desempenhem funções essenciais na sinalização celular em baixas concentrações, seu acúmulo excessivo promove danos oxidativos a lipídios, proteínas e ácidos nucleicos, comprometendo a integridade estrutural e funcional das células. Em resposta, os organismos ativam sistemas antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos, processo amplamente documentado como um dos principais mecanismos bioquímicos de tolerância ao estresse ambiental, ainda que energeticamente custoso.

Além do controle do equilíbrio redox, as respostas bioquímicas ao estresse climático envolvem ajustes na composição e funcionalidade das membranas biológicas. Variações de temperatura e disponibilidade hídrica afetam diretamente a fluidez das membranas celulares, interferindo no transporte de íons, na atividade de proteínas integrais e na compartimentalização metabólica. Diversos estudos demonstram que organismos submetidos a estresse térmico promovem alterações na composição lipídica das membranas, especialmente no grau de saturação dos ácidos graxos, como estratégia bioquímica para preservar a estabilidade estrutural e funcional, processo conhecido como adaptação homeoviscosa.

As respostas bioquímicas integradas ao estresse climático também envolvem a ativação de redes complexas de sinalização celular, responsáveis por perceber alterações ambientais e coordenar respostas metabólicas apropriadas. Metabólitos intermediários, íons e espécies reativas de oxigênio atuam como moléculas sinalizadoras, modulando a atividade enzimática, a expressão gênica e a alocação de recursos energéticos. Evidências recentes indicam que o papel das espécies reativas de oxigênio como sinalizadores é particularmente relevante na integração das respostas a múltiplos estressores climáticos, conectando metabolismo, expressão gênica e respostas fisiológicas em diferentes organismos.

Em plantas, essas respostas bioquímicas integradas manifestam-se por alterações simultâneas na fotossíntese, na respiração, no metabolismo do carbono e do nitrogênio e na síntese de metabólitos secundários associados à defesa. Em animais, observam-se ajustes no metabolismo energético, na função mitocondrial e na regulação hormonal, enquanto em microrganismos as respostas incluem mudanças rápidas nas taxas metabólicas, na utilização de substratos e na produção de gases de efeito estufa. Apesar das diferenças entre esses grupos, estudos indicam que os princípios bioquímicos subjacentes às respostas ao estresse climático são amplamente conservados, reforçando o metabolismo como ponto de convergência fundamental das respostas biológicas às mudanças ambientais globais.

Dessa forma, as respostas bioquímicas integradas ao estresse climático evidenciam que a capacidade adaptativa dos organismos depende da coordenação eficiente entre vias metabólicas, mecanismos de regulação enzimática, sistemas antioxidantes e redes de sinalização celular. Embora os sistemas biológicos apresentem elevada plasticidade metabólica, essa capacidade é limitada por restrições energéticas, termodinâmicas e estruturais. A exposição prolongada ou simultânea a múltiplos estressores pode levar ao esgotamento dos mecanismos compensatórios, resultando em perda de homeostase, redução do desempenho fisiológico e aumento da vulnerabilidade dos organismos, com implicações diretas para a estabilidade dos ecossistemas em um cenário de mudanças climáticas contínuas.

6. Implicações aplicadas e perspectivas futuras

A análise dos impactos das mudanças climáticas sob a perspectiva bioquímica fornece subsídios fundamentais para a compreensão e o enfrentamento dos desafios ambientais contemporâneos, com implicações diretas para a agricultura, a conservação dos ecossistemas naturais e o desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação. Evidências acumuladas demonstram que fatores climáticos como o aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono, a elevação da temperatura média global e a intensificação da poluição ambiental promovem alterações profundas nas vias metabólicas dos organismos vivos, afetando o balanço

energético, a estabilidade molecular e a eficiência metabólica. Essas alterações impõem limites bioquímicos às respostas adaptativas, os quais precisam ser considerados na formulação de estratégias sustentáveis de manejo e uso dos recursos naturais.

No contexto agrícola, os avanços no entendimento das respostas metabólicas ao clima têm revelado que os efeitos potencialmente positivos do aumento do CO₂ atmosférico sobre a fotossíntese e o crescimento vegetal são frequentemente compensados por limitações nutricionais, estresse térmico e desequilíbrios metabólicos. Estudos de longo prazo em ambientes enriquecidos com CO₂ demonstram que, embora possa ocorrer aumento da biomassa, há redução na concentração proteica dos tecidos vegetais, associada a alterações no metabolismo do nitrogênio e na síntese de aminoácidos, o que compromete a qualidade nutricional dos alimentos e a sustentabilidade da produção agrícola. Esses resultados indicam que estratégias futuras de melhoramento genético e manejo agrícola devem priorizar não apenas o aumento da produtividade, mas também a eficiência metabólica, a estabilidade enzimática e a capacidade antioxidante das plantas frente a múltiplos estressores ambientais.

Paralelamente, o conhecimento bioquímico tem se mostrado essencial para o desenvolvimento de soluções baseadas no uso de microrganismos benéficos como ferramentas de mitigação dos impactos climáticos. Microrganismos do solo desempenham papel central na ciclagem de nutrientes, na regulação do metabolismo vegetal e na dinâmica do carbono nos ecossistemas terrestres. Estudos demonstram que comunidades microbianas influenciam diretamente a produtividade vegetal, a resiliência ao estresse ambiental e o sequestro de carbono, ao modularem processos bioquímicos relacionados à respiração, à decomposição da matéria orgânica e à disponibilidade de nutrientes. Assim, a aplicação de inoculantes microbianos e o manejo da biodiversidade do solo emergem como estratégias promissoras para aumentar a resiliência metabólica dos sistemas agrícolas em cenários de mudanças climáticas.

Em ecossistemas naturais, a abordagem bioquímica permite compreender de forma mais precisa os limites adaptativos das espécies frente às pressões ambientais impostas pelo clima. Embora os organismos apresentem

plasticidade metabólica significativa, as respostas bioquímicas ao estresse térmico, hídrico e químico são energeticamente custosas e limitadas por restrições termodinâmicas e estruturais. Quando esses limites são excedidos, ocorre comprometimento da homeostase celular, redução do desempenho fisiológico e aumento da vulnerabilidade à mortalidade e à extinção local. Evidências indicam que a incapacidade de ajustar adequadamente as vias metabólicas está associada a perdas de biodiversidade e a alterações profundas no funcionamento dos ecossistemas.

Do ponto de vista das perspectivas futuras, os relatórios mais recentes do IPCC indicam que os impactos das mudanças climáticas tendem a se intensificar ao longo do século XXI, mesmo sob cenários de mitigação parcial das emissões de gases de efeito estufa. Projeções apontam para o aumento da frequência de eventos extremos, elevação contínua da temperatura e intensificação do estresse hídrico, fatores que atuarão de forma sinérgica sobre os sistemas metabólicos dos organismos vivos. Nesse contexto, torna-se evidente que a compreensão isolada de fatores climáticos é insuficiente, sendo necessária uma abordagem integrada que considere a interação entre múltiplos estressores ambientais e seus efeitos bioquímicos combinados.

Assim, futuras pesquisas devem priorizar abordagens interdisciplinares que integrem bioquímica, fisiologia, ecologia e modelagem climática, de modo a elucidar os mecanismos metabólicos que determinam a resiliência ou a vulnerabilidade dos organismos às mudanças ambientais. O aprofundamento do conhecimento sobre vias metabólicas sensíveis ao clima, mecanismos de regulação enzimática e limites bioquímicos da adaptação permitirá não apenas aprimorar a capacidade preditiva dos impactos climáticos, mas também orientar políticas públicas e práticas de manejo baseadas em evidências científicas robustas. Dessa forma, a bioquímica das mudanças climáticas consolida-se como um campo central para o enfrentamento dos desafios ambientais atuais e futuros, oferecendo bases conceituais sólidas para a construção de sistemas biológicos mais resilientes em um cenário de rápidas transformações globais.

7. Referências Bibliográficas

AINSWORTH, E. A.; LONG, S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? *New Phytologist*, Hoboken, v. 165, p. 351–372, 2005.

ATKINS, P.; DE PAULA, J. *Physical chemistry*. 10. ed. Oxford: Oxford University Press, 2014.

BARDGETT, R. D.; VAN DER PUTTEN, W. H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature*, London, v. 515, p. 505–511, 2014.

BERG, J. M.; TYMOCZKO, J. L.; STRYER, L. *Biochemistry*. 8. ed. New York: W. H. Freeman, 2015.

BLOOM, A. J. et al. CO₂ enrichment inhibits nitrate assimilation in wheat and *Arabidopsis*. *Science*, Washington, v. 328, p. 899–903, 2010.

CLELAND, E. E. et al. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology & Evolution*, Amsterdam, v. 22, n. 7, p. 357–365, 2007.

FINKEL, T. Signal transduction by reactive oxygen species. *The Journal of Cell Biology*, New York, v. 194, n. 1, p. 7–15, 2011.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, Amsterdam, v. 48, n. 12, p. 909–930, 2010.

GONZÁLEZ-MELER, M. A. et al. Plant respiration and elevated atmospheric CO₂ concentration: cellular responses and global significance. *Annals of Botany*, Oxford, v. 94, n. 5, p. 647–656, 2004.

HALLIWELL, B.; GUTTERIDGE, J. M. C. *Free radicals in biology and medicine*. 5. ed. Oxford: Oxford University Press, 2015.

HOCHACHKA, P. W.; SOMERO, G. N. *Biochemical adaptation: mechanism and process in physiological evolution*. New York: Oxford University Press, 2002.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

LOS, D. A.; MURATA, N. Membrane fluidity and its roles in the perception of environmental signals. *Biochimica et Biophysica Acta*, Amsterdam, v. 1666, p. 142–157, 2004.

MASSON-DELMOTTE, V. et al. (eds.). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2021.

MEEHL, G. A. et al. Global climate projections. In: IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

MITTLER, R. et al. ROS signaling: the new wave? *Trends in Plant Science*, Oxford, v. 16, n. 6, p. 300–309, 2011.

MITTLER, R. ROS are good. *Trends in Plant Science*, Oxford, v. 22, n. 1, p. 11–19, 2017.

MYSIAK, J. et al. Climate change vulnerability and adaptation in Europe: Knowledge gaps and research priorities. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Dordrecht, v. 21, n. 5, p. 729–748, 2016.

NELSON, D. L.; COX, M. M. *Lehninger principles of biochemistry*. 7. ed. New York: W. H. Freeman, 2017.

PARMESAN, C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, Palo Alto, v. 37, p. 637–669, 2006.

PEÑUELAS, J. et al. The human-induced imbalance between C, N and P in Earth's life system. *Global Change Biology*, Hoboken, v. 19, p. 10–20, 2013.

PEÑUELAS, J. et al. Shifting from a fertilization-dominated to a warming-dominated period. *Nature Ecology & Evolution*, London, v. 1, p. 1438–1445, 2017.

SCHEFFER, M. et al. Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, London, v. 461, p. 53–59, 2009.

SCHLESINGER, W. H.; ANDREWS, J. A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, Dordrecht, v. 48, p. 7–20, 2000.

SINENSKY, M. Homeoviscous adaptation — a homeostatic process that regulates the viscosity of membrane lipids in *Escherichia coli*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Washington, v. 71, n. 2, p. 522–525, 1974.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. *Plant physiology and development*. 6. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2015.

TAUB, D. R.; MILLER, B.; ALLEN, H. Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta-analysis. *Global Change Biology*, Hoboken, v. 14, n. 3, p. 565–575, 2008.

URBAN, M. C. Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, Washington, v. 348, n. 6234, p. 571–573, 2015.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A. et al. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity. *Ecology Letters*, Hoboken, v. 11, p. 296–310, 2008.

VOET, D.; VOET, J. G.; PRATT, C. W. *Fundamentals of biochemistry: life at the molecular level*. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2016.

Autores

Gabriel Machado de Freitas

Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Maringá.

CAPÍTULO 8

Microflorestas Urbanas: entendendo a ciência por trás das pequenas florestas nas cidades

Karina Goes dos Santos Borges

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c8>

Resumo

O capítulo discute o papel das microflorestas urbanas como solução baseada na natureza frente aos desafios ambientais e climáticos das cidades contemporâneas. A partir de revisão da literatura científica nacional e internacional, são abordados conceitos, fundamentos ecológicos, métodos de implantação com destaque para o método Miyawaki, evidências sobre serviços ecossistêmicos, como regulação térmica, sequestro de carbono, aumento da biodiversidade e benefícios sociais, além de limitações, controvérsias científicas e implicações socioespaciais. Os resultados indicam que, embora microflorestas apresentem elevado potencial para qualificar ambientes urbanos e contribuir para a adaptação climática, sua efetividade depende de planejamento adequado, monitoramento contínuo, contextualização ecológica e integração às políticas públicas. Conclui-se que as microflorestas devem ser compreendidas como ferramentas complementares da infraestrutura verde urbana, exigindo abordagens críticas, baseadas em evidências e comprometidas com princípios de justiça socioambiental.

Palavras-chave: microflorestas urbanas; soluções baseadas na natureza; infraestrutura verde; método Miyawaki; sustentabilidade urbana.

Abstract

This chapter discusses the role of urban microforests as nature-based solutions to address environmental and climate challenges in contemporary cities. Based on a review of national and international scientific literature, the chapter examines key concepts, ecological foundations, implementation methods particularly the Miyawaki method scientific evidence on ecosystem services such as thermal regulation, carbon sequestration, biodiversity enhancement and social benefits, as well as limitations, scientific controversies and socio-spatial implications. The findings indicate that although microforests show high potential to improve urban environments and support climate adaptation, their effectiveness depends on appropriate planning, continuous monitoring, ecological contextualization and integration into public policies. The chapter concludes that urban microforests should be understood as complementary components of green infrastructure, requiring critical, evidence-based and socially just approaches.

Keywords: urban microforests; nature-based solutions; green infrastructure; Miyawaki method; urban sustainability.

1. Introdução: Por que falar de microflorestas?

O processo acelerado de urbanização observado ao longo do século XXI tem intensificado uma série de desafios ambientais, sociais e climáticos nas cidades. Atualmente, mais da metade da população mundial vive em áreas urbanas, e as projeções indicam que esse percentual continuará a crescer nas próximas décadas. Esse cenário exerce forte pressão sobre os ecossistemas naturais, contribuindo para a perda de biodiversidade, impermeabilização do solo, aumento das temperaturas locais e maior vulnerabilidade a eventos climáticos extremos, como ondas de calor e enchentes.

Um exemplo fácil de perceber é o calor excessivo nos centros urbanos. Ruas asfaltadas, prédios e concreto absorvem calor durante o dia e o liberam lentamente à noite, deixando as cidades mais quentes do que as áreas rurais. Esse fenômeno é chamado de ilha de calor urbana. *Exemplo prático:* em um bairro com poucas árvores, caminhar ao meio-dia pode ser desconfortável. Já em uma rua arborizada, a sensação térmica costuma ser bem menor.

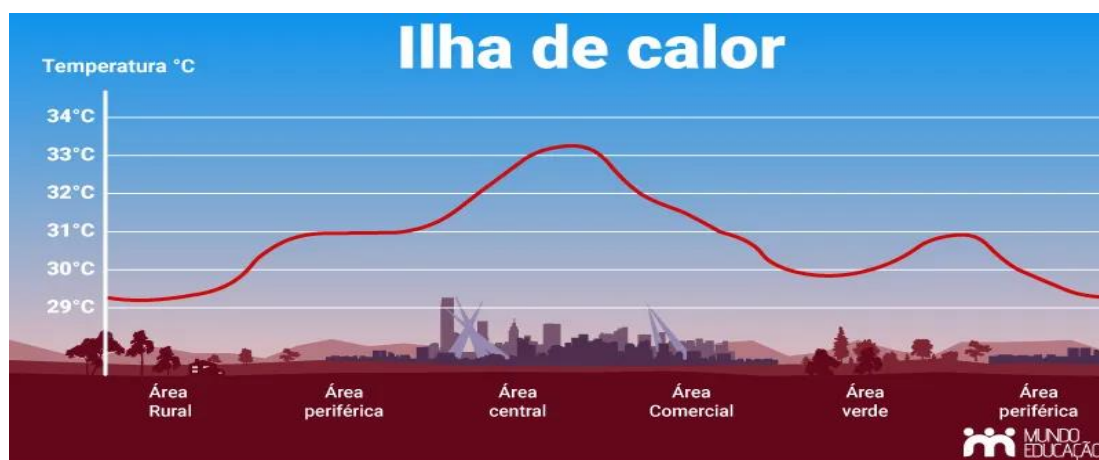


Figura 1. Representação esquemática do fenômeno de ilha de calor urbana, evidenciando a variação de temperatura entre áreas rurais, periféricas, centrais, comerciais e áreas verdes. Fonte: Adaptado de Mundo Educação (s.d.).

Nesse cenário, surgem as chamadas Soluções Baseadas na Natureza, que usam elementos naturais para resolver problemas urbanos, como calor, enchentes e poluição. As microflorestas urbanas fazem parte desse grupo.

As microflorestas urbanas são pequenos espaços verdes, mas muito densos e biodiversos, criados dentro das cidades. Mesmo ocupando áreas pequenas, elas conseguem gerar benefícios ambientais, sociais e climáticos importantes. Nesse sentido, o presente capítulo tem como objetivo discutir a importância das microflorestas no contexto das cidades verdes e do cenário climático global. Serão abordados os conceitos e definições relacionados às microflorestas urbanas, seus principais serviços ecossistêmicos, os métodos de implantação mais utilizados, as evidências científicas disponíveis, bem como os desafios, limitações e perspectivas futuras para sua integração ao planejamento urbano e às políticas públicas ambientais.

2. O que são microflorestas urbanas?

Microflorestas urbanas são pequenas florestas plantadas de forma intencional em áreas urbanas, geralmente em espaços antes vazios ou degradados, como terrenos baldios, áreas de escolas, margens de ruas ou praças pequenas.

Elas costumam ter tamanhos que variam de alguns metros quadrados até poucos milhares de metros quadrados, mas se diferenciam de jardins comuns porque:

- usam espécies nativas da região;
- têm plantio bem adensado (muitas árvores próximas);
- tentam imitar o funcionamento de uma floresta natural.

Na literatura, essas áreas também recebem nomes como *tiny forests*, *mini forests* ou *pocket forests*. *Exemplo prático*: uma microfloresta pode ocupar o espaço equivalente a dois ou três lotes urbanos, mas conter dezenas de espécies de árvores, arbustos e plantas menores.

No Brasil, várias cidades já implementaram microflorestas urbanas como forma de melhorar o ambiente urbano e combater problemas como o aumento da temperatura e a perda de biodiversidade. Em Campinas (SP), a prefeitura anunciou um projeto ambicioso que prevê a criação de cerca de 200 *microflorestas urbanas* espalhadas por diferentes bairros e espaços públicos,

com objetivos de reduzir o calor, aumentar a sombra e melhorar a qualidade do ar — por exemplo, o plantio da primeira microfloresta já começou no Balão do Laranja e outras localidades como Barão Geraldo e Ouro Verde foram definidas para receber intervenções similares.

Já no Recife (PE), uma microfloresta de cerca de 1.250 m² foi implantada no bairro da Várzea por meio do projeto *Plantar Juntos*, com mil mudas de espécies nativas da Mata Atlântica, representando a primeira microfloresta urbana da região Nordeste do país e integrando uma estratégia de sustentabilidade mais ampla. Outras grandes cidades como São Paulo (SP) e Belo Horizonte (MG) também receberam projetos de microflorestas nos últimos anos, com iniciativas que plantaram centenas de mudas nativas em áreas urbanas e buscam promover bem-estar ambiental e sociocultural.



Figura 2. Ilustração explicativa sobre o conceito de microflorestas urbanas e seu efeito na redução de temperatura nas cidades. **Fonte:** Adaptado de G1 (2025).

3. Por que microflorestas são importantes?

Mesmo pequenas, as microflorestas oferecem vários serviços ecossistêmicos, ou seja, benefícios que a natureza presta às pessoas.

3.1. Redução do calor nas cidades

As microflorestas ajudam a reduzir a temperatura porque:

- fazem sombra;
- liberam vapor de água pelas folhas (evapotranspiração);
- diminuem a quantidade de concreto exposto ao sol.

Estudos mostram que áreas verdes densas podem reduzir a temperatura local em alguns graus Celsius. *Exemplo prático:* uma microfloresta perto de uma escola pode deixar o ambiente mais fresco e agradável para alunos e professores.



Figura 3. Diagrama explicativo mostrando como as árvores contribuem para a redução da temperatura ambiente por meio do sombreamento, da evapotranspiração e da absorção de dióxido de carbono (CO₂), promovendo um microclima mais fresco em áreas urbanas. Fonte: Autoria própria (BORGES, Karina Goes).

3.2. Ajuda no controle de enchentes

Nas cidades, o solo costuma ser impermeável. A microfloresta ajuda porque:

- o solo absorve mais água;
- as raízes melhoram a infiltração;
- as folhas reduzem o impacto direto da chuva.

Isso diminui o risco de alagamentos e sobrecarga da drenagem urbana.

Exemplo prático: uma microfloresta implantada em um bairro pode reduzir poças e enxurradas após chuvas fortes.

3.2. Captura de carbono e combate às mudanças climáticas

As plantas retiram gás carbônico (CO₂) da atmosfera durante a fotossíntese e armazenam esse carbono na madeira, folhas e no solo.

Embora pequenas, as microflorestas crescem rápido e podem capturar carbono de forma eficiente por área, especialmente nos primeiros anos.

3.3. Aumento da biodiversidade

As microflorestas urbanas surgem como refúgios ecológicos capazes de abrigar uma diversidade considerável de espécies vegetais e animais, mesmo em paisagens altamente modificadas.

Ao utilizar espécies nativas adaptadas às condições locais, as microflorestas favorecem o estabelecimento de interações ecológicas, como polinização, dispersão de sementes e controle biológico de pragas. A estrutura vertical diversificada, composta por estratos arbóreo, arbustivo e herbáceo, cria microhabitats que podem ser utilizados por insetos, aves, pequenos mamíferos e microrganismos.

Microflorestas criam abrigo e alimento para:

- insetos polinizadores;
- aves;
- pequenos animais;
- microrganismos do solo.

Embora não substituam áreas naturais extensas, as microflorestas podem atuar como elementos de conectividade ecológica, funcionando como *stepping stones* entre fragmentos maiores de vegetação urbana e periurbana. Dessa forma, contribuem para a manutenção de fluxos genéticos e para o aumento da resiliência dos ecossistemas urbanos.



Figura 4. Diagrama mostrando a cadeia alimentar em uma microfloresta urbana, com plantas nativas na base, insetos no nível intermediário e aves no topo, evidenciando a transferência de energia e a interdependência entre os organismos. **Fonte:** Autoria própria (BORGES, Karina Goes).

3.4. Benefícios para as pessoas

Além do meio ambiente, as microflorestas beneficiam diretamente a população:

- reduzem estresse;
- melhoram a saúde mental;
- embelezam bairros;
- servem como espaços educativos.

Estudos mostram que áreas verdes estão associadas a melhor qualidade de vida.

3.5. Como uma microfloresta é implantada? O método Miyawaki

O método Miyawaki, criado pelo botânico japonês Akira Miyawaki, busca acelerar o crescimento de florestas nativas.



Figura 5. Passo a passo do método Miyawaki para restauração florestal. Fonte: Borges, Karina Goes (2026).

Ele funciona assim:

1. estuda-se a vegetação natural da região;
2. escolhem-se espécies nativas;

3. prepara-se bem o solo;
4. planta-se tudo bem junto;
5. cuida-se intensamente nos primeiros anos.

Outro princípio fundamental é a minimização da intervenção humana após os primeiros anos de implantação. Após um período inicial de manejo intensivo, que inclui irrigação, controle de plantas competidoras e reposição de mudas, a microfloresta passa a se desenvolver de forma mais autônoma, reduzindo custos de manutenção a médio e longo prazo.

3.6. Solo, espécies e manutenção

- O solo precisa ser solto e rico em matéria orgânica.
- As espécies devem ser variadas (árvores altas, médias e arbustos).
- Nos primeiros anos, é necessário regar e acompanhar o crescimento.

Exemplo prático: em uma escola, alunos podem ajudar no plantio e aprender sobre natureza na prática.

3.7. O que a ciência já comprovou?

Pesquisas no Japão, Europa e Brasil mostram que microflorestas:

- crescem rápido;
- reduzem a temperatura local;
- aumentam a biodiversidade;
- melhoram o bem-estar das pessoas.

A consolidação das microflorestas urbanas como estratégia de mitigação e adaptação às mudanças climáticas está diretamente relacionada à solidez das evidências científicas que sustentam seus benefícios ambientais, sociais e climáticos. Nas últimas décadas, observa-se um crescimento expressivo do número de estudos dedicados às florestas urbanas e à infraestrutura verde, incluindo análises específicas sobre microflorestas e *tiny forests*. No entanto, essa produção científica ainda apresenta elevada heterogeneidade

metodológica, além de lacunas importantes relacionadas à escala temporal, à padronização de indicadores e à replicabilidade dos resultados.

Diversos autores destacam que, embora os resultados iniciais sejam promissores, “a base empírica disponível ainda é insuficiente para generalizações amplas, especialmente em contextos socioambientais diversos”. Assim, a análise crítica das evidências existentes torna-se fundamental para compreender tanto o potencial quanto os limites das microflorestas urbanas.

4. Estudos de caso em diferentes contextos urbanos

Estudos de caso desempenham papel central na compreensão do funcionamento das microflorestas urbanas em condições reais de implantação. Em países asiáticos, como Japão, Índia e Singapura, projetos baseados no método Miyawaki têm sido amplamente documentados. Esses estudos relatam rápido fechamento do dossel, elevado crescimento inicial da biomassa e aumento da diversidade vegetal poucos anos após a implantação. Segundo Miyawaki (2004, p. 24), o objetivo do método é criar “florestas nativas autossustentáveis capazes de acelerar os processos naturais de sucessão ecológica”.

Na Europa, iniciativas de *tiny forests* implementadas em países como Holanda, Bélgica e Reino Unido têm sido avaliadas tanto sob a perspectiva ecológica quanto social. Resultados indicam reduções mensuráveis de temperatura em áreas adjacentes, além de benefícios associados ao bem-estar psicológico e ao fortalecimento do engajamento comunitário. Esses estudos destacam que a participação social no planejamento e na implantação é um fator-chave para o sucesso e a manutenção dos projetos.

Na América Latina, embora ainda incipientes, estudos e projetos-piloto vêm demonstrando o potencial das microflorestas como ferramentas de requalificação urbana e restauração ecológica. Experiências documentadas em cidades brasileiras indicam melhorias no microclima local, recuperação de solos degradados e oportunidades de educação ambiental. Contudo, a literatura regional ainda carece de avaliações quantitativas sistemáticas e de maior inserção em periódicos internacionais.

5. Evidências sobre regulação térmica, carbono e biodiversidade

Evidências empíricas indicam que microflorestas urbanas contribuem para a regulação térmica, sobretudo em contextos de elevada impermeabilização do solo. Medições de temperatura do ar e da superfície mostram que áreas com vegetação densa apresentam valores significativamente inferiores aos de áreas pavimentadas adjacentes, especialmente durante eventos de calor extremo. A magnitude dessas reduções varia em função do tamanho da microfloresta, da densidade do plantio e das condições climáticas locais.

No que se refere ao sequestro de carbono, estudos sugerem que microflorestas implantadas pelo método Miyawaki podem apresentar taxas elevadas de acúmulo de biomassa nos primeiros anos após a implantação, quando comparadas a projetos convencionais de reflorestamento urbano. Além da biomassa aérea, o aumento do carbono orgânico do solo, associado à deposição de serrapilheira e à atividade microbiana, constitui um componente relevante do estoque total de carbono desses sistemas (IPCC, 2022).

Quanto à biodiversidade, diversos estudos apontam aumento da riqueza e abundância de espécies vegetais e faunísticas em áreas ocupadas por microflorestas, em comparação com áreas verdes simplificadas, como gramados ornamentais (Aronson et al., 2017). A presença de múltiplos estratos vegetais cria uma variedade de microhabitats que favorecem insetos, aves e outros organismos. No entanto, a maioria dessas evidências ainda se baseia em indicadores de curto prazo, sendo necessárias análises mais abrangentes ao longo do tempo.

6. Desafios e cuidados

Microflorestas não são solução mágica. Alguns desafios são:

- custos iniciais;
- necessidade de cuidado nos primeiros anos;
- risco de implantação em locais inadequados;
- desigualdade no acesso às áreas verdes.

Apesar dos resultados promissores, a literatura sobre microflorestas urbanas apresenta limitações relevantes que devem ser consideradas de forma crítica. Muitos estudos carecem de delineamentos experimentais robustos, como a presença de áreas controle adequadas ou monitoramento antes e depois da implantação, dificultando a atribuição causal dos efeitos observados.

Outra limitação refere-se à curta duração das avaliações, frequentemente restritas aos primeiros anos após a implantação. Considerando que florestas são sistemas de longa duração, essa limitação temporal impede conclusões mais sólidas sobre estabilidade, resiliência e manutenção dos serviços ecossistêmicos ao longo do tempo. Além disso, há uma tendência de generalização dos resultados obtidos com o método Miyawaki, sem a devida consideração das variações climáticas, edáficas e socioeconômicas entre diferentes regiões.

Estudos críticos ressaltam a necessidade de avaliações comparativas entre distintos métodos de implantação, bem como de maior transparência na divulgação de resultados, incluindo falhas e desafios enfrentados nos projetos (Seddon et al., 2020). Dessa forma, embora as evidências disponíveis indiquem um potencial significativo das microflorestas urbanas, torna-se essencial avançar em pesquisas de longo prazo, com metodologias padronizadas e abordagens integradas que considerem simultaneamente aspectos ecológicos, sociais e econômicos.

Embora as microflorestas urbanas apresentem potencial significativo como soluções baseadas na natureza, sua adoção crescente exige uma análise crítica de seus desafios, limitações e controvérsias científicas. A compreensão desses aspectos é fundamental para evitar generalizações excessivas, alinhar expectativas e garantir que tais intervenções contribuam efetivamente para a sustentabilidade urbana.

As microflorestas urbanas enfrentam restrições ambientais, como solos degradados e condições climáticas extremas, que podem comprometer o estabelecimento das mudas. Além disso, apesar de eficientes em pequena escala, não substituem grandes áreas naturais, atuando apenas como complemento à infraestrutura verde.

A implantação envolve custos elevados e demanda manutenção contínua, contrariando a ideia de que seriam sistemas autossustentáveis desde o início. A alta densidade de plantio pode aumentar a mortalidade de mudas e reduzir a diversidade planejada. Também há desafios sociais: projetos tendem a se concentrar em áreas mais valorizadas, podendo reforçar desigualdades e até provocar gentrificação verde.

No campo científico, o método Miyawaki é criticado por generalizações excessivas, falta de evidências robustas sobre sua superioridade e aplicação inadequada em diferentes contextos ecológicos. Assim, o consenso atual é que o método deve ser visto como uma ferramenta complementar, e não como solução universal para restauração ecológica.

7. Microflorestas e políticas públicas

Quando incluídas em planos diretores, políticas ambientais e projetos participativos, as microflorestas ajudam a construir cidades mais justas, frescas e saudáveis. *Exemplo prático:* um município pode priorizar microflorestas em bairros mais quentes e com menos áreas verdes.

8. Considerações finais

Para que as microflorestas urbanas contribuam de forma significativa para as metas climáticas e ambientais das cidades, é necessário avançar no escalonamento dessas iniciativas. Isso implica não apenas aumentar o número de projetos, mas também garantir sua distribuição equitativa e sua adequação aos diferentes contextos urbanos, evitando desigualdades socioespaciais.

O monitoramento com indicadores ambientais, sociais e econômicos é essencial para orientar políticas públicas baseadas em evidências. As microflorestas urbanas mostram potencial para melhorar o microclima, ampliar a biodiversidade e contribuir para a sustentabilidade urbana, especialmente em áreas com déficit de verde.

Contudo, as evidências ainda são limitadas e exigem pesquisas de longo prazo e avaliação contínua. Essas iniciativas devem integrar sistemas mais

ampos de planejamento urbano e considerar critérios de justiça ambiental, participação social e equidade.

Assim, microflorestas são ferramentas promissoras, mas sua eficácia depende de planejamento, governança e abordagem crítica de longo prazo. Microflorestas urbanas mostram que pequenas áreas podem gerar grandes impactos. Quando bem planejadas, elas ajudam no combate às mudanças climáticas, melhoram a vida nas cidades e aproximam as pessoas da natureza.

Mais do que plantar árvores, criar microflorestas é investir em educação ambiental, saúde e futuro urbano sustentável.

9. Referências Bibliográficas

AHERN, J. From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, v. 100, n. 4, p. 341–343, 2011.

ANGUELOVSKI, I. et al. Expanding the boundaries of justice in urban greening scholarship: Toward an emancipatory, antisubordination, intersectional, and relational approach. *Annals of the American Association of Geographers*, v. 110, n. 6, p. 1743–1769, 2020.

ANGUELOVSKI, I. et al. From landscapes of utopia to the margins of the green urban life. *City*, v. 20, n. 3, p. 417–436, 2016.

ARONSON, M. F. J. et al. Biodiversity in the city: Key challenges for urban green space management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 15, n. 4, p. 189–196, 2017.

BENEDICT, M. A.; MCMAHON, E. T. *Green infrastructure: Linking landscapes and communities*. Washington, DC: Island Press, 2012.

BOWLER, D. E. et al. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, v. 97, n. 3, p. 147–155, 2010.

CENÁRIO ENERGIA. Heineken® inaugura microfloresta no Recife e reforça compromisso com cidades sustentáveis. *Cenário Energia*, 07 jul. 2025. Disponível em: <https://cenarioenergia.com.br/2025/07/07/heineken-inaugura-microfloresta-no-recife-e-reforca-compromisso-com-cidades-sustentaveis/>. Acesso em: 13 dez. 2025.

DAVIES, H. J. et al. The value of small urban green spaces for people and biodiversity. *Cities*, v. 108, p. 102989, 2021.

ELMQVIST, T. et al. Benefits of restoring ecosystem services in urban areas. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 14, p. 101–108, 2015.

FERREIRA, A. P. et al. Infraestrutura verde e adaptação climática em cidades brasileiras. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 12, e20200032, 2020.

FORMAN, R. T. T. *Land mosaics: The ecology of landscapes and regions*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

FOODBIZ BRASIL. Heineken entrega primeira microfloresta no Nordeste. *FoodBiz Brasil*, 08 jul. 2025. Disponível em: <https://foodbizbrasil.com/sustentabilidade/heineken-microfloresta-recife-sustentabilidade/>. Acesso em: 27 nov. 2025.

IPCC. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva: IPCC, 2023.

IUCN. *Global standard for nature-based solutions*. Gland: IUCN, 2020.

KABISCH, N. et al. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, v. 165, p. 79–89, 2017.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, v. 304, n. 5677, p. 1623–1627, 2004.

MIYAWAKI, A. *Restoration of living environment based on vegetation ecology*. Tokyo: Chiba Ecological Engineering, 2004.

MIYAWAKI, A.; GOLLEY, F. B. *Forest reconstruction as ecological engineering*. Tokyo: Chiba Ecological Engineering, 1993.

NORTON, B. A. et al. Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures. *Landscape and Urban Planning*, v. 134, p. 127–138, 2015.

NOWAK, D. J.; GREENFIELD, E. J. Tree and impervious cover change in U.S. cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 11, n. 1, p. 21–30, 2012.

NOWAK, D. J. et al. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, v. 193, p. 119–129, 2014.

OSTROM, E. Polycentric systems for coping with collective action and global environmental change. *Global Environmental Change*, v. 20, n. 4, p. 550–557, 2010.

PAULEIT, S.; DUHME, F. Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning. *Landscape and Urban Planning*, v. 52, n. 1, p. 1–20, 2000.

PREFEITURA DE CAMPINAS. Prefeitura anuncia criação de microflorestas para reduzir calor em áreas mais quentes de Campinas. *CBN Campinas 99,1 FM*, 27 mar. 2025. Disponível em: <https://portalcbnbcampinas.com.br/2025/03/prefeitura-anuncia-criacao-de-microflorestas-para-reduzir-calor-em-areas-mais-quentes-de-campinas/>. Acesso em: 03 jan. 2026.

SEDDON, N. et al. Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 375, n. 1794, 2019.

SHARMA, G.; KUMAR, A. Miyawaki method of plantation: A review. *International Journal of Environmental Sciences*, v. 12, n. 2, p. 87–96, 2021.

SHARMA, G.; SARKAR, S. Carbon sequestration potential of Miyawaki forests. *Journal of Environmental Management*, v. 250, 109424, 2019.

SILVA, R. M. et al. Microflorestas urbanas como estratégia de restauração ecológica no Brasil. *Revista Árvore*, v. 46, e4604, 2022.

SUGANUMA, M. S.; DURIGAN, G. Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems. *Restoration Ecology*, v. 23, n. 3, p. 238–251, 2015.

TIDBALL, K. G.; KRASNY, M. E. *Greening in the red zone*. Dordrecht: Springer, 2014.

UN-HABITAT. *World cities report 2020: The value of sustainable urbanization*. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2020.

VAN DEN BOSCH, M.; SANG, Å. Urban natural environments as nature-based solutions for improved public health. *Environmental Research*, v. 158, p. 373–384, 2017.

WHO. *Urban green spaces and health*. Copenhagen: World Health Organization, 2017.

Autores

Karina Goes Dos Santos Borges

Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Maringá.

CAPÍTULO 9

Plantas que cuidam da saúde: o poder oculto do *Lupinus mutabilis* (Tarwi)

Laura Bernardita Mallqui Vega

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c9>

Resumo

Lupinus mutabilis Sweet, conhecido como tarwi ou chocho, é uma leguminosa andina de elevada importância histórica, cultural e nutricional, cujo interesse tem sido renovado no contexto da alimentação funcional e da saúde metabólica. Tradicionalmente cultivado nas regiões alto-andinas do Peru, Bolívia e Equador, o tarwi destaca-se por sua adaptação a ambientes adversos, elevado teor proteico, perfil lipídico favorável e contribuição para a sustentabilidade agrícola. Do ponto de vista nutricional, apresenta altos teores de proteínas, fibras e ácidos graxos insaturados, além de compostos bioativos, como a γ -conglutina, associados a efeitos benéficos no metabolismo da glicose. Evidências experimentais e clínicas indicam que o consumo do tarwi pode melhorar o controle glicêmico, a sensibilidade à insulina e reduzir fatores de risco cardiometabólicos, especialmente em indivíduos com diabetes mellitus tipo 2 moderadamente controlado. Este capítulo aborda a trajetória histórica e cultural do tarwi, seu valor nutricional, os processos tradicionais de desamargamento e seu potencial funcional, destacando os mecanismos envolvidos na modulação do metabolismo energético.

Palavras-chave: *Lupinus mutabilis*; Tarwi; Diabetes mellitus tipo 2; Alimentos funcionais; Metabolismo da glicose.

Abstract

Lupinus mutabilis Sweet, known as tarwi or chocho, is an Andean legume of significant historical, cultural, and nutritional importance whose relevance has been renewed in the context of functional nutrition and metabolic health. Traditionally cultivated in the high-Andean regions of Peru, Bolivia, and Ecuador, tarwi is characterized by its remarkable adaptation to adverse environments, high protein content, favorable lipid profile, and contribution to agricultural sustainability. Nutritionally, tarwi contains high levels of proteins, dietary fiber, and unsaturated fatty acids, as well as bioactive compounds such as γ -conglutin, which have been associated with beneficial effects on glucose metabolism. Experimental and clinical evidence suggests that tarwi consumption may improve glycemic control, enhance insulin sensitivity, and reduce cardiometabolic risk factors, particularly in individuals with moderately controlled type 2 diabetes mellitus. This chapter discusses the historical and cultural background of tarwi, its nutritional value, traditional debittering processes, and its functional potential, with emphasis on the mechanisms involved in the modulation of energy metabolism.

Keywords: *Lupinus mutabilis*; Tarwi; Type 2 diabetes mellitus; Functional foods; Glucose metabolism.

1. Introdução

Lupinus mutabilis Sweet, popularmente conhecido como tarwi ou chocho, é uma leguminosa nativa da região andina que vem sendo progressivamente redescoberta pela ciência em virtude de seu elevado valor nutricional e de seus potenciais benefícios à saúde humana, especialmente no contexto do diabetes mellitus tipo 2. Cultivado há séculos nas regiões alto-andinas do Peru, Bolívia e Equador, o tarwi integrou a base alimentar de diversas culturas indígenas, sendo valorizado por sua notável adaptação a solos pobres, climas frios e condições ambientais adversas, além de seu alto teor proteico.

Nas últimas décadas, o aumento global da prevalência de doenças metabólicas, como obesidade e diabetes tipo 2, tem impulsionado a busca por alimentos funcionais capazes de contribuir para a prevenção e o manejo dessas condições. Nesse cenário, leguminosas com elevado teor de proteínas, fibras e compostos bioativos despertam crescente interesse científico e tecnológico. O tarwi destaca-se nesse contexto não apenas por sua composição nutricional diferenciada, mas também pela presença de proteínas específicas, como a γ -conglutina, e outros metabólitos bioativos associados a efeitos hipoglicemiantes, melhoria da sensibilidade à insulina e modulação do metabolismo energético.



Além de seus potenciais efeitos metabólicos, o *Lupinus mutabilis* apresenta relevância estratégica do ponto de vista agrônomo e socioambiental. Como leguminosa fixadora de nitrogênio, contribui para a fertilidade do solo e para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas andinos, sendo particularmente adaptado à agricultura de montanha e a contextos de vulnerabilidade climática. Dessa forma, o resgate e a valorização do tarwi alinham-se às atuais discussões

sobre soberania alimentar, conservação da agrobiodiversidade e desenvolvimento de sistemas alimentares sustentáveis.

Assim, este capítulo tem como objetivo apresentar uma abordagem integrada sobre o *Lupinus mutabilis* Sweet, contemplando sua trajetória histórica e cultural, valor nutricional, formas tradicionais de processamento e consumo, bem como seu potencial funcional no contexto da saúde metabólica, com ênfase nos mecanismos envolvidos na modulação do metabolismo da glicose e da ação da insulina.

2. História, domesticação e significado cultural

Evidências arqueobotânicas, históricas e genéticas indicam que o tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) possui uma longa trajetória de domesticação na região andina, particularmente no atual território peruano. Estudos moleculares sugerem que a espécie foi domesticada a partir de seu parente silvestre *Lupinus piurensis*, em um processo ocorrido há aproximadamente 2.600 anos, concentrado principalmente no norte dos Andes peruanos, em áreas como Cajamarca e regiões adjacentes. Achados arqueológicos no Vale do Mantaro, datados de cerca de 1.800 anos antes do presente, confirmam que o cultivo do tarwi já integrava os sistemas agrícolas de sociedades pré-incas, inserido em complexos agroecossistemas andinos caracterizados pela diversificação produtiva e pelo manejo sustentável dos recursos naturais.

Durante o período pré-hispânico, o tarwi desempenhou papel relevante como uma das poucas leguminosas de alto teor proteico adaptadas a altitudes superiores a 3.000 metros acima do nível do mar. Civilizações como Nazca, Wari e, posteriormente, o Estado Inca incorporaram o tarwi a sistemas agrícolas baseados em terraços, rotação de culturas e práticas comunitárias de manejo da terra. Seu uso envolvia tanto o consumo alimentar após processos tradicionais de desamargamento destinados à remoção de alcaloides quanto funções cerimoniais e simbólicas associadas à fertilidade da terra, à força física e ao bem-estar coletivo. Em diversas comunidades, o tarwi era considerado um alimento “forte”, associado à resistência ao frio e à capacidade de sustento em ambientes de alta altitude.

Com a chegada dos colonizadores europeus no século XVI, os sistemas agrícolas andinos sofreram profundas transformações decorrentes da introdução de cultivos exógenos, como trigo, cevada e leguminosas mediterrâneas. Esse processo levou à redução da importância econômica do tarwi em muitas regiões, restringindo seu cultivo ao âmbito doméstico ou comunitário. Apesar disso, populações alto-andinas mantiveram o cultivo e o consumo do tarwi, preservando conhecimentos tradicionais e práticas ancestrais que permitiram a continuidade da espécie como marcador de identidade cultural e como recurso alimentar resiliente em contextos ambientais adversos.

A persistência do tarwi ao longo dos séculos está intimamente relacionada às suas características agronômicas singulares. Como leguminosa fixadora de nitrogênio, contribui significativamente para a fertilidade do solo e para a produtividade de culturas subsequentes, como batata, quinoa e milho. Além disso, sua elevada tolerância a solos pobres, períodos de seca e variações térmicas extremas tornou seu cultivo particularmente valioso em regiões onde outras espécies agrícolas apresentam baixo rendimento. Do ponto de vista nutricional, o tarwi destaca-se por apresentar teores de proteína entre 41% e 52% e de óleo entre 14% e 24%, com perfil comparável ao da soja, reforçando sua relevância histórica como fonte vegetal de alta qualidade nutricional.

Nas últimas décadas, iniciativas voltadas à valorização de cultivos nativos, à promoção da soberania alimentar e à conservação da biodiversidade agrícola têm impulsionado o resgate do tarwi como espécie estratégica. Programas comunitários, pesquisas acadêmicas e políticas públicas de incentivo ao uso da biodiversidade local têm reposicionado o *Lupinus mutabilis* como símbolo de patrimônio biocultural andino, segurança alimentar e agricultura sustentável. Nesse contexto, o tarwi é reconhecido não apenas por seu valor nutricional e funcional, mas também por seu potencial de contribuir para sistemas agrícolas resilientes frente às mudanças climáticas e à degradação dos solos.

3. Valor nutricional do tarwi

O tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) apresenta um perfil nutricional notavelmente elevado quando comparado a outras leguminosas cultivadas, destacando-se principalmente pelo seu alto teor proteico, conteúdo lipídico

significativo e presença de fibras dietéticas e compostos bioativos. Revisões recentes indicam que os grãos de tarwi contêm entre 41% e 53% de proteína em base seca, além de aproximadamente 14% a 24% de lipídios e teores de fibra dietética superiores a 10%. Esses valores são comparáveis, e em alguns casos superiores, aos observados na soja, posicionando o tarwi como uma importante fonte vegetal de proteína de alta densidade nutricional.

Estudos conduzidos por Carvajal et al. (2016) reportaram teores proteicos variando entre 32,0 e 52,6 g/100 g de matéria seca, e conteúdos lipídicos entre 13,0 e 24,6 g/100 g, evidenciando a variabilidade composicional relacionada a fatores genéticos, ambientais e agronômicos. Essa riqueza nutricional confere ao tarwi grande potencial para aplicações em dietas vegetarianas, na suplementação proteica e na diversificação alimentar, especialmente em regiões com limitações de acesso a fontes proteicas de origem animal.

Tabela 1. Conteúdo de aminoácidos do tarwi e da soja (Flores,2017).

Aminoácido	Tarwi (<i>Lupinus mutabilis</i>)	Soja
Isoleucina	4,3	4,5
Leucina	7,4	7,8
Lisina	5,3	6,4
Metionina	0,4	1,3
Fenilalanina	3,4	4,9
Treonina	3,5	3,9
Valina	3,5	4,8
Histidina	2,2	2,5
Tirosina	3,5	3,1
Triptófano	1,8	1,0
Expresado en g/16g de N		

3.1. Qualidade proteica e perfil lipídico

No que se refere à qualidade da proteína, o tarwi apresenta um perfil de aminoácidos essencial relativamente equilibrado, embora alguns aminoácidos sulfurados, como metionina e cisteína, possam estar presentes em proporções limitantes. Apesar dessa restrição, estudos clássicos e contemporâneos indicam

que a digestibilidade proteica do tarwi é satisfatória, sobretudo quando associado a outras fontes alimentares em misturas proteicas, o que amplia seu valor nutricional em dietas de base vegetal.

O óleo extraído do tarwi caracteriza-se por elevada proporção de ácidos graxos insaturados, com predominância de ácidos oleico (ω -9) e linoleico (ω -6), além da presença de ácidos graxos ω -3 em menores quantidades. Esse perfil lipídico é considerado favorável à saúde cardiovascular, estando associado à modulação do perfil lipídico plasmático e à redução do risco de doenças cardiometabólicas (Carvajal et al., 2016). Assim, além de seu valor energético, o conteúdo lipídico do tarwi contribui para seu potencial funcional.

4. Fatores antinutricionais e processamento

Apesar de seu elevado valor nutricional, o tarwi contém alcaloides quinolizidínicos, compostos responsáveis pelo sabor amargo característico dos grãos e por potenciais efeitos tóxicos quando consumidos sem tratamento adequado. Por esse motivo, as populações andinas desenvolveram, ao longo de gerações, métodos tradicionais de desamargamento baseados na cocção e na imersão prolongada em água, com trocas frequentes, visando à redução desses alcaloides a níveis seguros para o consumo humano.

Estudos científicos demonstram que técnicas de processamento, como desamargamento controlado, extrusão e secagem por spray, não apenas reduzem significativamente o conteúdo de fatores antinutricionais, mas também melhoram a digestibilidade proteica e a biodisponibilidade de nutrientes. Dessa forma, o processamento adequado constitui etapa essencial para a incorporação segura e eficiente do tarwi na alimentação humana e no desenvolvimento de produtos alimentícios funcionais em escala industrial.

5. Potencial antidiabético do tarwi

5.1. Evidências científicas

Nas últimas décadas, um número crescente de estudos experimentais e clínicos tem demonstrado que o tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) e seus

compostos bioativos apresentam efeitos promissores no controle da glicemia e na modulação da sensibilidade à insulina. Entre esses compostos, destaca-se a proteína γ -conglutina, amplamente estudada por sua atividade hipoglicemiante. Um estudo experimental conduzido por Zambrana et al. (2018) demonstrou que o extrato de *Lupinus mutabilis* exerce efeito antidiabético significativo em ratos Goto-Kakizaki, um modelo experimental de diabetes mellitus tipo 2. Nesse trabalho, o tratamento, tanto de curto quanto de longo prazo, melhorou a tolerância à glicose, reduziu os níveis de glicemia e de hemoglobina glicada (HbA1c), além de aumentar a concentração plasmática de insulina. Observou-se ainda um estímulo intenso da secreção de insulina em ilhotas pancreáticas, tanto em condições *in vivo* quanto *in vitro*. Análises mecanísticas indicaram a participação de canais de cálcio tipo L, proteínas quinase A e C, G-proteínas e, parcialmente, canais KATP_{ATP}ATP, sugerindo que o principal mecanismo de ação do tarwi envolve a estimulação direta da liberação de insulina pelas células β pancreáticas.

Em humanos, Fornasini et al. (2019) avaliaram, ao longo de 28 semanas, o impacto do consumo diário de *Lupinus mutabilis* em pacientes com diabetes mellitus tipo 2. Após um período inicial sem ingestão da leguminosa, seguido por 14 semanas de consumo progressivo, observou-se redução significativa da pressão arterial sistêmica e aumento dos níveis de colesterol HDL. Adicionalmente, pacientes com valores iniciais de HbA1c $\leq 8\%$ apresentaram melhora expressiva do controle metabólico, com aproximadamente 71% atingindo a meta terapêutica de HbA1c $\leq 6,5\%$. Em contraste, indivíduos com HbA1c $> 8\%$ não apresentaram resposta clínica significativa, indicando que o tarwi pode atuar de forma mais eficaz como complemento terapêutico em casos de diabetes moderadamente controlado.

Resultados consistentes também foram observados em estudos com a proteína γ -conglutina isolada. González et al. (2011) demonstraram que a administração oral dessa proteína em ratas hiperglicêmicas reduziu significativamente os níveis de glicose em jejum e de insulina plasmática, além de melhorar o índice de resistência à insulina (HOMA-IR) em aproximadamente 34% e 48%, respectivamente. Estudos *in vitro* subsequentes revelaram que frações hidrolisadas de γ -conglutina de *L. mutabilis* inibem a atividade da enzima dipeptidil peptidase IV (DPP-IV), responsável pela degradação de incretinas,

além de aumentar a captação de glicose em modelos celulares de adipócitos e enterócitos em até 6,5 vezes e reduzir a expressão da fosfoenolpiruvato carboxiquinase (PEPCK), enzima-chave da gliconeogênese hepática, em aproximadamente 50%.

Em ensaios clínicos adicionais, o consumo diário de snacks à base de *Lupinus mutabilis* por 14 semanas resultou em redução significativa da HbA1c e aumento do HDL-colesterol em adultos com diabetes tipo 2 com HbA1c $\leq 8\%$, reforçando o potencial do tarwi como alimento funcional adjuvante no controle glicêmico.

5.2. Mecanismos bioquímicos envolvidos na ação metabólica do *Lupinus mutabilis*

As doenças metabólicas, como o diabetes mellitus tipo 2 (DM2), a obesidade e a doença hepática gordurosa não alcoólica (NAFLD), compartilham mecanismos fisiopatológicos comuns, entre eles a resistência à insulina, alterações no metabolismo da glicose hepática, estresse oxidativo e inflamação crônica de baixo grau. Evidências científicas indicam que o *Lupinus mutabilis* pode atuar de forma benéfica sobre esses processos, contribuindo para a melhora do controle metabólico.

5.2.1 Sensibilidade à insulina e metabolismo da glicose

A resistência à insulina é um dos principais fatores envolvidos no desenvolvimento do DM2 e da obesidade. Nessa condição, os tecidos periféricos, como músculo e tecido adiposo, apresentam menor capacidade de responder à ação da insulina, dificultando a entrada da glicose nas células e resultando em hiperglicemia persistente.

Estudos experimentais indicam que compostos bioativos presentes no *Lupinus mutabilis*, especialmente a proteína γ -conglutina e seus peptídeos derivados, podem aumentar a sensibilidade à insulina. Esses compostos estimulam a captação de glicose pelas células e favorecem a utilização da glicose como fonte de energia, contribuindo para a redução dos níveis

glicêmicos. Esse efeito é particularmente relevante em estágios iniciais do DM2 ou em indivíduos com controle glicêmico moderado.

5.2.2. Metabolismo da glicose hepática

O fígado desempenha papel central no controle da glicemia, sendo responsável pela produção endógena de glicose por meio da gliconeogênese. Em indivíduos com resistência à insulina, esse processo encontra-se exacerbado, contribuindo para o aumento da glicose em jejum.

Evidências *in vitro* e *in vivo* sugerem que o consumo de *Lupinus mutabilis* pode reduzir a produção hepática de glicose, por meio da inibição de enzimas-chave da gliconeogênese, como a fosfoenolpiruvato carboxiquinase (PEPCK). Dessa forma, o tarwi contribui para o restabelecimento do equilíbrio glicêmico, atuando diretamente em um dos principais mecanismos fisiopatológicos do DM2 e da NAFLD.

5.2.3. Estresse oxidativo

O estresse oxidativo caracteriza-se pelo desequilíbrio entre a produção de espécies reativas de oxigênio e os sistemas antioxidantes do organismo. Esse processo está intimamente associado à progressão do DM2, da obesidade e da NAFLD, favorecendo danos celulares, disfunção mitocondrial e inflamação tecidual.

O *Lupinus mutabilis* apresenta compostos com atividade antioxidante, incluindo peptídeos bioativos e compostos fenólicos, capazes de neutralizar espécies reativas e reduzir o dano oxidativo. A diminuição do estresse oxidativo contribui para a preservação da função das células β pancreáticas, melhora da ação da insulina e proteção do tecido hepático.

5.2.4. Inflamação crônica de baixo grau e relação com obesidade e NAFLD

A obesidade está associada a um estado inflamatório crônico de baixo grau, caracterizado pela liberação contínua de citocinas inflamatórias que

interferem na sinalização da insulina e favorecem o acúmulo de lipídios no fígado. Esse processo desempenha papel fundamental no desenvolvimento da resistência à insulina e da NAFLD.

Estudos indicam que o consumo de alimentos funcionais ricos em proteínas vegetais e compostos bioativos, como o tarwi, pode modular a resposta inflamatória, reduzindo a ativação de vias inflamatórias e melhorando o metabolismo lipídico e glicídico. Dessa forma, o *Lupinus mutabilis* apresenta potencial não apenas no controle glicêmico, mas também na prevenção de complicações metabólicas associadas à obesidade e à NAFLD.

Em conjunto, esses mecanismos sugerem que o *Lupinus mutabilis* atua de maneira multifatorial, influenciando positivamente a sensibilidade à insulina, o metabolismo da glicose hepática, o equilíbrio oxidativo e a resposta inflamatória, configurando-se como um alimento funcional promissor no manejo inicial das doenças metabólicas.

6. Uso tradicional nas culturas andinas

Após a remoção adequada do amargor, o tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet) passa a ser amplamente utilizado na alimentação tradicional das populações andinas, integrando uma diversidade de preparações culinárias que refletem o conhecimento empírico acumulado ao longo de gerações. O processo de desamargamento, essencial para tornar o grão apto ao consumo humano, não apenas reduz os teores de alcaloides quinolizidínicos, como também confere ao tarwi sabor suave e textura agradável, favorecendo sua incorporação em diferentes pratos típicos.

Em diversas regiões dos Andes, o tarwi é consumido na forma de tarwi grãos totalmente desamargados e prontos para o consumo direto sendo frequentemente comercializado em feiras locais e eventos comunitários. Tradicionalmente, o tarwi é consumido puro ou acompanhado de outros alimentos típicos, como favas tostadas, milho cozido (mote), humitas ou pequenos peixes andinos (ispi). Seu consumo é associado à ideia de alimento energético e fortalecedor, sendo apreciado em diferentes momentos do dia, especialmente entre o final da manhã e a metade da tarde.

Além do consumo direto, o tarwi integra preparações culinárias mais elaboradas. Entre elas, destaca-se o purê de tarwi, no qual os grãos desamargados e sem casca são triturados e cozidos com um refogado de cebola, alho, tomate e pimentas locais, frequentemente enriquecido com carne seca previamente hidratada e acompanhado de batatas, tunta ou outros tubérculos andinos. Essa preparação é típica das regiões do altiplano e constitui importante fonte de energia e proteínas na dieta tradicional.

Outro uso culinário frequente é a preparação de torrijas de tarwi, elaboradas a partir da mistura de farinha de tarwi e farinha de trigo em proporções semelhantes, à qual se adicionam ovos, cebola e hortaliças locais, como folhas de quinoa e cenoura. A massa é frita até atingir coloração dourada e geralmente servida com batatas cozidas, tunta ou chuño, compondo refeições de elevado valor energético e nutricional.

O tarwi também é amplamente utilizado na forma de saladas, preparação que preserva grande parte de seu valor nutricional. A salada de tarwi é elaborada a partir de grãos previamente cozidos e desamargados, misturados com cebola, tomate, ervas aromáticas e temperados com sal, pimenta e suco de limão. Esse prato é consumido como acompanhamento ou como refeição leve, sendo valorizado por seu alto teor proteico e por sua contribuição para a diversidade alimentar nas comunidades andinas.



No contexto da transformação agroindustrial, o tarwi é processado na forma de farinha, frequentemente utilizada em misturas com farinha de trigo para a produção de pães e outros produtos panificados. A incorporação de aproximadamente 15% de farinha de tarwi melhora significativamente o

conteúdo proteico e lipídico dos produtos finais, além de contribuir para maior volume, maciez e vida útil do pão, em razão das propriedades emulsificantes naturais de seus componentes, como a lecitina (Mujica, 2006).

As práticas de desamargamento, preparo e consumo do tarwi variam entre as diferentes comunidades indígenas dos Andes, refletindo adaptações culturais e ambientais específicas. Esses conhecimentos tradicionais, transmitidos oralmente de geração em geração, constituem parte fundamental do patrimônio cultural andino e desempenham papel essencial na conservação e valorização do *Lupinus mutabilis* como recurso alimentar, cultural e econômico (Pulgar Vidal, 1978).

7. Conclusão

O *Lupinus mutabilis* Sweet, conhecido como tarwi, constitui um exemplo emblemático de como o conhecimento tradicional e a ciência contemporânea podem convergir para a valorização de alimentos ancestrais com elevado potencial nutricional, funcional e socioambiental. Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que o tarwi desempenhou papel central na alimentação e na cultura das populações andinas, mantendo-se relevante ao longo dos séculos graças à sua adaptabilidade agrônômica, valor nutricional e significado cultural.

Do ponto de vista nutricional, o tarwi destaca-se pelo elevado teor de proteínas de alta qualidade, perfil lipídico favorável e presença de compostos bioativos, como a γ -conglutina, os quais estão associados à melhora do controle glicêmico, ao aumento da sensibilidade à insulina e à redução de fatores de risco cardiometabólicos. Evidências provenientes de estudos experimentais, *in vitro* e clínicos indicam que o consumo regular do tarwi, quando adequadamente processado para a remoção de alcaloides quinolizidínicos, pode atuar como alimento funcional adjuvante no manejo do diabetes mellitus tipo 2, sem substituir, contudo, o tratamento farmacológico convencional.

Além de seus benefícios à saúde humana, o *Lupinus mutabilis* apresenta relevância estratégica do ponto de vista agrônômico e ambiental. Como leguminosa fixadora de nitrogênio, contribui para a fertilidade do solo, a diversificação dos sistemas produtivos e a preservação da agrobiodiversidade

andina, assumindo papel importante no contexto da agricultura sustentável e da adaptação às mudanças climáticas.

Dessa forma, o resgate e a valorização do tarwi transcendem sua função alimentar, reafirmando sua importância como patrimônio biocultural dos Andes e como recurso promissor para o desenvolvimento de estratégias alimentares saudáveis, sustentáveis e culturalmente contextualizadas. O fortalecimento da pesquisa científica, aliado à preservação dos saberes tradicionais, é fundamental para ampliar o uso seguro e responsável do tarwi, contribuindo para a promoção da saúde metabólica e para a soberania alimentar no século XXI.

8. Referências

ATCHISON, G. W.; NEVADO, B.; EASTWOOD, R. J.; CONTRERAS-ORTIZ, N.; REYNEL, C.; MADRIÑÁN, S.; HUGHES, C. E. Lost crops of the Incas: origins of domestication and diversity of Andean lupin (*Lupinus mutabilis* Sweet). **Molecular Ecology**, v. 25, n. 9, p. 2164–2179, 2016. DOI: 10.1111/mec.13573.

BALDEÓN, M. E.; FORNASINI, M. V.; ABRIL-ULLOA, S. V.; BELTRÁN-CARREÑO, J. P.; VILLACRÉS, E.; CUADRADO-MERINO, L. F.; RICAURTE ORTIZ, P. S.; MUÑOZ, E. Efficacy of a *Lupinus mutabilis* Sweet snack as complement to conventional type 2 diabetes mellitus treatment. **Nutrition & Metabolism**, 2019.

CARVAJAL-LARENAS, F. E.; LINNEMANN, A. R.; NOUT, M. J. R.; KOZIOL, M.; VAN BOEKEL, M. A. J. S. *Lupinus mutabilis*: composition, uses, toxicology, and debittering. **European Food Research and Technology**, v. 242, n. 10, p. 1797–1809, 2016. DOI: 10.1007/s00217-016-2696-1.

CÓRDOVA-RAMOS, J. S. et al. Andean lupin (*Lupinus mutabilis* Sweet): processing effects on chemical composition, heat damage, and in vitro protein digestibility. **Cereal Chemistry**, 2020.

DEBOUCK, D. G. Archaeological and genetic evidence for Andean crop domestication. **Plant Genetic Resources**, v. 18, n. 2, p. 112–130, 2020.

ESPEJO FLORES, Lizzette Yesenia. **Desarrollo del proceso común de desamargado de *Lupinus mutabilis* (tarwi) en condiciones controladas físicas y químicas**. 2017. Monografía (Licenciatura em Ciências Químicas) – Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, 2017.

FAO. **Andean grains and legumes: ancient crops for modern food systems**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.

FLORES, O.; GONZALES, E. Cultivos andinos y simbolismo alimentario en comunidades serranas del Perú. **Revista Andina**, n. 56, p. 89–112, 2018.

FORNASINI, M. V.; ABRIL-ULLOA, S. V.; BELTRÁN-CARREÑO, J. P.; VILLACRÉS, E.; CUADRADO-MERINO, L. F.; RICAURTE ORTIZ, P. S.; MUÑOZ, E.; BENÍTEZ LOZA, N. B.; BALDEÓN, M. E. Efficacy of a *Lupinus mutabilis* Sweet snack as complement to conventional type 2 diabetes mellitus treatment. **Nutrición Hospitalaria**, v. 36, n. 4, p. 905–911, 2019. DOI: 10.20960/nh.02590.

GONZÁLEZ-DE MEJÍA, E.; WANG, W.; DIA, V. P. Lupin seed γ -conglutina lowers blood glucose in hyperglycaemic rats and increases glucose consumption of HepG2 cells. **British Journal of Nutrition**, v. 105, n. 3, p. 412–420, 2011. DOI: 10.1017/S0007114510003657.

JACOBSEN, S.-E.; MUJICA, A. El tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet.) y sus parientes silvestres. In: MORAES, R. M. et al. (eds.). **Botánica Económica de los Andes Centrales**. La Paz: Universidad Mayor de San Andrés, 2006. p. 458–482.

LEISA. Tarwi: leguminosa andina de gran potencial para la sostenibilidad agrícola. **Revista LEISA – Agricultura Ecológica**, v. 31, n. 2, p. 12–17, 2015.

MENESES QUELAL, O. et al. Nutritional, functional and microbiological potential of Andean *Lupinus mutabilis* and *Amaranthus* spp. **Foods**, v. 14, n. 12, p. 2059, 2025.

MUÑOZ, E. B.; LUNA-VITAL, D. A.; FORNASINI, M.; BALDEÓN, M. E.; GONZÁLEZ-DE MEJÍA, E. Gamma-conglutin peptides from Andean lupin legume (*Lupinus mutabilis* Sweet) enhanced glucose uptake and reduced gluconeogenesis in vitro. **Journal of Functional Foods**, v. 45, p. 339–347, 2018. DOI: 10.1016/j.jff.2018.04.024.

TAPIA, M. **Cultivos andinos subutilizados y su contribución a la seguridad alimentaria**. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2017.

ZAMBRANA, S.; LUNDQVIST, L. C. E.; MAMANI, O.; CATRINA, S. B.; GONZALES, E.; ÖSTENSON, C. G. *Lupinus mutabilis* extract exerts an anti-diabetic effect by improving insulin release in type 2 diabetic Goto-Kakizaki rats. **Nutrients**, v. 10, n. 7, p. 933, 2018. DOI: 10.3390/nu10070933.

Autores

Laura Bernardita Mallqui Vega

Programa de Pós-graduação em Bioquímica, Universidade Estadual de Maringá
- UEM

CAPÍTULO 10

Metabolômica: uso na agricultura para estudo de doenças em plantas

Lucas Haruo Nakayama Pereira

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c10>

Resumo

Neste capítulo será apresentado a metabolômica, uma ferramenta relativamente que é o estudo de moléculas produzidas pelos organismos, chamados metabólitos e seu importante e crescente uso na agricultura, com foco na pesquisa, combate e identificação de doenças em plantas causadas por pragas, os fitopatógenos. O estudo na interação entre a planta e o patógeno ainda é recente e de muita importância comercial, ambiental e na saúde do ambiente e dos organismos ao redor. O capítulo aborda alguns estudos de casos de cultivos de milho, soja, tomate, arroz e trigo, algumas das espécies mais plantadas no Brasil e no mundo, notando os metabólitos encontrados e sua ação na defesa da planta, parte dos chamados metabólitos secundários, e o que pode ser feito munido a esta informação.

Palavras chaves: metabolômica, plantas, fitopatógenos, metabólitos secundários, agricultura

Abstract

Metabolomics is a powerful tool for analyzing metabolites, molecules produced by organisms. This chapter will go over its importance and increase usage in research, control and identification of diseases caused by pests (phytopathogens) in agriculture. The research of the plant-pathogen interaction is still somewhat recent, but of great commercial, environmental and health importance. This chapter will also go over some case studies of plant diseases infecting maize, soybeans, tomato, rice and wheat, some of the most cultivated crops in the world, noting the most important metabolites found and their role in plant defense as secondary metabolites, and what can be done for future research using this information.

Keywords: metabolomics, plants, phytopathogens, secondary metabolites, agriculture

1. Introdução: agricultura e seus obstáculos

1.1. Agricultura

A agricultura é um dos principais pilares da economia brasileira, sozinha participando de 23,2% do PIB nacional em 2024, segundo a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) e o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea).¹ O Brasil, bem como o resto do mundo, depende cada vez mais destes bens a cada ano com o aumento populacional, demandas para alimentação animal e produção de biocombustíveis.^{2,3}

A agricultura foi uma das primeiras práticas adotadas pela civilização ao se estabelecerem em fazendas, milhares de anos atrás. Com o passar do tempo, as espécies plantadas foram domesticadas e seu cultivo aperfeiçoado.⁴ Com o passar dos anos a produtividade agrícola aumentou consideravelmente, com a chegada de novas ferramentas e equipamentos, adição de fertilizantes, a melhora dos sistemas de irrigação e tecnologias mais recentes como a engenharia genética provaram-se muito úteis até hoje.

Porém, mesmo com tais avanços, as plantações ainda hoje são vulneráveis a diversas condições adversas, também chamadas de estresses. Tais estresses são geralmente categorizados em aqueles que envolvem o meio em que situam (abiótico), como seca, calor, salinidade; e aqueles que envolvem outros organismos (biótico), como insetos, parasitas/nematoides e causadores de doenças em plantas; os chamados fitopatógenos, como fungos, bactérias e vírus.⁴

1.2. Fitopatógenos

Doenças que acometem as plantações são uma das principais causas de perda de produtos. Um estudo aponta que 32% de cereais, 54% de vegetais e até 78% de frutas são perdidas por causa de doenças de plantas ao não se usar pesticidas, provando que a busca por novas tecnologias para evitar essas perdas se mostra urgente.⁵ Atualmente, pesticidas e fertilizantes artificiais são as opções mais comuns em lavouras, mas nos últimos anos recebem críticas devido ao seu impacto na saúde e no meio ambiente, bem como no aumento da pegada de carbono para produzir tais aditivos.⁶

Os fitopatógenos podem ser classificados de acordo com sua forma de infectar a planta. Segundo Seybold, existem os patógenos biotróficos, que colonizam e se alimentam do tecido da planta ainda viva, completando o seu ciclo de vida sem matar a planta. Já patógenos necróticos induzem a morte das células da planta e se alimentam dos nutrientes que estas liberam. Há ainda os hemibiotróficos, que inicialmente se proliferam de forma biotrófica, mas depois possuem um estágio de necrose, matando a planta em seguida.⁷

Os pesticidas fazem parte dos agroquímicos, que são compostos por moléculas que atuam diretamente sobre um certo alvo, como outras plantas (herbicidas), insetos (inseticidas) e pestes. Tais moléculas afligem no metabolismo dos alvos, interrompendo as importantes reações que os mantêm vivos. Há vários tipos de pesticidas, que atuam sobre diferentes rotas metabólicas dos organismos, sempre com o objetivo de matar o organismo.⁴ Em muitos casos, o pesticida pode também comprometer com a saúde da planta, principalmente se esta for orgânica.

Há um incentivo para plantação de produtos geneticamente modificados, os transgênicos, imunes a esses agrotóxicos, porém ainda assim, o meio ambiente e nós não somos, reforçando ainda mais a busca por uma alternativa sustentável, saudável e ecológica.

2. Metabolômica: uma ferramenta útil para entender os patógenos

Um dos principais ramos de pesquisa, e que será o foco deste capítulo, é a metabolômica, uma ciência que busca compreender os metabólitos: moléculas produzidas no metabolismo de um organismo, no nosso caso, as plantas e as pestes. O metabolismo é todo processo envolvido dentro de um organismo para produzir e utilizar energia através de reações químicas, facilitados por enzimas, proteínas funcionais.

A metabolômica é uma abordagem que envolve a utilização de diferentes ferramentas para obtenção de informações sobre a composição metabólica de um determinado organismo ou grupo de organismos.⁸ A investigação desses metabólitos pode contribuir na compreensão dos mecanismos de ambos as plantas e os patógenos envolvidos.

2.1. Metabólitos secundários

Assim como qualquer organismo, as plantas também possuem suas próprias vias metabólicas para auxiliar no crescimento e proteção. O seu metabolismo primário, que mantém a planta viva, já é bem elucidada. Metabólitos primários compreendem aqueles que possuem função estrutural, plástica e armazenamento de energia. Mas o resto, que compõem o metabolismo secundário, não tem uma relação direta com crescimento e desenvolvimento da planta.⁹ Estes compostos secundários apenas recentemente estão sendo aprofundados.

Metabólitos secundários são também conhecidos como produtos naturais. Essas moléculas derivam do metabolismo primário da planta. No caso dos metabólitos secundários, a variedade de compostos é tão grande que alguns metabólitos são restritos a um grupo de plantas ou até a uma única espécie. Isto não significa que cada molécula é muito distinta das outras, na verdade elas variam pouco entre si. Essas moléculas produzidas pertencem a classificações conhecidas, formando três grandes grupos: os terpenos, compostos fenólicos e compostos nitrogenados, contendo diversas famílias em cada grupo.¹⁰

Os compostos fenólicos possuem uma ampla quantidade de moléculas, incluindo por exemplo os flavonoides, isoflavonas, taninas e estilbenos. Também inclui aqui as ligninas, compostos que formam o sistema vascular da planta. Moléculas deste grupo compõe o sabor, odor e coloração dos vegetais. Além disso, são os mais comumente associados a defesa das plantas, seja por insetos, injúria, animais, outras plantas e até a radiação ultravioleta (UV), principalmente pela sua capacidade antioxidante.¹¹

Além dos mecanismos de defesa na plantam há também os de reconhecimento de patógenos por padrões moleculares (PAMPs). Sequências características de metabólitos dos patógenos são reconhecidas pelas plantas, que por sua vez sinalizam para todo o sistema para produzir hormônios (como jasmonatos, ácidos salicílicos e etileno) para defesa e produção de metabólitos secundários.^{13,14}

Seguindo a mesma lógica, as moléculas biossintetizadas por bactérias e fungos também são metabólitos e são estes que interagem com a planta,

causando danos e doenças nesta. A interação planta-patógeno, porém, ainda se prova como um grande desafio para as pesquisas atuais, com diversos fatores envolvidos, como explicado por Allwood.⁶ Tais dificuldades incluem qual o tempo para amostragem *in vivo* (com a planta ainda viva). O estudo dos estágios iniciais da doença também são difíceis pela baixa concentração dos sinalizadores presentes. É importante também fazer a amostragem de espécimes saudáveis da planta para realizar a comparação com a planta afetada, pois o perfil químico será diferente, mas ambos terão compostos químicos em comum.

2.2. Estudo da metabolômica

Há diversas formas de estudar tais metabólitos, mas as duas principais são pela ressonância magnética nuclear (RMN) e pela espectrometria de massas (MS) acoplada a cromatografia gasosa (GC-MS) ou líquida (LC-MS). Estas técnicas permitem uma análise quantitativa e qualitativa das amostras mesmo em pequenas quantidades de material disponível e em pequena concentração de metabólitos de interesse, o que possibilita visualizar melhor as condições fisiológicas da amostra.¹⁵

Dentre os equipamentos citados, a espectrometria de massas é de longe a mais utilizada no ramo da pesquisa metabolítica, devido a sua grande sensibilidade e extenso banco de dados disponível sobre o metabolismo de plantas e outros organismos.^{12,15} Portanto, ela será o foco deste capítulo.

A técnica da espectrometria de massas acoplada a cromatografia envolve a separação da amostra inserida conforme a polaridade, carga, peso ou tamanho da molécula na coluna cromatográfica e a ionização das amostras injetadas por meio de uma descarga energética forte o suficiente para tornar as moléculas carregadas, mas sem destruí-las. Apenas assim, ionizadas, que as moléculas podem ser detetadas pelo equipamento. Cada molécula tem seu próprio espectro, como uma impressão digital própria, que a torna única e diferenciável das demais, permitindo a sua anotação no banco de dados. Conhecendo os espectros, pode-se chegar ao perfil metabólico da amostra injetada.

Com os espectros obtidos, certos *softwares* e plataformas *online* são capazes de gerar uma rede molecular dos metabólitos detectados, revelando

interações bioquímicas e potenciais alvos para intervenções agronômicas. A construção de uma rede molecular pode auxiliar na mitigação de perdas, melhorar a produtividade e assegurar a sustentabilidade da produção agrícola.

Para serem analisados, tais compostos devem primeiramente ser extraídos utilizando uma combinação de solventes. A maioria dos compostos de interesse estão dentro da amostra; no caso das plantas, geralmente a semente, folha ou caule; ou onde for que a planta esteja infectada. Após uma maceração, os solventes orgânicos separam esses compostos de interesse que são então concentrados e ressuspensos para serem injetados no equipamento.

Há dois tipos de análise metabolômica: sem alvo e com alvo. Quando não há um alvo, estuda-se todo o espectro da amostra, buscando obter a maior quantidade de informação sobre a amostra. Quando tem um alvo, busca analisá-lo minuciosamente, então a extensão do espectro e a pureza da amostra é baseada nesses metabólitos de interesse.¹⁴

3. Casos de estudo

Trabalhos recentes na metabolômica envolvendo a agricultura incluem diferentes espécies de plantas, em geral as mais estudadas são as de maior relevância na economia, como a soja, milho, trigo. Nestes trabalhos, é feito a comparação do perfil químico entre o espécime da planta saudável e da planta “tratada” com o patógeno. Na presença da doença, certos metabólitos serão mais expressos, aumentando a sua concentração e outros menos expressos, seja porque a via para a produção destes estão comprometidas ou o patógeno ativamente impede a planta de produzi-los.¹⁶

3.1. Milho

O milho (*Zea mays*) é um dos principais cultivos na economia atualmente, sendo plantada no mundo todo e tendo não só apenas aplicações alimentares, mas também na produção de bioenergia. Atualmente, uma das principais causas na perda da produção do milho ainda são patógenos. *Rhizoctonia solani* é um

fungo necrótico que afeta raízes e o caule de diversas plantas, causando a podridão radicular. O fungo libera enzimas e toxinas causando dano na planta, notavelmente o ácido fenilacético e seus derivados.¹⁷

Foram relatados diferenças consideráveis na concentração de metabólitos em folhas e na bainha da folha do milho, como a maior produção de traumatina, um hormônio de resposta a danos na planta, flavonoides rutina e vitexina, e fosfolipídios, indicando uma ação da planta na defesa. Precusores do ácido jasmônico, outro hormônio de defesa e glutamato notavelmente diminuíram a concentração na presença do patógeno, indicando que estava sendo afetada. O glutamato é importante na proteção contra oxidação e transporte de nitrogênio na planta.¹⁷

3.2. Soja

A soja (*Glycine max*) é outro dos pilares da agricultura do mundo todo, e não é diferente para a brasileira, tendo um enorme impacto econômico e social no país. Sendo assim, é de grande interesse a pesquisa do perfil químico da soja quando acometida a doenças para entender melhor a interação e como evitar ou ao menos mitigar os danos de futuras doenças.

Segundo pesquisas de Silva, a ferrugem asiática (ASR), uma doença causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi*, notavelmente causa perdas de 10% a 50% dependendo da região nos Estados Unidos. No Brasil, na safra de 2016/2017, foram gastos mais de 2 bilhões de dólares em fungicidas. 96% destes utilizados nas colheitas foram para o combate à ferrugem asiática. Foram anotados com espectrometria de massas acoplado a cromatografia líquida de alta resolução (UHPLC-MS) diversas classes de metabólitos secundários na planta, em especial foi notado que flavonoides e isoflavonoides eram os maiores responsáveis na reação de resposta da planta ao entrar em contato com o patógeno.^{12,13}

3.3. Tomate

O tomate (*Solanum lycopersicum*) também é produzido ao redor do mundo todo e, diferente dos outros cultivos, é muito mais suscetível a doenças

devido a sua baixa variação genética e seleção artificial intensa durante a sua domesticação.¹⁸ Portanto, existem vários estudos nas interações planta-patógeno de diversas doenças.

O fungo *Alternaria solani* causa a alternariose, também conhecida como pinta preta é caso de estudo de Singh (2023), que relata vários metabólitos presentes aumentaram a concentração em resposta ao patógeno, como lipídios, flavonoides e flavonas, vitaminas e seus precursores, enquanto alguns hormônios, antioxidantes e certos metabólitos nitrogenados diminuíram. O artigo ainda aponta que o próprio patógeno tem capacidades de bloquear a biossíntese desses metabólitos secundários para colonizar a planta.¹⁸

Outra doença que acomete o tomate é a causada pelo oomiceto (organismo semelhante a fungos) *Phytophthora infestans*, causando a requeima do tomateiro. O mesmo microrganismo também afeta batatas. Ele pode causar epidemias e levar a perda de toda a colheita em alguns casos. O seu controle movimenta bilhões de dólares anualmente no mundo todo. O patógeno é hemibiotrófico, então a doença apresenta dois estágios: o de infecção inicial, que é assintomático, e depois uma necrose severa dos tecidos da planta, afetando o fruto, caule e as folhas. Estas últimas, estudadas por Garcia, busca obter um perfil metabólico do início e fim do primeiro estágio, assintomático. Foi notado que a concentração de uma isocumarina aumenta linearmente com o tempo de infecção, sendo um bom marcador da doença. Saponinas e tomatidinas também aumentaram. Esta última produzida por enzimas do próprio patógeno.¹⁶

3.4. Arroz

O arroz (*Oryza sativa*) é há muito tempo o principal cultivo no mundo, servindo de alimento para mais da metade do mundo. A praga da folha bacteriana é a doença que mais afeta o arroz em sistemas irrigados por chuvas ou artificialmente. É causado pela bactéria *Xanthomonas oryzae*. O principal método de evitar esta praga é utilizando variedades de arroz resistentes, que possuem receptores em sua parede celular que reconhecem a sequência molecular do patógeno e aciona as respostas de defesa da planta, os PAMPs.¹⁹

Em uma análise comparando o perfil metabólico de folhas de espécimes de arroz resistentes e suscetíveis à infecção com *X. oryzae*, foi notado que arginina, fenilalanina e tirosina, três aminoácidos, são bons marcadores da presença da bactéria na planta. Eles são utilizados para sintetizar alcaloides, reforçando a parede celular com lignina. Outro aminoácido, o glutamato, diminui, pois o arroz usa para sintetizar ácido gama-aminobutírico (GABA) e oxoprolina, metabólitos de defesa contra estresse bacteriano.¹⁹

Outra pesquisa, de Oh, identificou metabólitos da interação entre o arroz e o fungo *Magnaporthe oryzae*, causador da brusone do arroz. 12 metabólitos foram classificados como os mais induzidos pela interação com o patógeno, e 9 deles foram relacionados a resposta da planta na defesa, incluindo em especial a ativação do metabolismo de lipídios, formando octadecanoides e prostanoïdes, além de oxilipinas, aminoácidos fenilalanina e triptofano (também para a formação de ligninas) e zeaxina, um hormônio da planta.¹⁴

3.5. Trigo

O trigo (*Triticum aestivum*) também é extremamente importante e um dos pilares da agricultura alimentar.²⁰ Estima-se, porém, que anualmente 15-20% da produção anual são perdidos por fungos patogênicos.²¹

Zymoseptoria tritici é um fungo de caráter hemibiotrófico, podendo perder até metade do cultivo. Certos espécimes de trigo possuem resistência a alguns isolados do fungo, mas não todas as variantes, então fazendeiros ainda precisam usar pesticidas. Porém, como descrito por Seybold e outros (2020), recentemente os fungos estão mais resistentes e agora também estão apresentando uma longa fase biotrófica e assintomática antes de repentinamente mudar para a fase necrótica. O artigo buscou realizar um perfil químico do trigo infectado com o patógeno nesta fase, visando entender melhor esta parte pouco estudada. Foi encontrado que este fungo causa uma suscetibilidade sistêmica induzida, ou seja, o fungo induz a planta a desligar suas vias para a produção de metabólitos de defesa, mas apenas em espécimes suscetíveis. Flavonoides, fenilpropanoides, ácido jasmônico e benzoxazinoides (este último servindo de um bom marcador), são todos suprimidos.⁷

Outro fungo que afeta o trigo é a *Tilletia controversa*, infectando-o no inverno com neve. Consome as sementes e a planta cresce com um odor desagradável. Em uma pesquisa do perfil químico do trigo infectado com este patógeno revelou grande aumento no ácido cafeico, um antioxidante; lipídios, fenilalanina e metabólitos de sinalização do patógeno.²⁰

A fusariose do trigo, causada pelo fungo *Fusarium graminearum*, é outra doença muito prejudicial a agricultura e a economia do trigo. O fitopatógeno pode atacar também a cevada, milho e aveia. O trigo não consegue se proteger a tempo, ele ativa as vias de fenilpropanoides (fenilalanina e ácido cinâmico) e de ácido jasmônico, mas sua resposta é atrasada e não contém o fungo. No mesmo artigo cita o quitosano como um agente defensor da planta, ajudando-a a combater o fungo, tanto diretamente como indiretamente (ajudando a ativar a defesa do fungo a tempo, por exemplo). A planta detecta o quitosano como uma ameaça apesar de não ser, e ativa a via dos fenilpropanoides antes da verdadeira ameaça.²¹

4. Conclusão

Dada a importância da agricultura para a economia brasileira e o impacto significativo das doenças causadas por fitopatógenos na produção, a metabolômica se prova como útil no estudo dos fitopatógenos, auxiliando pesquisadores, fazendeiros e a população como um todo para entender e mitigar ao máximo os danos causados pelas doenças em plantações. Graças ao perfil químico obtido de diversas plantas infectadas com diversas doenças elucidadas pela metabolômica, pode-se entender como o patógeno atua na planta, como esta responde e onde devemos focar para o combate dos fitopatógenos.^{15,22}

A pesquisa de metabólitos, moléculas naturais, também pode auxiliar na diminuição do uso de pesticidas sintéticos e abrasivos que causam dano ao meio ambiente e aos organismos.⁴

Aliada a outros ramos de pesquisa, como a proteômica (estudo das proteínas, moléculas funcionais como enzimas) e genômica (o estudo do material genético), a pesquisa de patógenos e plantas contribuem muito para a

pesquisa e entendimento dessas interações, mas não é um processo simples.^{15,22}

A metabolômica também se prova muito útil em outras áreas de interesse na agricultura, como na facilitação na identificação de metabólitos e, por consequência, quais manipulações genéticas fazer que melhorariam a planta a ser não apenas mais resistente a patógenos, mas também aumentar sua produção, qualidade e valor nutricional.¹⁵ Outras áreas fora da agricultura também se beneficiam destes estudos, como na medicina, ao descobrir novos metabólitos em amostras de plantas de eficiência notável.²²

5. Referências

1. CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA); CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL (CNA). **PIB do agronegócio brasileiro: 4º trimestre de 2024**. Piracicaba: Cepea; Brasília: CNA, 2024. 7 p. (Sumário Executivo). Disponível em: <<https://www.cnabrazil.org.br/publicacoes/sumario-executivo-pib-do-agronegocio-4o-trimestre-de-2024>>, acesso em: 2 de jan. 2026.
2. HILL, J.; NELSON, E.; TILAN, D.; POLASKY, S.; TIFFANY, D. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. **Proc. Natl. Acad. Sci.** 103, 11206–11210, 2006
3. FRITZ, H. et al. Soy, Red Clover, and Isoflavones and Breast Cancer: A Systematic Review. **PLoS ONE** 8, 2013
4. TUDI, M.; RUAN, H. D.; WANG, L.; LYU, J.; SADLER, R.; CONNELL, D.; CHU, C.; PHUNG, D. T. **Int. J. Environ. Res. Public Health**. v. 8, n. 3, p. 1112, 2021.
5. ZHANG, W. J.; JIANG, F. B.; OU, J. F., Global pesticide consumption and pollution: with China as a focus. **Proceedings of the international academy of ecology and environmental sciences**. 2011.
6. ALLWOOD, J. W.; WILLIAMS, A.; UTHE, H.; van DAM, N. M.; MUR, L. A. J.; GRANT, M. R.; PÉTRIACQ, P. Unravelling Plant Responses to Stress—The Importance of Targeted and Untargeted Metabolomics. **Metabolites**. v. 11, n. 8, p. 558, 2021.
7. SEYBOLD, H.; DEMETROWITSCH, T. J.; HASSANI, M. A.; SZYMCZAK, S.; REIM, E.; HAUEISEN, J.; LÜBBERS, L.; RÜHLEMANN, M.; FRANKE, A.; SCHWARZ, K.; STUKENBROCK, E. H. A fungal pathogen induces systemic susceptibility and systemic shifts in wheat metabolome and microbiome composition. **Nature Communications**. v. 11. n. 1910. 2020.

8. PATTI, G. J.; YANES, O.; SIUZDAK, G. Metabolomics: the apogee of the omic trilogy. **Nat. Rev. Mol. Cell Biol.** v. 13, n. 4, p.263-269, 2012.
9. TAIZ, L.; ZEIGER, E. Plant physiology. **Sinauer Associates Inc.**, Sunderland, Massachusetts. ed. 5. 2010.
10. AGOSTINI-COSTA, T.; VIEIRA, R. F.; BIZZO, H. R.; SILVEIRA, D.; GIMENES, M. A. Secondary Metabolites. **Embrapa**. 2012
11. VIZZOTTO, M.; KROLOW, A. C.; WEBER, G. E. B. Metabólitos secundários encontrados em plantas e sua importância. **Embrapa Clima Temperado**. Pelotas-RS. 2010.
12. SILVA, E.; da GRAÇA, PORTO, C.; do PRADO, R. M.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; MEYER, M. C.; NUNES, E. O.; PILAU, E. P., Unraveling Asian Soybean Rust metabolomic using mass spectrometry and Molecular Networking approach. **Scientific Reports**. 2020.
13. SILVA, E.; da GRAÇA, PORTO, C.; do PRADO, R. M.; NUNES, E. O.; MARCELINO-GUIMARÃES, F. C.; MEYER, M. C.; PILAU, E. P., Untargeted Metabolomics Analysis by UHPLC-MS/MS of Soybean Plant in a Compatible Response to *Phakopsora pachyrhizi* Infection. **Metabolites**. 2021.
14. OH, M.; PARK, S.; KIM, H.; CHOI, G. J.; KIM, S. H. Application of UPLC-QTOF-MS Based Untargeted Metabolomics in Identification of Metabolites Induced in Pathogen-Infected Rice. **Plants**. v. 10, n. 2. 2021.
15. TIAN, H.; LAM, S. M.; SHUI, G.; Metabolomics, a Powerful Tool for Agricultural Research. **Int. J. Mol. Sci.**, v. 17, n. 11. 2016.
16. GARCIA, P. G.; dos SANTOS, F. N.; ZANOTTA, S.; EBERLIN, M. N.; CARAZZONE, C. Metabolomics of *Solanum lycopersicum* Infected with *Phytophthora infestans* Leads to Early Detection of Late Blight in Asymptomatic Plants. **Molecules**. v. 23, n. 12. 2018.
17. HU, W.; PAN, X.; LI, F.; DONG, W. UPLC-QTOF-MS metabolomics analysis revealed the contributions of metabolites to the pathogenesis of *Rhizoctonia solani* strain AG-1-IA. **PLoS ONE**. v. 13, n. 2. 2018.
18. SINGH, D. P. et al. Metabolomics of early blight (*Alternaria solani*) susceptible tomato (*Solanum lycopersicum*) unfolds key biomarker metabolites and involved metabolic pathways. **Scientific Reports**. v. 13. 2023.
19. SANA, T. R.; FISCHER, S.; WOHLGEMUTH, G.; KATREKAR, A.; JUNG, K.; RONALD, P. C.; FIEHN, O. Metabolomic and transcriptomic analysis of the rice response to the bacterial blight pathogen *Xanthomonas oryzae* pv. *Oryzae*. **Metabolomics**. v. 6, p. 451-465. 2010.
20. REN, Z.; FANG, M.; MUHAE-UD-DIN, G.; GAO, H.; YANG, Y.; LIU, T.; CHEN, W.; GAO, L. Metabolomics analysis of grains of wheat infected and

noninfected with *Tilletia controversa* Kühn. **Scientific Reports**. v. 11, n. 18876. 2021.

21. DESHAIES, M.; LAMARI, N.; NG, C. K. Y.; WARD, P.; DOOHAN, F. M. The impact of chitosan on the early metabolomic response of wheat to infection by *Fusarium graminearum*. **BMC Plant Biology**. v. 22, n. 73. 2022.
22. CASTRO-MORETTI, F. R.; GENTZEL, I. N.; MACKEY, D.; ALONSO, A. P. Metabolomics as an Emerging Tool for the Study of Plant–Pathogen Interactions. **Metabolites**. v. 10, n. 2. 2020.

Autores

Lucas Haruo Nakayama Pereira

Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Maringá.

CAPÍTULO 11

Armadilhas Modernas: O Impacto dos Novos Hábitos Alimentares em um Corpo Ancestral (ou "*Hábitos Alimentares e Dietas da Moda*")

Luiz Gabriel Moreira Santos

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c11>

Resumo

Este capítulo aborda as profundas transformações nos padrões de comportamento humano nas últimas décadas e os seus impactos diretos na saúde fisiológica e metabólica. A análise foca-se na adoção de dietas ricas em alimentos ultraprocessados, na popularização de "dietas da moda" restritivas promovidas por redes sociais e nos perigos do sedentarismo, revelando como esses fatores alteram a microbiota intestinal, induzem inflamação crônica e desregulam vias enzimáticas cruciais (como a lipoproteína lipase). Adicionalmente, o texto explora os riscos bioquímicos do uso de cigarros eletrônicos (vaping) e do consumo de álcool, destacando a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), o estresse oxidativo e os danos celulares irreversíveis. Conclui-se que o distanciamento de um estilo de vida focado no movimento e em alimentos minimamente processados atua como o principal gatilho para o surgimento de doenças crônicas e metabólicas no século XXI.

Palavras-chave: Hábitos modernos; Dietas da moda; Sedentarismo; Estresse oxidativo; Microbiota intestinal.

Abstract

This chapter addresses the profound transformations in human behavior patterns over recent decades and their direct impacts on physiological and metabolic health. The analysis focuses on the adoption of diets rich in ultra-processed foods, the popularization of restrictive "fad diets" promoted by social media, and the dangers of a sedentary lifestyle, revealing how these factors alter the gut microbiota, induce chronic inflammation, and dysregulate crucial enzymatic pathways (such as lipoprotein lipase). Additionally, the text explores the biochemical risks of electronic cigarette use (vaping) and alcohol consumption, highlighting the production of reactive oxygen species (ROS), oxidative stress, and irreversible cellular damage. It concludes that the detachment from a lifestyle focused on movement and minimally processed foods acts as the main trigger for the emergence of chronic and metabolic diseases in the 21st century.

1. O Contexto Evolutivo da Alimentação

Nas últimas décadas, a forma como nos alimentamos tem passado por transformações radicais moldadas pela urbanização, por avanços tecnológicos e pela globalização. Deixamos padrões tradicionais para trás em prol de adotar os chamados "costumes alimentares modernos", que priorizam a conveniência em vez da nutrição. O resultado é uma dieta rica em alimentos ultraprocessados, também conhecidos como *junk food* — produtos carregados de calorias vazias, açúcares refinados, gorduras trans e sódio, mas que carecem de fibras e micronutrientes essenciais, que se mostram como o coração do problema. Nossa genética não foi capaz de acompanhar as mudanças rápidas na nossa alimentação.

Esse padrão alimentar não apenas nos faz ganhar peso; ele atua como um gatilho para doenças crônicas que se tornaram as principais causas de morte no século XXI. O consumo rotineiro desses alimentos está diretamente ligado ao aumento alarmante de diabetes tipo 2, hipertensão, problemas cardíacos e até certos tipos de câncer. Além disso, o tamanho das porções aumentou drasticamente ao longo do tempo, incentivando o consumo exagerado de energia.

Diante desse cenário e da pressão estética exercida pela mídia e pelas redes sociais, muitas pessoas buscam soluções rápidas e milagrosas nas chamadas "dietas da moda", ou "*fad diets*", muitas vezes promovida por *influencers* e revistas.

O perigo mais silencioso dos hábitos modernos acontece dentro do nosso sistema digestivo, onde se abrigam inúmeros de microrganismos, conhecidos como microbiota, que funcionam como uma linha de defesa no nosso organismo, tendo suas próprias funções, como impedir a proliferação de colônias de microrganismos danosos, no entanto, a dieta ocidental moderna, pobre em fibras e rica em gorduras saturadas, reduz a diversidade desse ecossistema. Por exemplo, quando não ingerimos fibras suficientes, algumas bactérias começam a se alimentar da camada de muco que protege o nosso intestino, o que pode levar a uma condição chamada "intestino permeável" (*leaky gut*), permitindo que toxinas entrem na corrente sanguínea e gerem inflamação crônica em todo o

corpo. Até mesmo aditivos comuns, como adoçantes artificiais e emulsificantes, podem alterar essas bactérias e aumentar o risco de doenças metabólicas.

Com o medo de doenças e da pressão para manter o corpo dentro de um padrão de beleza, boa parte da população busca soluções “rápidas e fáceis” em plataformas como Tik Tok e Instagram, ou mais antigamente, revistas. O problema aparece porque grande parte das informações sobre nutrição nessas redes carece de embasamento científico; apenas cerca de 36% das postagens sobre essas dietas são precisas, não apresentando sensacionalismo ou “terrorismo nutricional”, o ato de condenar tipos de alimento como grandes vilões contra a saúde.

Essa desinformação impulsiona essas *fad diets*, que prometem perdas de peso milagrosas através da eliminação radical de grupos alimentares. Sem acompanhamento profissional, essas práticas escondem riscos severos.

Dietas como a carnívora ou de “zero carboidrato” trazem um grande risco de escorbuto devido à falta de vitamina C, importantíssima para a síntese de colágeno e processos como a cicatrização. Por outro lado, dietas veganas ou vegetarianas mal planejadas podem trazer a deficiência de vitamina B12, ferro e zinco, resultando em anemia e danos neurológicos. Os seguidores da dieta Paleolítica costumam ingerir cerca de 50% menos cálcio do que o necessário para o organismo, podendo prejudicar a densidade óssea a longo prazo. A dieta cetogênica é outra dieta que tem sido associada à redução da densidade mineral óssea e ao aumento do risco de fraturas.

Muitas dietas da moda priorizam proteínas e gorduras em excesso, o que pode sobrecarregar o funcionamento interno do corpo. As dietas ricas em proteínas (como a Atkins) promovem a produção de resíduos nitrogenados, aumentando excessivamente a pressão exercida sobre os rins. Isso pode elevar a acidez renal, promovendo a formação de pedras nos rins e aumentando o risco de doenças renais crônicas.

Mesmo promovendo uma perda de peso rápida, regimes como a dieta cetogênica podem causar um grande aumento no colesterol LDL, o colesterol de baixa densidade, também chamado de “colesterol ruim”, e aumentar marcadores que indicam inflamação. A ingestão excessiva de gorduras saturadas de origem

animal também se mostra um fator de risco conhecido para doenças cardiovasculares. Em casos mais extremos, o corte dos carboidratos pode levar o paciente a estados de cetoacidose, uma condição potencialmente fatal onde o sangue se torna excessivamente ácido pela presença excessiva de corpos cetônicos na corrente.

Já é do conhecimento comum que o intestino abriga inúmeras bactérias que formam um ecossistema essencial na colaboração para a imunidade. Dietas restritivas podem causar disbiose, um desequilíbrio nessas comunidades bacterianas. Dietas ocidentais modernas e ricas em gordura animal estimulam o crescimento de bactérias como a *E. coli* e outras espécies que produzem compostos pró-inflamatórios drasticamente, trazendo um grande aumento do risco de doenças.

A pele, os cabelos e as unhas funcionam como um sistema de aviso para desequilíbrios internos. Por exemplo: a perda de peso rápida e a carência de biotina, zinco e proteínas (comuns em limpezas com sucos ou dietas líquidas) são gatilhos frequentes para a queda de cabelo (alopecia) e unhas quebradiças. A dieta cetogênica pode provocar o "rash cetônico" (*Prurigo pigmentosa*), uma irritação na pele intensamente coceguenta que surge quando o corpo entra em cetose.

O uso sem orientação de suplementos para "melhorar a performance" ou "beleza" também pode causar toxicidade por excesso de selênio ou niacina, resultando em descamação da pele, fadiga e danos ao fígado.

Essas dietas podem ter efeitos além do físico, podem também trazer danos para a saúde mental dos seus seguidores. A pressão estética e o terrorismo nutricional, a rotulação de alimentos como "bons" ou "maus" podem gerar uma obsessão com o controle sobre a comida que é consumida, muitas vezes servindo de gatilho para condições como anorexia e bulimia.

As dietas da moda são, em maioria, insustentáveis a longo prazo. Quando interrompido o regime, a pessoa recupera o peso perdido muito rapidamente, muitas vezes ganhando mais peso do que perdeu, gerando frustração profunda, e podendo levar à baixa autoestima e depressão.

As evidências científicas indicam que não existe uma "dieta única" que sirva para todos, com a enorme variabilidade genética e de estilo de vida entre os indivíduos. Adotar essas dietas radicais sem um acompanhamento profissional de nutricionistas, é uma aposta muito arriscada que pode reduzir drasticamente a expectativa de vida e causar danos difíceis de reparar. Para a sustentabilidade da saúde, a maior recomendação de sociedades médicas é o foco nos alimentos minimamente processados e alimentos de origem vegetal.

2. Estilo de Vida Sedentário

O sedentarismo, ao contrário do que se pensa, vai além de apenas não praticar exercícios. Nossos corpos são como máquinas projetadas para o movimento constante; se essa máquina fica parada por um período mais extenso de tempo, processos biológicos específicos começam a falhar, independentemente de você ir à academia por uma hora no fim do dia. Na ciência, definimos como sedentário o comportamento em que qualquer atividade realizada enquanto estamos acordados, que envolva a posição sentada ou reclinada e que tenha gastos mínimos de energia. Exemplos comuns são ver televisão, usar o computador, dirigir ou ler.

Ao passarmos muitas horas sentados, nosso corpo entra em um estado fisiológico diferente do de quem acaba de realizar esforço físico e está descansando, esse estado fisiológico levou ao surgimento de uma área de estudo chamada de "fisiologia do sedentarismo", que estuda justamente essas respostas.

Um dos principais problemas desse estado é a diminuição drástica na atividade da enzima lipoproteína lipase (LPL). A LPL funciona como um "aspirador de gordura" no sangue, ajudando os músculos a absorver gorduras e utilizá-las como energia. Quando ficamos sedentários, a atividade dessa enzima cai em até 75% em algumas horas, fazendo com que os níveis de gordura no sangue subam e o colesterol de alta densidade (HDL), o colesterol "bom", diminua. A inatividade também reduz a sensibilidade do organismo à insulina, dificultando todo o processamento do açúcar pelo corpo, abrindo as portas para condições como a diabetes tipo 2.

Outro ponto crucial que se destaca é que ser "fisicamente ativo", cumprir o tempo de exercícios semanais recomendados, não anula necessariamente todos os malefícios de ser sedentário durante todo o resto do dia. Você pode ser um corredor matinal, porém passar as outras 15 horas e meia do seu dia sentado no escritório ou no sofá, faz com que você seja o que chamam de "Atleta de Sofá", ou *active couch potato*, no inglês.

Os estudos mostram que o tempo total sentado está ligado a um maior risco de morte prematura, doenças cardiovasculares e câncer, mesmo para quem se exercita. O corpo humano possui até uma espécie de "balança interna" que parece registrar valores inferiores quando estamos sentados por muito tempo, causando desregulações no nosso apetite e favorecendo o ganho de peso.

Os impactos do sedentarismo atinge os sistemas do corpo todo, por exemplo, a falta de carga mecânica, o simples ato de sustentar o próprio peso em pé, causa a reabsorção de minerais dos ossos, aumentando o risco de osteoporose e dores crônicas, como no joelho. Ou mesmo comportamentos sedentários passivos, como ver muita televisão, e sua forte ligação com o aumento da depressão e ansiedade. Em crianças, o excesso de telas antes dos dois anos de idade pode até prejudicar o desenvolvimento da linguagem e a atenção.

Felizmente, não é necessário correr maratonas para combater isso, pequenas pausas para levantar, espreguiçar, alongar, ou caminhar brevemente durante o trabalho ajudam na reativação da enzima LPL e a melhorar o metabolismo do açúcar e da gordura. Reduzir o tempo sentado e fazer pequenas interrupções ao longo do dia é tão vital para a longevidade quanto a prática regular de exercícios físicos intensos.

3. Uso de Cigarros Eletrônicos ou Vaping

O *vaping* é basicamente a inalação e exalação de um aerossol produzido por dispositivos como cigarros eletrônicos ou canetas de vapor, é um hábito de crescente popularidade entre jovens nos anos recentes. E embora muitas vezes seja promovido como uma alternativa mais segura ao cigarro comum, estudos

indicaram que esses aparelhos não liberam apenas vapor d'água, mas sim uma mistura complexa de substâncias químicas que podem causar danos severos a curto e longo prazo.

Os líquidos usados nos *vapes*, os *e-liquids*, contêm três ingredientes principais: solventes, nicotina e aromatizantes. O problema começa quando esses componentes são aquecidos: A base do líquido costuma ser feita de propilenoglicol e glicerina, quando aquecidos pela resistência do aparelho, eles podem se transformar em substâncias tóxicas como formaldeído e benzeno, que são conhecidos causadores de câncer. Além disso, o que mais atrai os jovens à esse produto são os sabores como frutas ou doces, que contêm compostos que embora possam ser seguros para comer, quando inalados podem ser severamente danosos, como exemplo o diacetil, que confere um sabor amanteigado ao vapor, está ligado a uma doença pulmonar grave, conhecida popularmente como pulmão de pipoca.

Conforme o dispositivo é usado, as partes metálicas que aquecem o líquido começam a se desgastar. Isso libera minúsculas partículas de metais como níquel, cromo, chumbo e estanho diretamente nos pulmões do usuário.

O uso de vapes também pode causar tosses, falta de ar e inflamações crônicas similares à DPOC (Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica. Um dos maiores perigos é a EVALI, a lesão pulmonar associada ao uso de produtos de *vaping*. Essa condição surgiu como um surto de hospitalizações e mortes de pessoas jovens e saudáveis, na qual o principal suspeito de ser o causador é o acetato de vitamina E, um espessante usado em líquidos que contém THC, que, ao ser inalado, causa danos severos às células pulmonares.

Mais recentemente, dentistas perceberam diversos padrões incomuns de cáries e doenças na gengiva em pacientes que usam vape. O vapor espesso liberado pelos aparelhos é grudento, o que permite que açúcares e bactérias se fixem nos dentes com mais facilidade, favorecendo a ocorrência de cáries, certos sabores doces podem aumentar em até quatro vezes a adesão de bactérias ao esmalte.

Os solventes do líquido também reduzem a produção de saliva, que é a proteção natural dos dentes contra a desmineralização, causando boca seca e

aumentando o consumo de diversas bebidas durante eventos sociais, sendo mais comum entre os jovens o consumo de bebidas alcoólicas e de bebidas energéticas.

Os danos não se estendem apenas aos pulmões, a nicotina presente na maioria dos vapes é altamente viciante e aumenta a pressão arterial e a frequência cardíaca, e o aerossol prejudica o revestimento dos vasos sanguíneos, o que eleva o risco de infartos e outros problemas cardiovasculares. Especialmente em adolescentes, a nicotina interfere no desenvolvimento do cérebro, afetando o funcionamento da memória, a atenção e a impulsividade. Também são documentados casos de convulsões após o uso excessivo de dispositivos com altas doses de nicotina.

Embora alguns adultos tentem usar o vape para parar de fumar, evidências apontam que muitos indivíduos ao invés de parar acabam se tornando usuários duais, abusando de ambos, e que o vape serve como porta de entrada para o tabagismo em jovens. A concentração de nicotina em certos cartuchos pode equivaler a fumar até três maços de cigarro comum, o que torna a dependência extremamente difícil de quebrar.

4. Consumo de Álcool

O consumo de álcool é um dos hábitos mais comuns na nossa sociedade, mas a ciência revela que ele atua como um verdadeiro Cavalo de Tróia para o nosso corpo, sendo útil como uma ferramenta de socialização por fazer com que o usuário fique mais desinibido, mas causando danos severos que podem se estender até o tecido cerebral, causando mudanças permanentes.

O álcool interfere em diversas funções essenciais, por exemplo, impede que o corpo absorva e utilize a tiamina, vitamina vital para o funcionamento dos nervos. A falta dela pode levar à Síndrome de Wernicke-Korsakoff, que causa confusão mental grave e perda de memória permanente, bem como estimula as células de defesa do cérebro a produzir substâncias inflamatórias que destroem neurônios. Além disso, o álcool também altera o sistema de recompensa (dopamina), tornando a pessoa mais impulsiva e menos sensível a prazeres naturais, o que alimenta um ciclo de vício.

Ao contrário da crença de que o álcool ajuda o coração, o consumo excessivo é uma causa direta de condições severas. O álcool pode enfraquecer o músculo cardíaco, uma condição chamada cardiomiopatia alcoólica, em que o coração perde a força para bombear o sangue, aumentando drasticamente o risco de insuficiência cardíaca, arritmias e morte súbita.

O álcool também se mostrou um causador do intestino permeável através da irritação à mucosa intestinal, e mais grave ainda, evidências indicam que o álcool também danifica as células-tronco intestinais, responsáveis por renovar o revestimento do nosso sistema digestivo. Esse dano persiste por semanas ou meses após a pessoa parar de beber, aumentando os riscos de câncer gastrointestinal.

Dentro das nossas células, o álcool promove a desregulação do equilíbrio redox e a criação de moléculas altamente reativas chamadas "espécies reativas de oxigênio" (ROS). O próprio organismo às vezes as produz em pequenas quantidades, quantidades essas que existem mecanismos capazes de fazer a neutralização, mas o álcool aumenta drasticamente sua produção e, ao mesmo tempo, reduz as defesas naturais, os antioxidantes. O resultado é o estresse oxidativo, um estado que danifica permanentemente gorduras, proteínas e até o nosso DNA. Esse processo é um fator central para o desenvolvimento da doença hepática alcoólica, a cirrose, e de vários tipos de câncer.

O álcool também se apresenta como um potente teratógeno, o que significa que ele causa malformações no feto. A exposição pré-natal pode resultar na Síndrome Alcoólica Fetal (SAF), que causa deficiências cognitivas irremediáveis e mudanças na estrutura física do cérebro da criança para o resto da vida.

5. Referências

ANDERSON, Kayli. Popular fad diets: An evidence-based perspective. **Progress in Cardiovascular Diseases**, v. 77, p. 78-85, 2023

DHAMIJA, Radhika; ECKERT, Susan; WIRRELL, Elaine. Ketogenic Diet. **Canadian Journal of Neurological Sciences**, v. 40, n. 2, p. 158-167, 2013

IRUSA, Karina F.; VENCE, Brian; DONOVAN, Terry. Potential oral health effects of e-cigarettes and vaping: A review and case reports. **Journal of Esthetic and Restorative Dentistry**, p. 1-5, 2020

KHAWANDANAH, Jomana; TEWFIK, Ihab. Fad Diets: Lifestyle Promises and Health Challenges. **Journal of Food Research**, v. 5, n. 6, p. 80-94, 2016

KOUZOUKAS, Erika et al. The health effects of vaping and e-cigarettes: consensus recommendations. **International Journal of Drug Policy**, v. 148, 105117, 2026

KUCHKUNTALA, Aravind R. et al. Fad Diets: Hype or Hope?. **Current Nutrition Reports**, v. 7, p. 310-323, 2018

LU, Rong et al. Alcohol injury damages intestinal stem cells. **Alcoholism: Clinical and Experimental Research**, 2017

MARTINS, Larissa Castelo Guedes et al. The factors related to a sedentary lifestyle: A meta-analysis review. **Journal of Advanced Nursing**, v. 77, p. 1188–1205, 2021

MENDONCA, Vineetha. Modern Food Habits and Its Impact on Human Health. **International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM)**, p. 182-185, 2023

NORDLI JR., Douglas R.; DE VIVO, Darryl C. The Ketogenic Diet Revisited: Back to the Future. **Epilepsia**, v. 38, n. 7, p. 743-749, 1997

OBAD, Adam et al. Alcohol-Mediated Organ Damages: Heart and Brain. **Frontiers in Pharmacology**, v. 9, n. 81, 2018

O'NEILL, Blair; RAGGI, Paolo. The ketogenic diet: Pros and cons. **Atherosclerosis**, v. 292, p. 119-126, 2019

PARGA, Andres D.; COVEN, Hannah. When Diet Trends Go Viral: Cutaneous Manifestations of Social Media-Driven Fad Diets and Supplements. **Cureus**, v. 17, n. 6, e86334, 2025

PARK, Jung Ha et al. Sedentary Lifestyle: Overview of Updated Evidence of Potential Health Risks. **Korean Journal of Family Medicine**, v. 41, n. 6, p. 365-373, 2020

RINNINELLA, Emanuele et al. Food Components and Dietary Habits: Keys for a Healthy Gut Microbiota Composition. **Nutrients**, v. 11, n. 10, 2393, 2019.

SCHUTZ, Yves; MONTANI, Jean-Pierre; DULLOO, Abdul G. Low-carbohydrate ketogenic diets in body weight control: A recurrent plaguing issue of fad diets?. **Obesity Reviews**, v. 22, n. S2, e13195, 2021

SHRIDHAR, G. et al. Modern Diet and its Impact on Human Health. **Journal of Nutrition & Food Sciences**, v. 5, n. 6, p. 1000430, 2015

TREMBLAY, Mark Stephen et al. Physiological and health implications of a sedentary lifestyle. **Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism**, v. 35, p. 725-740, 2010

WU, Defeng; CEDERBAUM, Arthur I. Alcohol, Oxidative Stress, and Free Radical Damage. **Alcohol Research & Health**, v. 27, n. 4, p. 277-284.

Autores

Luiz Gabriel Moreira Santos

Programa de Pós-graduação em Bioquímica, Universidade Estadual de Maringá

CAPÍTULO 12

A Bioquímica da Juventude e da Proteção: A Cooperação entre Colágeno, Aminoácidos e Antioxidantes

Milena Kazue Enokida

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c12>

Resumo

Este capítulo explora os mecanismos bioquímicos subjacentes ao envelhecimento cutâneo e o papel fundamental da nutrição funcional na sua mitigação. A matriz extracelular, composta predominantemente por colágeno, sofre degradação contínua devido ao expossoma, especialmente pela radiação ultravioleta, que induz o estresse oxidativo e a hiperatividade das enzimas metaloproteinases de matriz (MMPs). Para contrariar esse processo, a ingestão de colágeno hidrolisado (peptídeos bioativos) demonstra eficácia ao atuar não apenas como blocos construtores, mas como moléculas sinalizadoras que estimulam os fibroblastos a sintetizar novas fibras. Além disso, o texto destaca a sinergia entre os aminoácidos e os compostos antioxidantes, como os polifenóis, que neutralizam os radicais livres e protegem a nova matriz estrutural. Conclui-se que a preservação da juventude biológica depende da cooperação entre a reposição estrutural mediada pelo colágeno e a blindagem proporcionada pelos antioxidantes.

Palavras chaves: Colágeno hidrolisado; Peptídeos bioativos; Antioxidantes; Fotoenvelhecimento; Matriz extracelular.

Abstract

This chapter explores the biochemical mechanisms underlying skin aging and the fundamental role of functional nutrition in its mitigation. The extracellular matrix, predominantly composed of collagen, undergoes continuous degradation due to the exposome, especially ultraviolet radiation, which induces oxidative stress and the hyperactivity of matrix metalloproteinases (MMPs). To counteract this process, the ingestion of hydrolyzed collagen (bioactive peptides) proves effective by acting not only as building blocks but as signaling molecules that stimulate fibroblasts to synthesize new collagen fibers. Furthermore, the text highlights the synergy between amino acids and antioxidant compounds, such as polyphenols, which neutralize free radicals and protect the newly formed structural matrix. It is concluded that the preservation of biological youth depends on the cooperation between collagen-mediated structural replacement and the shielding provided by antioxidants.

Keywords: Hydrolyzed collagen; Bioactive peptides; Antioxidants; Photoaging; Extracellular matrix.

1. Introdução

O envelhecimento é, fundamentalmente, um processo natural que afeta todas as células do corpo, mas os seus efeitos são mais rápidos e visíveis na pele e nos tecidos de sustentação. Sob a lente da ciência, a "juventude" de um tecido biológico não se resume à sua aparência estética, mas sim à capacidade inata do corpo de manter um equilíbrio constante entre a produção de novas estruturas e a degradação daquelas que já estão desgastadas.

O maior inimigo desse delicado equilíbrio é o ambiente externo, com grande destaque para a radiação ultravioleta (UVA e UVB) emitida pelo sol. A exposição contínua a esses raios, muitas vezes combinada a uma alimentação que favorece danos celulares e glicação, acelera o que os cientistas chamam de fotoenvelhecimento. Essa agressão ambiental gera um estado de estresse oxidativo, inundando o corpo com Espécies Reativas de Oxigênio (EROs) — moléculas instáveis popularmente conhecidas como radicais livres. Essas moléculas atacam as células de forma descontrolada, danificam o DNA e causam inflamação.

O alvo principal dessa destruição é o colágeno, a proteína mais abundante do organismo. Ele funciona como o "esqueleto" ou o "colchão" da pele, formado por uma estrutura firme em formato de tripla hélice que garante força, tração e elasticidade.

Quando os radicais livres atacam, essa hélice se quebra e perde a sua estabilidade, fazendo com que a pele perca sua firmeza e apresente os sinais visíveis do envelhecimento.

Para combater esse desgaste e reconstruir a estrutura perdida, a ciência tem focado intensamente no uso estratégico do colágeno, sendo fundamental compreender a diferença na forma como ele é administrado ao corpo. Diferente de tratamentos aplicados superficialmente sobre a pele (tópicos), o foco contemporâneo da nutrição atua de dentro para fora por meio do colágeno ingerido. No entanto, nós não absorvemos a proteína do colágeno inteira; ela precisa ser consumida na forma de colágeno hidrolisado. Isso significa que a grande molécula de colágeno já foi "pré-digerida" ou fragmentada na indústria em pedaços muito menores, chamados de peptídeos bioativos.

Essa fragmentação é vital, pois permite que os peptídeos — que podem ser extraídos de fontes bovinas, do atum ou de escamas de outros peixes — sejam rapidamente absorvidos pelo intestino e cheguem à corrente sanguínea. Uma vez dentro do corpo, os aminoácidos que formam esses peptídeos não servem apenas como meros "tijolos" passivos para construir novas fibras. Eles atuam como verdadeiros mensageiros celulares. Ao alcançarem as células da pele agredidas pelo sol, eles enviam um comando biológico (ativando vias de sinalização específicas, como a TGF- β) que obriga o corpo a fabricar colágeno virgem. Simultaneamente, esses peptídeos "desligam" os comandos que produzem as enzimas destruidoras da pele, conhecidas como metaloproteinases de matriz (MMPs). Esse processo de reconstrução de dentro para fora torna-se ainda mais robusto quando o colágeno hidrolisado trabalha em equipe com outros componentes complementares, como peptídeos de elastina e ácido hialurônico ingerido, melhorando a hidratação e devolvendo o volume natural do tecido.

Apesar da notável capacidade dos aminoácidos de reconstruir o tecido, fabricar um novo colágeno de nada adianta se o estresse ambiental continuar a destruí-lo diariamente. É neste ponto exato que entra o papel crucial dos antioxidantes, criando uma verdadeira sinergia de proteção. Os antioxidantes funcionam como um escudo inteligente: eles "sacrificam" os seus próprios elétrons, entregando-os aos radicais livres e neutralizando a ameaça antes que ela possa quebrar a nova e frágil matriz de colágeno.

Estudos recentes revelam que os próprios peptídeos de colágeno ingeridos já possuem uma capacidade natural de atuar como antioxidantes moderados, ajudando a fazer uma "limpeza" no ambiente celular. Além disso, a presença constante desses peptídeos estimula as células humanas a produzirem mais das suas próprias enzimas de defesa, como a Superóxido Dismutase (SOD) e a Glutathione Peroxidase (GSH-Px). Para amplificar ainda mais essa blindagem, os pesquisadores de biomateriais e alimentos funcionais têm mapeado como as proteínas interagem com antioxidantes naturais encontrados em plantas, conhecidos como polifenóis. Quando essas substâncias se encontram, elas unem-se em complexos fortificados que aumentam a estabilidade do colágeno e criam uma barreira altamente eficiente

contra o envelhecimento causado pelo sol. Portanto, a ciência moderna demonstra que a verdadeira proteção biológica reside nessa parceria: a reposição estrutural por meio da ação mensageira dos aminoácidos do colágeno ingerido e a defesa implacável promovida pelos antioxidantes.

2. O Inimigo Invisível: Como o Expossoma e a Radiação Destroem a Matriz Extracelular

A pele atua como a fronteira primordial entre o delicado ambiente interno do organismo e o mundo exterior. Diariamente, essa barreira é submetida a um complexo conjunto de agressões ambientais, compreendido cientificamente no conceito de expossoma. A radiação ultravioleta (UVA e UVB) desponta como o inimigo mais formidável desse cenário contínuo, sendo a principal força motriz por trás do fotoenvelhecimento. Esse desgaste extremo, no entanto, não age de forma isolada; frequentemente ele soma-se a fatores metabólicos nocivos, como a alta exposição a agentes indutores de glicação (a exemplo da D-galactose), criando um microambiente altamente hostil e tóxico para os tecidos.

Quando a radiação penetra profundamente no tecido, ela deflagra uma severa guerra química celular. O primeiro golpe dessa invasão é a geração explosiva e descontrolada de Espécies Reativas de Oxigênio (EROs). Essas moléculas são estruturalmente instáveis e buscam freneticamente roubar elétrons das células estruturais saudáveis, instaurando um quadro de estresse oxidativo celular destrutivo. Esse pesado bombardeio corrompe o DNA celular e paralisa os sistemas fundamentais de limpeza biológica, conhecidos como vias de autofagia. Consequentemente, as células perdem a sua vitalidade e entram em um estado de senescência precoce, tornando-se unidades fisiologicamente disfuncionais que passam a secretar uma enxurrada de sinais inflamatórios crônicos, um fenômeno descrito pela ciência como Fenótipo Secretor Associado à Senescência, ou SASP.

Essa inflamação crônica e a sobrecarga contínua de radicais livres ativam rotas de sinalização de perigo no interior do tecido, como a via celular MAPK. Esse mecanismo molecular específico funciona como um alarme biológico nocivo que obriga a pele a produzir quantidades massivas de enzimas chamadas

Metaloproteinases de Matriz (MMPs). De forma didática, as MMPs atuam como verdadeiras "tesouras biológicas". Uma vez ativas e livres no tecido, elas desmembram e fatiam implacavelmente a matriz extracelular, o grande andaime de suporte e firmeza da pele. Elas não apenas rompem as grossas fibras estruturais primárias, mas destroem proteínas cruciais que mantêm a coesão celular e a impermeabilidade tecidual.

O saldo fisiológico desse ataque coordenado pelo expossoma é um tecido conjuntivo em colapso profundo. Ocorre a perda drástica da capacidade natural de retenção hídrica, o esgotamento precoce das defesas antioxidantes intrínsecas e a degradação anatômica desorganizada de toda a rede proteica de sustentação. A matriz extracelular, antes coesa, firme e resistente, transforma-se em um canteiro de fragmentos celulares corrompidos, resultando na perda estrutural e mecânica visível típica do envelhecimento avançado. Para sobreviver a esse cerco impiedoso, o organismo necessita desesperadamente de uma intervenção capaz de paralisar as enzimas destrutivas e fornecer os blocos primários ideais para reerguer a fundação arruinada.

3. A Arquitetura da Pele e a Revolução do Colágeno Hidrolisado

Para compreender integralmente como a pele sucumbe aos ataques ambientais contínuos descritos anteriormente, é imprescindível observar a sua fundação primordial: a matriz extracelular. Essa matriz atua como um complexo andaime biológico, fornecendo suporte mecânico, elasticidade e firmeza incomparáveis aos tecidos. O protagonista absoluto dessa arquitetura é o colágeno, uma proteína gigantesca e robusta formada por cadeias de aminoácidos que se entrelaçam de forma precisa em formato de tripla hélice. É exatamente essa conformação rígida que permite à pele resistir a tensões e manter a sua integridade funcional. Quando a radiação ultravioleta e o estresse oxidativo quebram essas hélices, a pele perde a sua base fundamental de sustentação, resultando na flacidez profunda e no envelhecimento visível.

A tentativa de restaurar esse andaime perdido apenas aplicando cremes de colágeno puro diretamente sobre a pele esbarra, no entanto, em um formidável obstáculo biológico. O colágeno nativo é uma macromolécula de

elevadíssimo peso molecular. Devido a esse tamanho colossal, é virtualmente impossível que a molécula atravesse a barreira de defesa mais externa da pele, o estrato córneo, para alcançar as camadas profundas onde a matriz extracelular realmente reside. Consequentemente, o colágeno aplicado de forma tópica age predominantemente na superfície, formando um agradável filme hidratante que retém a umidade de forma paliativa, mas que é incapaz de reconstruir a complexa estrutura interna danificada.

Esse impedimento anatômico impulsionou uma verdadeira revolução biotecnológica: o desenvolvimento do colágeno hidrolisado para consumo oral. Através de processos enzimáticos controlados, a indústria consegue "quebrar" a molécula gigante do colágeno em fragmentos microscópicos e altamente solúveis, denominados peptídeos bioativos.

Estes peptídeos, extraídos com alto grau de pureza, possuem um peso molecular reduzido, o que altera radicalmente a interação do organismo com a substância. Quando ingeridos, esses pequenos fragmentos sobrevivem ao processo digestivo, cruzam a barreira intestinal com facilidade e alcançam a corrente sanguínea. Transportados pelo sangue, são entregues nas camadas mais profundas da derme, atuando exatamente no epicentro do dano ambiental onde os cremes não chegam. No interior do tecido cutâneo, a atuação do colágeno hidrolisado transcende o mero fornecimento de blocos de construção para remendar a matriz rompida. Como evidenciado pela ciência, esses peptídeos funcionam como ágeis mensageiros celulares. Ao chegarem às células agredidas pelo exossoma, ativam vias de sinalização essenciais que estimulam o corpo a fabricar novas fibras de colágeno, ao mesmo tempo em que paralisam os comandos biológicos das enzimas destruidoras.

Portanto, enquanto a via tópica oferece um conforto superficial temporário, a ingestão do colágeno hidrolisado promove uma reconstrução autêntica de dentro para fora, restabelecendo a arquitetura da juventude e preparando o terreno para que outros compostos, como os potentes antioxidantes, possam blindar essa matriz regenerada.

4. Aminoácidos Mensageiros: A Sinalização Celular para a Reconstrução

Uma vez que os peptídeos bioativos do colágeno hidrolisado superaram as barreiras da digestão e alcançam a derme profunda, a intuição biológica básica levar-nos-ia a crer que eles funcionam apenas como matéria-prima de reposição. Historicamente, imaginava-se que esses fragmentos servissem unicamente como "tijolos" passivos, prontos para serem encaixados nas lacunas da matriz extracelular deixadas pela fúria da radiação ultravioleta.

Contudo, a vanguarda da bioquímica revela uma realidade muito mais complexa e fascinante: esses pequenos agrupamentos de aminoácidos atuam como verdadeiros "chefes de obra" do tecido cutâneo. Longe de serem passivos, os peptídeos de colágeno são reconhecidos pelas células humanas como potentes moléculas sinalizadoras, dotadas da capacidade intrínseca de ditar o ritmo metabólico e orquestrar ativamente a reconstrução da pele agredida.

O local onde essa magia bioquímica acontece é ao redor dos fibroblastos, que são as células operárias responsáveis por fabricar e manter a matriz de sustentação. Quando a pele sofre intensamente com o fotoenvelhecimento causado pelo expossoma, os fibroblastos entram em colapso e reduzem a sua produção de fibras. Ao entrarem em contato com a superfície dessas células, os aminoácidos mensageiros provenientes do colágeno ingerido ativam comandos biológicos primordiais, destacando-se uma rota metabólica conhecida como via TGF- β (Fator de Crescimento Transformante beta).

Em termos didáticos, o acionamento dessa via funciona como uma ordem expressa para que os fibroblastos despertem e retomem o trabalho em força total, acelerando a biossíntese de novas fitas de colágeno virgem e reerguendo o andaime estrutural que havia sido perdido. Mas a atuação magistral desses "chefes de obra" não se limita a estimular a nova produção; eles também desempenham um papel vital na contenção dos danos simultâneos. Como visto anteriormente, as Metaloproteinases de Matriz (MMPs) atuam como "tesouras biológicas" cortando o colágeno durante o estresse oxidativo. Os peptídeos bioativos conseguem interceptar e bloquear a via celular MAPK, que é exatamente o alarme biológico de estresse responsável por ordenar a fabricação descontrolada dessas tesouras. Ao silenciar esse alarme interno, a degradação contínua da matriz é imediatamente freada.

Essa impressionante capacidade de coordenação celular torna-se ainda mais formidável quando a ciência observa a sinergia entre diferentes moléculas estruturais. Os aminoácidos do colágeno não precisam trabalhar sozinhos na reconstrução. Estudos experimentais demonstram que, quando esses peptídeos sinalizadores atuam em conjunto com peptídeos extraídos da elastina e com o ácido hialurônico, ocorre um efeito cooperativo e anabólico que amplifica imensamente a regeneração. Essa equipe multidisciplinar não só restaura a firmeza das redes proteicas, mas também deflagra um aumento expressivo na capacidade de retenção hídrica do corpo, devolvendo a hidratação profunda e a flexibilidade biomecânica ao tecido lesado. Dessa forma, o organismo não apenas recebe o material necessário, mas é ativamente instruído a se curar e a repor as suas perdas estruturais.

5. A Blindagem Perfeita: Interações entre Colágeno e Antioxidantes

A reconstrução da matriz extracelular orquestrada pelos aminoácidos mensageiros, por mais espetacular que seja, enfrenta um obstáculo implacável: o ambiente externo não cessa os seus ataques. Fabricar novas fibras de colágeno em um tecido que continua sendo diariamente bombardeado pela radiação ultravioleta é como tentar erguer um castelo de areia diante da maré alta. É exatamente neste ponto crítico de vulnerabilidade que o conceito de "proteção" materializa-se através da formidável ação das moléculas antioxidantes.

A primeira linha dessa blindagem tecidual é erguida de forma surpreendente pelos próprios peptídeos de colágeno ingeridos. A literatura científica demonstra que esses pequenos fragmentos proteicos não operam apenas sinalizando a produção de novas fibras, mas também abrigam uma valiosa capacidade antioxidante intrínseca. Devido à sua composição bioquímica, esses peptídeos atuam na "limpeza" do microambiente celular, sacrificando os seus elétrons para neutralizar as destrutivas Espécies Reativas de Oxigênio (EROs) antes que elas atinjam a matriz recém-formada. Além dessa barreira primária direta, a presença contínua de peptídeos bioativos estimula ativamente as células da pele a aumentarem a produção de suas próprias

enzimas de defesa natural, a exemplo da Superóxido Dismutase (SOD) e da Glutathiona Peroxidase (GSH-Px).

Contudo, para que a blindagem da pele alcance a sua máxima eficiência estrutural contra a fúria da radiação, a biologia lança mão de uma estratégia de defesa suprema: a interação sinérgica entre as matrizes de proteína e os potentes antioxidantes de origem vegetal exógena, destacando-se o grupo dos polifenóis. Quando essas duas classes de moléculas se encontram, ocorre uma interligação bioquímica altamente sofisticada. Através do estabelecimento de ligações químicas robustas e conexões flexíveis, os peptídeos de colágeno e os polifenóis fundem-se intimamente para criar complexos bioconjugados extremamente estáveis.

De forma didática, é como se os antioxidantes envolvessem cada fita de colágeno recém-fabricada com uma impenetrável armadura química. Essa interação molecular não apenas amplifica brutalmente a capacidade total de supressão dos radicais livres, silenciando o estresse oxidativo e a inflamação em sua origem primária, mas também aumenta de forma substancial a estabilidade térmica e mecânica da própria proteína subjacente.

O resultado prático dessa admirável aliança molecular é a consagração definitiva da verdadeira "Bioquímica da Proteção". A rede de colágeno da pele torna-se incrivelmente resistente à degradação precoce e ao desmembramento enzimático. Enquanto os blocos estruturais de aminoácidos garantem a firmeza, os complexos antioxidantes atuam como sentinelas incansáveis, interceptando o dano contínuo e preservando intactas as delicadas vias de sinalização que mantêm o tecido operante.

6. Conclusão

A preservação da verdadeira juventude biológica vai muito além da aparência estética; trata-se de uma batalha silenciosa e diária do nosso corpo contra o ambiente e, principalmente, contra os danos causados pela radiação solar. Esses fatores externos atacam de forma implacável a fundação da nossa pele, tentando derrubar a sua estrutura de sustentação.

Para combater esse desgaste e reerguer o que foi perdido, o colágeno ingerido entra em cena com um papel duplo e fascinante. Ele não entrega apenas os "tijolos" necessários para devolver a firmeza e a elasticidade ao tecido, mas seus pequenos fragmentos — os aminoácidos — funcionam como verdadeiros mensageiros celulares. Eles atuam como chefes de obra, acordando as células para fabricarem novas fibras e, ao mesmo tempo, impedindo que as "tesouras biológicas" continuem a destruir a pele.

Contudo, erguer um novo e reluzente edifício de nada adianta se ele continuar desprotegido contra as agressões do dia a dia. É nesse momento decisivo que entram os antioxidantes, formando a linha de frente da nossa defesa. Seja usando a capacidade natural de limpeza do próprio colágeno ingerido, seja unindo-se aos potentes antioxidantes encontrados nas plantas, essas moléculas criam um escudo inteligente. Elas neutralizam a ameaça dos radicais livres antes que eles consigam quebrar as fibras recém-formadas.

Portanto, a essência da "Bioquímica da Juventude e da Proteção" reside exatamente nesta união imbatível: a força estrutural do colágeno, a inteligência reconstrutora dos aminoácidos e a blindagem constante dos antioxidantes. Trabalhando juntos em perfeita harmonia, eles dão ao corpo a capacidade não apenas de se consertar de dentro para fora, mas de resistir bravamente ao desgaste do tempo.

7. Referências

AGUIRRE-CRUZ, G.; LEÓN-LÓPEZ, A.; CRUZ-GÓMEZ, V.; JIMÉNEZ-ALVARADO, R.; AGUIRRE-ÁLVAREZ, G. Collagen Hydrolysates for Skin Protection: Oral Administration and Topical Formulation. **Antioxidants**, v. 9, n. 2, p. 181, 2020.

FENG, Y.; JIN, C.; LV, S.; ZHANG, H.; REN, F.; WANG, J. Molecular Mechanisms and Applications of Polyphenol-Protein Complexes with Antioxidant Properties: A Review. **Antioxidants**, v. 12, n. 8, p. 1577, 2023.

FU, Y.; LI, C.; WANG, Q.; GAO, R.; CAI, X.; WANG, S.; ZHANG, Y. The protective effect of collagen peptides from bigeye tuna (*Thunnus obesus*) skin and bone to attenuate UVB-induced photoaging via MAPK and TGF- β signaling pathways. **Journal of Functional Foods**, v. 93, p. 105101, 2022.

LIU, J.; ZHAO, L.; XING, X.; ZHANG, Y.; JI, B.; ZHOU, F. The effects and mechanism of collagen peptide and elastin peptide on photoaging of skin cells induced by ultraviolet radiation. **Food Bioscience**, v. 68, p. 106405, 2025.

QIU, Y.-T.; WANG, Y.-M.; YANG, X.-R.; ZHAO, Y.-Q.; CHI, C.-F.; WANG, B. Gelatin and Antioxidant Peptides from Gelatin Hydrolysate of Skipjack Tuna (*Katsuwonus pelamis*) Scales: Preparation, Identification and Activity Evaluation. **Marine Drugs**, v. 17, n. 10, p. 565, 2019.

ŠIMEK, M.; ŠÍNOVÁ, R.; BERKA, V.; LEHKÁ, K.; NEŠPOROVÁ, K.; DOLEČKOVÁ, I.; BAJEROVÁ, M.; PAVLÍK, V.; KUBALA, L. Alleviating UV-induced photoaging with oral hyaluronic acid: insights from a hairless mouse model. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 321, p. 146340, 2025.

WANG, W.; ZHAO, Y.; HE, L.; SONG, Z.; SHI, C.; JIA, P.; YU, Q.; HAN, L. Cowhide gelatin peptide as a source of antioxidants for inhibiting the deterioration of pudding quality during storage. **Food Chemistry: X**, v. 22, p. 101327, 2024.

ZHANG, K.; HUANG, J.; WANG, D.; WAN, X.; WANG, Y. Covalent polyphenols-proteins interactions in food processing: formation mechanisms, quantification methods, bioactive effects, and applications. **Frontiers in Nutrition**, v. 11, p. 1371401, 2024.

ZHANG, Y.; HUANG, G.; ZHANG, Z.; XU, Y.; REN, J.; SUN, W.; CHEN, J.; HE, R. Protective effects of a novel FS-Collagen hydrolysates against UV- and D-galactose-induced skin aging. **Food Science and Biotechnology**, v. 34, p. 257-267, 2024.

ZHU, W.; REN, H.; LIU, Y.; LI, Z.; LUO, X.; MENG, H.; DONG, Y. Key targets and pathways in skin photoaging: a comprehensive review. **Journal of Dermatologic Science and Cosmetic Technology**, v. 2, p. 100101, 2025.

Autores

Milena Kazue Enokida

Programa de Pós graduação em Bioquímica, Universidade Estadual de Maringá

CAPÍTULO 13

RNA: Para além de uma molécula a serviço do DNA

Rafaela Marcondes Hasse

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c13>

Resumo

Neste capítulo, irei discutir sobre o RNA, para além de uma molécula a serviço do DNA, abordando falhas comuns na forma tradicional de ensinar biologia molecular. Embora o DNA seja quimicamente mais estável e ideal para o armazenamento da informação genética, o RNA é uma molécula dinâmica, flexível e funcionalmente versátil. Suas propriedades químicas permitem a formação de estruturas secundárias e terciárias complexas, a catálise de reações químicas (ribozimas) e a participação direta em processos centrais da célula, como a síntese de proteínas, a regulação gênica e a transdução de sinais. A teoria do mundo de RNA reforça essa centralidade, sugerindo que o RNA precedeu tanto o DNA quanto as proteínas na evolução e que muitos dos seus papéis atuais são resquícios desse passado ancestral. Em conjunto, os argumentos apresentados reposicionam o RNA como o verdadeiro protagonista da biologia molecular: não um subordinado do DNA, mas o motor adaptativo, regulatório e inovador que sustenta a complexidade da vida.

Palavras-chave: ácidos nucleicos; mundo de RNAs; ncRNAs.

Abstract

In this chapter, I will discuss RNA beyond its role as a molecule serving DNA, addressing common flaws in the traditional teaching of molecular biology. While DNA is chemically more stable and ideal for storing genetic information, RNA is a dynamic, flexible, and functionally versatile molecule. Its chemical properties allow for the formation of complex secondary and tertiary structures, the catalysis of chemical reactions (ribozymes), and direct participation in central cellular processes such as protein synthesis, gene regulation, and signal transduction. The RNA world theory reinforces this centrality, suggesting that RNA preceded both DNA and proteins in evolution and that many of its current roles are remnants of this ancestral past. Taken together, the arguments presented reposition RNA as the true protagonist of molecular biology: not a subordinate of DNA, but the adaptive, regulatory, and innovative engine that sustains the complexity of life.

Keywords: nucleic acids; RNA world; ncRNAs.

1. Introdução

Quando procuramos informações, muitas vezes até formais e acadêmicas sobre a definição de DNA e RNA, encontramos coincidências: são polímeros de nucleotídeos e são ácidos, o ácido ribonucleico (ARN, ou RNA, do inglês, ribonucleic acid) e o ácido desoxirribonucleico (ADN, ou DNA, do inglês, deoxyribonucleic acid), mas se definem por suas diferenças, o DNA armazena as informações genéticas e o RNA atua na produção de proteínas. Mas sabemos sobre a existência de retrovírus, que usam RNA para armazenar a informação genética, além de que nem todo RNA atua na produção de proteínas, como os microRNAs, que ficaram famosos em 2024 por seu importante papel no câncer agindo como "interruptores" que controlam a produção de proteínas ao se ligar ao RNA mensageiro (mRNA) e até foram objeto do Prêmio Nobel de Fisiologia ou Medicina naquele ano, então vemos que essa definição é bem rasa.

O RNA é mais conhecido por sua função em transportar instruções de codificação de proteínas do DNA, muitas vezes considerado a molécula mestra da célula, para as fábricas de montagem da célula (os ribossomos, que ao longo do capítulo vamos ver que eles também são formados por RNA ribossômico). Mas essa percepção, de que o RNA está a serviço e submissão ao DNA, é falha em vários sentidos e vai se tornar evidente neste capítulo.

Pessoalmente, uma das coisas curiosas sobre a biologia é que, com o passar do tempo e conforme essa ciência foi se desenvolvendo, o DNA em si se tornou menos interessante, enquanto o RNA e a regulação da expressão gênica se tornaram mais importantes e complexos. Se alguns acham que o RNA está a serviço do DNA, aqui vamos ver o DNA como uma ferramenta para o RNA o controlar.

Antes de entrar na diferença química de cada ácido nucleico, e eu te dizer que a pentose do RNA é uma ribose e do DNA é uma desoxirribose, vamos entender um pouquinho mais sobre os nucleotídeos em si.

2. Nucleotídeos

Vimos que ácidos nucleicos são polímeros de nucleotídeos, ou seja, são formados por várias partes pequenas que chamamos de nucleotídeos, mas o

que exatamente é esse tal de nucleotídeo? E o que os diferenciam e quais as suas semelhanças entre o DNA e o RNA? Vamos ainda ver outros papéis que os nucleotídeos podem desempenhar.

Nucleotídeos, as subunidades dos ácidos nucleicos, são formados de 3 componentes, um grupo fosfato, um monossacarídeo do tipo pentose e uma base nitrogenada^{1,2}. Esses 3 componentes então, se ligam covalentemente e formam as unidades fundamentais que dão origem aos ácidos nucleicos, dessa forma, tanto o DNA como o RNA são polímeros formados por milhares de nucleotídeos.

Os nucleotídeos não atuam apenas como “matéria-prima” para a síntese de ácidos nucleicos, mas também exercem funções essenciais no metabolismo celular. A adição de grupos fosfato por ligações de anidrido ao fosfato inicial origina nucleotídeos di- e trifosfatados, sendo as formas 5' trifosfatadas particularmente relevantes por constituírem os precursores diretos da síntese de RNA e DNA. Além disso, os ribonucleotídeos podem desempenhar outras funções celulares, podendo atuar como “moedas de energia” (ATP), participar da síntese proteica (GTP), da síntese de lipídios (CTP) e do metabolismo de carboidratos (UTP). Os ribonucleotídeos monofosfatados também integram coenzimas derivadas de vitaminas hidrossolúveis do complexo B, sendo fundamentais para a atividade enzimática e para processos de transdução de sinal³.

3. Pentoses diferentes

Uma melhor definição química de DNA e RNA é que a pentose (açúcar de 5 carbonos) da molécula de DNA é uma desoxirribose, enquanto no RNA é uma ribose⁴. Evolutivamente isso aconteceu garantindo que o DNA virasse uma molécula mais estável⁵.

A diferença estrutural entre a ribose e a desoxirribose, ambas aldopentoses (açúcares de 5 carbonos com um grupo funcional aldeído), está no carbono 2, no caso da desoxirribose, um hidrogênio substitui a hidroxila encontrada no mesmo carbono 2 na ribose. Lembrando que a numeração dos carbonos inicia no carbono com a função aldeído.

Os grupos hidroxila (OH) que diferenciam o RNA do DNA são altamente reativos. Essa reatividade confere ao RNA sua capacidade de interação e mobilização pela célula por meio de proteínas e outras moléculas. Essa propriedade é vantajosa para o desempenho de múltiplas funções biológicas; contudo, ela tem um custo: o grupo OH torna o RNA quimicamente instável, até reagindo dentro da própria molécula, e se quebrando em dois.

A auto-hidrólise de RNA é a quebra espontânea da molécula de RNA, facilitada pelo grupo hidroxila (OH) no carbono 2' da ribose, que ataca o fosfato, especialmente em condições alcalinas ou na presença de íons metálicos⁶, tornando o RNA mais reativo e instável que o DNA. A clivagem ocorre com maior frequência em fitas simples e envolve, como intermediário, a formação de ligações fosfodiéster cíclicas, que precedem a quebra final da molécula.

4. Diferenças estruturais: simples fita e dupla fita

Outra forma rasa de definir a diferença entre o RNA e o DNA é por sua estrutura, dizendo que o DNA é dupla fita, mais complexo e o RNA sempre se encontra simples fita. Vamos ver porque isso está errado, e que a realidade é que a diversidade e complexidade estrutural do RNA vem exatamente da diferença essencial entre eles, isso porque o RNA tem maior liberdade conformacional.

O DNA apresenta tipicamente a estrutura de dupla hélice, formada por duas fitas antiparalelas que se enrolam em torno de um eixo, criando um sulco maior e um sulco menor ao longo da molécula⁷. Esses sulcos são sítios importantes de interação com proteínas, polipeptídeos e fármacos, influenciando a regulação da expressão gênica. Em pH fisiológico, o esqueleto açúcar-fosfato do DNA é negativamente carregado, o que favorece a associação com íons positivos, como Mg^{2+} , e com proteínas. A conformação mais comum do DNA na natureza é a forma B (DNA-B), embora variações estruturais possam ocorrer em função da sequência de bases e das condições do meio, como a concentração salina e os íons associados.

O RNA também pode formar estrutura secundária, o que acontece quando a própria cadeia se dobra sobre si mesma. Nessas dobras, algumas

partes conseguem se parear por meio de ligações de hidrogênio entre bases complementares. Em outros trechos, esse pareamento não acontece (muitas vezes por causa de bases nitrogenadas modificadas) e o RNA segue como fita simples. Esse tipo de organização é bem comum e típico do RNA transportador (tRNA). O RNA ribossômico (rRNA) funciona de forma parecida: mesmo sendo uma única fita, ele se dobra e forma regiões de fita dupla intercaladas com regiões de fita simples, tudo como resultado desse dobramento interno.

Mas a estrutura do DNA e do RNA não para por aí, também temos uma organização a nível terciário. Para entender isso, dá para usar uma analogia simples: imagine a cadeia polinucleotídica como o fio de um telefone antigo, em forma de espiral. Se as duas pontas deste fio começarem a ser torcidas ao mesmo tempo, a espiral vai se enrolar ainda mais, ficando mais compacta. Esse tipo de organização mais compacta é o que chamamos de estrutura terciária.

E para além de uma estrutura, uma função, o RNA quebra todas as barreiras e expectativas tradicionais da biologia molecular. O RNA é um dançarino: muda de forma, se adapta e assume funções diferentes conforme o contexto⁸. Muitas vezes, a forma como pensamos a estrutura do RNA é emprestada, de maneira errônea, da nossa visão sobre o DNA e proteínas. As proteínas costumam ter estruturas mais rígidas, bem definidas, e cada uma geralmente está ligada a uma função específica. Com o RNA, a lógica é outra.

O RNA é flexível, dinâmico e multifuncional. Tratar suas estruturas como algo fixo, do mesmo jeito que fazemos com proteínas, pode ser enganoso. Ele não é apenas um esqueleto esperando para ser resolvido em três dimensões, mas uma molécula viva em constante mudança, cuja importância biológica vem justamente da sua capacidade de se adaptar ao ambiente celular.

A biologia molecular precisa ajustar a sua forma de pensar para refletir essa realidade. A função do RNA não nasce de formas rígidas, mas de estruturas flexíveis, moldadas pela evolução para responder a diferentes necessidades. O RNA não é só um coadjuvante do dogma central, ele é o protagonista. Para entender de verdade o papel do RNA na complexidade da vida, é preciso abandonar comparações forçadas com proteínas e com o DNA e abraçar sua fluidez, reconhecendo que é essa capacidade de adaptação que dá ao RNA seu poder extraordinário.

5. Bases nitrogenadas diferentes

Outro equívoco comum é resumir a diferença entre DNA e RNA dizendo apenas que o RNA tem uracila no lugar da timina. Isso até é verdade, mas a história é bem mais complexa do que isso. Para começar, os nucleotídeos se ligam entre si por meio da ligação fosfodiéster, que acontece quando a hidroxila na posição 5' de um nucleotídeo se liga ao grupo fosfato na posição 3' do próximo. Essa ligação forma a “espinha” da molécula, deixando as bases nitrogenadas livres para interagir com outras bases.

Essas interações seguem regras até que bem definidas: a adenina de uma cadeia se liga à timina (ou à uracila, no caso do RNA) da outra por meio de duas ligações de hidrogênio, enquanto a citosina se liga à guanina por três ligações de hidrogênio. São justamente esses pares de bases tradicionais (Watson-Crick) que carregam e “escrevem” a informação genética.

Há um tipo de emparelhamento de bases de RNA que não segue as regras estritas de Watson-Crick, ocorrendo principalmente na terceira posição do códon no RNA mensageiro (mRNA) e a primeira posição do anticódon no RNA transportador (tRNA). Essa flexibilidade permite que um único tRNA reconheça múltiplos códons, reduzindo o número de tRNAs necessários e tornando a tradução mais eficiente, com pares comuns como Guanina-Uracila (G-U), Inosina-Uracila (I-U), Inosina-Adenina (I-A) e Inosina-Citosina (I-C). Esse pareamento menos rigoroso (conhecido como *wobble*) confere complexidade adicional à estrutura e função do RNA.

As bases também explicam outra diferença estrutural importante entre DNA e RNA. Entre as pirimidinas, a citosina aparece nos dois, mas a uracila é exclusiva do RNA, enquanto o DNA usa timina no seu lugar. Em casos raros, no entanto, a timina pode aparecer em alguns tipos de RNA. Além das cinco bases “clássicas”, existem ainda bases modificadas, como a 5-metilcitosina. Essas modificações são especialmente comuns no RNA transportador (tRNA) e ajudam a ajustar sua estrutura e função, mostrando que, mesmo no nível das bases, o RNA é muito mais versátil e complexo do que parece.

6. Um armazena e o outro só copia?

Em todas as células que conhecemos, a informação genética está armazenada permanentemente no DNA. Com os vírus, isso pode ser diferente. Os vírus não são seres vivos no sentido clássico, porque dependem sempre de uma célula hospedeira para sua reprodução. No entanto, os vírus também possuem material genético, armazenado na forma de ácidos nucleicos, necessários para sua reprodução na célula hospedeira. Curiosamente, a maioria dos vírus utiliza RNA para armazenar suas informações no genoma, esses vírus são chamados de vírus de RNA, e em muitos casos esse RNA é em dupla fita para conferir estabilidade pro RNA⁹. Doenças como gripe, sarampo, hepatite C, Ebola, raiva e poliomielite são causadas e transmitidas com RNA como material hereditário.

6. RNA como um biocatalisador

O RNA é capaz de catalisar reações químicas (sim! Não só as proteínas), uma descoberta feita no início da década de 1980 que representou uma mudança de paradigma na biologia celular^{10–13}. Até então, acreditava-se que apenas as enzimas poderiam desempenhar funções catalíticas. Os RNAs com atividade catalítica passaram a ser chamados de ribozimas, termo que resulta da junção de ácido ribonucleico e enzima. Desde então, diversas ribozimas foram identificadas, e sabemos que muitos processos celulares essenciais dependem delas para ocorrer. Um exemplo clássico é o ribossomo, um complexo formado por proteínas e RNA ribossômico (rRNA), no qual os rRNAs são os principais responsáveis pela atividade catalítica.

7. DNA lixo

Por muito tempo, grande parte do nosso DNA foi chamada de DNA lixo, como se fosse algo inútil acumulado ao longo da evolução. Mas essa ideia começou a ruir quando os cientistas perceberam algo curioso: uma minhoca e um ser humano têm, mais ou menos, o mesmo número de genes codificadores de proteínas, cerca de 20 mil. Se o número de genes fosse sinônimo de complexidade, o que exatamente nos tornaria mais complexos que uma

minhoca? A resposta não está apenas nos genes em si, mas em tudo o que existe entre eles.

Embora o número de genes seja parecido, a quantidade total de DNA é muito diferente. O genoma humano é cerca de 33 vezes maior que o de uma minhoca, e hoje sabemos que aproximadamente 98% do DNA humano não codifica proteínas. Ou seja, só cerca de 2% do nosso genoma guarda instruções diretas para fabricar proteínas. Isso levanta uma pergunta inevitável: por que a natureza manteria e copiaria, geração após geração, uma quantidade tão enorme de DNA aparentemente “inútil”, se isso dá tanto trabalho para a célula?

Quanto mais complexo o organismo, maior tende a ser a proporção de DNA não codificante em seu genoma, de leveduras simples até mamíferos. Grande parte desse DNA é, sim, transcrita, mas em RNAs que não viram proteínas, os chamados RNAs não codificantes (ncRNAs).

Esses ncRNAs formam um universo extremamente diverso. Alguns são curtíssimos, com apenas alguns nucleotídeos; outros têm milhares. Podem existir como fita simples, dupla ou em estruturas altamente complexas. Alguns ficam no núcleo, outros vão para o citoplasma ou até para organelas específicas. Exemplos clássicos são os rRNAs e tRNAs, essenciais para a síntese de proteínas. Há também os microRNAs, com cerca de 20 nucleotídeos, que têm um papel crucial no controle da regulação gênica.

Nos últimos anos, a pesquisa revelou ainda os ncRNAs longos (lncRNAs), uma classe enorme e ainda pouco compreendida. Embora a função da maioria deles continue sendo um mistério, já existem evidências de que alguns estão envolvidos em processos fundamentais, como o desenvolvimento embrionário, inativação do cromossomo X e o surgimento do câncer. Por isso, o antigo “DNA lixo” é na verdade a matéria escura do genoma: algo que não entendemos completamente, mas que claramente exerce uma influência profunda sobre como a vida funciona.

8. RNAs não codificantes

Os RNAs não codificantes (ncRNAs) são um ótimo exemplo de como o RNA vai muito além de servir apenas como intermediário entre DNA e proteína.

Esses RNAs não viram proteínas, mas regulam, organizam e controlam o funcionamento da célula de várias formas diferentes. Um dos mecanismos mais impressionantes envolvendo ncRNAs é o RNA de interferência (RNAi).

O RNAi funciona como um sistema de silenciamento gênico super eficiente. O coração desse processo é um complexo proteico chamado RISC (complexo de silenciamento induzido por RNA). Esse complexo se liga a uma das fitas de um RNA pequeno de fita dupla e usa essa fita como “guia” para sair procurando o mRNA correspondente dentro da célula, que ele seja complementar e se encaixe ao parear suas bases. Quando encontra o alvo, o RISC se encaixa no mRNA e começa a degradá-lo. Resultado: o mRNA é destruído e aquela proteína deixa de ser produzida. O mais incrível é que, depois disso, o complexo fica livre para repetir o processo com outras moléculas de mRNA. Ou seja, poucas moléculas de RNA de fita dupla conseguem eliminar muitas moléculas de mRNA, é um mecanismo altamente eficiente.

Justamente por isso, o RNAi chamou tanta atenção da ciência. Muitas doenças estão associadas à produção excessiva ou desregulada de determinadas proteínas, e o RNAi oferece uma forma de reduzir essa produção. Além disso, desde sua descoberta, o RNAi virou uma ferramenta poderosa para entender a função dos genes. Com o sequenciamento do genoma humano, descobrimos milhares de genes, mas saber o que eles fazem é outra história. Ao introduzir pequenos RNAs interferentes (siRNAs) que silenciam genes específicos, os cientistas conseguem observar o que acontece quando uma proteína “some” da célula, ajudando a desvendar a sua função.

Esse potencial todo abriu caminho não só para a pesquisa básica, mas também para aplicações médicas. Um exemplo real é o Spinraza®, um medicamento baseado em RNA aprovado para tratar um tipo raro de atrofia muscular espinhal.

No fim, o RNAi deixa claro que os RNAs não codificantes não são coadjuvantes silenciosos. Eles fazem parte de um sistema fino de controle, capaz de desligar genes, modular proteínas e até inspirar novas terapias. Mais uma prova de que, quando se trata de RNA, o poder está justamente em não virar proteína.

9. Mundo de RNA

Para entender como as células funcionam hoje, a gente precisa olhar para trás, para a história evolutiva da vida. Um dos maiores enigmas é justamente como surgiu a expressão da informação genética. Atualmente, esse processo é extremamente complexo: a informação sai do DNA, passa pelo RNA e vira proteína. Mas como toda essa engrenagem apareceu?

Uma das hipóteses mais aceitas é a teoria do mundo de RNA. Segundo essa teoria, antes das células modernas existirem, houve um período em que o RNA fazia tudo sozinho¹⁴. Ele armazenava a informação genética e catalisava reações químicas, funções que hoje são divididas entre DNA e proteínas. Só mais tarde, ao longo da evolução, o DNA assumiu o papel principal de armazenamento da informação, enquanto as proteínas se tornaram os grandes catalisadores e componentes estruturais da célula.

Essa transição nunca foi completa, o RNA não desapareceu, ele ficou. E ficou fazendo coisas fundamentais. Muitas das reações catalisadas por RNA nas células modernas podem ser vistas como verdadeiros “fósseis moleculares” desse mundo antigo, lembranças de uma época em que o RNA era o protagonista absoluto. Em outras palavras, houve um tempo em que o RNA desempenhava todas as funções: aquilo que hoje associamos ao DNA, às proteínas e tudo o que existe entre eles. Pensando assim, faz todo sentido que hoje encontremos RNAs com funções extremamente diversas, espalhados por toda a célula.

O DNA é a semente, uma forma estável de armazenamento, enquanto o RNA é a planta, que executa, regula e responde ao ambiente. E isso tem uma explicação química bem direta. O DNA dupla fita é muito estável, sendo perfeito para guardar e copiar informação genética, ele não tem o grupo hidroxila livre na posição 2', o que o torna resistente à hidrólise. Já o RNA, com esse grupo OH livre, é mais reativo e flexível, isso permite que ele se dobre em estruturas incrivelmente variadas e até catalíticas, como tRNAs, rRNAs e ribozimas. Enquanto isso, o DNA basicamente limita-se a enrolar-se em histonas e permanecer estável armazenando informação.

Essa visão também muda um pouco a forma como pensamos sobre os retrovírus de RNA e até sobre o próprio papel do RNA no dogma central. Afinal, se olharmos apenas para a lógica atual, parece estranho existir uma etapa intermediária tão complexa entre DNA e proteína. Se algo fosse realmente supérfluo, a evolução já teria eliminado. O fato de o RNA estar ali, acompanhado de tantas proteínas e mecanismos específicos, sugere que ele não é um “desvio”, mas um remanescente essencial de um sistema mais antigo.

Talvez por isso, conforme a gente se aprofunda em genética, o DNA em si vá ficando menos misterioso, enquanto o RNA e a regulação gênica se tornam cada vez mais intrigantes. O RNA deixa de ser apenas um intermediário e passa a aparecer como aquilo que ele talvez sempre tenha sido: uma molécula central para a inovação e a complexidade da vida.

10. Conclusão

No fim das contas, a ideia de que o DNA é o “chefe” e o RNA apenas o funcionário que trabalha em escala 6×1 não se sustenta. Se formos levar a analogia adiante, o DNA nem chega a ser o empresário: ele é mais o filho do dono, sentado na cadeira de CEO por nepotismo, posando para a foto e guardando informação, mas sem entender muito bem como a empresa realmente funciona. Quem toca o dia a dia, resolve os problemas, se adapta às mudanças e faz tudo acontecer é o RNA. A própria história evolutiva mostra isso: foi o RNA que veio primeiro, acumulando funções catalíticas, estruturais e regulatórias, e foi ele quem “colocou” o DNA nesse cargo mais estável e conservador. Assim, se muita gente ainda pensa que o RNA está a serviço do DNA, o que vimos aqui aponta para o contrário: o DNA é, em grande parte, uma ferramenta criada para proteger, organizar e regular a atuação do RNA, o verdadeiro motor dinâmico da biologia.

11. Referências

1. Rudolph, F. B. The Biochemistry and Physiology of Nucleotides. The Journal of Nutrition 124, 124S-127S (1994).

2. Saenger, W. Structure and Function of Nucleosides and Nucleotides. *Angewandte Chemie International Edition in English* 12, 591–601 (1973).
3. Carver, J. D. & Allan Walker, W. The role of nucleotides in human nutrition. *The Journal of Nutritional Biochemistry* 6, 58–72 (1995).
4. Bagatell, F. K., Wright, E. M. & Sable, H. Z. Biosynthesis of Ribose and Deoxyribose in *Escherichia coli*. *Journal of Biological Chemistry* 234, 1369–1374 (1959).
5. Follmann, H. Deoxyribonucleotide synthesis and the emergence of DNA in molecular evolution. *Naturwissenschaften* 69, 75–81 (1982).
6. Emilsson, G. M., Nakamura, S., Roth, A. & Breaker, R. R. Ribozyme speed limits. *RNA* 9, 907–918 (2003).
7. Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid | *Nature*. <https://www.nature.com/articles/171737a0>.
8. Major, F. RNA is a dancer: beyond the one-structure one-function paradigm. *Biochem (Lond)* 47, 13–17 (2025).
9. Levy, J. A. *The Retroviridae*. (Springer Science & Business Media, 2013).
10. Cech, T. R., Zaug, A. J. & Grabowski, P. J. In vitro splicing of the ribosomal RNA precursor of *Tetrahymena*: involvement of a guanosine nucleotide in the excision of the intervening sequence. *Cell* 27, 487–496 (1981).
11. Guerrier-Takada, C. & Altman, S. Catalytic activity of an RNA molecule prepared by transcription in vitro. *Science* 223, 285–286 (1984).
12. Kruger, K. et al. Self-splicing RNA: autoexcision and autocyclization of the ribosomal RNA intervening sequence of *Tetrahymena*. *Cell* 31, 147–157 (1982).
13. Altman, S., Baer, M., Guerrier-Takada, C. & Vioque, A. Enzymatic cleavage of RNA by RNA. *Trends in Biochemical Sciences* 11, 515–518 (1986).
14. Alberts, B. et al. *The RNA World and the Origins of Life*. in *Molecular Biology of the Cell*. 4th edition (Garland Science, 2002).

Autores

Rafaela Marcondes Hasse

Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Maringá.

CAPÍTULO 14

Bioquímica dos Bioinsumos: Como os microrganismos transformam o solo

Rhuan Ribeiro dos Reis

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c14>

Resumo

Este capítulo aborda a importância da bioquímica dos bioinsumos na agricultura sustentável, destacando o papel central dos microrganismos na transformação e manutenção da saúde do solo. Explora-se como bactérias e fungos atuam na fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo, síntese de fitormônios e no controle biológico por meio de metabólitos antimicrobianos. O texto discute as aplicações práticas de inoculantes e biodefensivos (com destaque para os gêneros *Bradyrhizobium* e *Azospirillum*), além de analisar os benefícios agrônômicos e os principais entraves industriais, como a estabilidade de formulação (*shelf life*) e os riscos de contaminação em larga escala. Por fim, apresentam-se as perspectivas futuras, enfatizando a integração da engenharia genética e de sistemas de nanoentrega para a otimização dessas tecnologias biológicas.

Palavras-chave: Bioinsumos; Microbiologia do solo; Agricultura sustentável; Fixação biológica de nitrogênio; Inoculantes microbianos.

Abstract

This chapter addresses the importance of the biochemistry of bioinputs in sustainable agriculture, highlighting the central role of microorganisms in transforming and maintaining soil health. It explores how bacteria and fungi act in biological nitrogen fixation, phosphorus solubilization, phytohormone synthesis, and biological control through antimicrobial metabolites. The text discusses the practical applications of inoculants and biopesticides (with emphasis on the *Bradyrhizobium* and *Azospirillum* genera), as well as analyzing the agronomic benefits and major industrial hurdles, such as formulation stability (*shelf life*) and large-scale contamination risks. Finally, future perspectives are presented, emphasizing the integration of genetic engineering and nano-delivery systems to optimize these biological technologies.

Keywords: Bioinputs; Soil microbiology; Sustainable agriculture; Biological nitrogen fixation; Microbial inoculants.

A agricultura sustentável depende, de forma crescente, da compreensão e do manejo racional dos processos bioquímicos que ocorrem no solo. Longe de ser um substrato inerte, o solo é um sistema vivo, dinâmico e altamente complexo, no qual microrganismos desempenham papel central na transformação da matéria orgânica, na ciclagem de nutrientes e na regulação da disponibilidade de elementos essenciais às plantas. Esses processos bioquímicos sustentam a produtividade agrícola e, ao mesmo tempo, determinam a resiliência e a sustentabilidade dos agroecossistemas.

Microrganismos como bactérias, fungos e actinobactérias atuam como verdadeiros catalisadores biológicos, conduzindo reações químicas fundamentais por meio de enzimas altamente especializadas. A decomposição da matéria orgânica, a mineralização e imobilização de nutrientes, a fixação biológica do nitrogênio e a solubilização de fósforo são exemplos de processos bioquímicos mediados por comunidades microbianas do solo. Esses mecanismos controlam fluxos de carbono, nitrogênio, fósforo, enxofre e micronutrientes, conectando o metabolismo microbiano à nutrição vegetal e à fertilidade do solo.

No contexto da agricultura moderna, a intensificação do uso de fertilizantes e defensivos químicos alterou profundamente esses processos naturais, muitas vezes comprometendo a atividade microbiana e a qualidade do solo. Como consequência, observa-se a necessidade crescente de estratégias que restabeleçam e potencializem as funções bioquímicas do solo, reduzindo a dependência de insumos externos e promovendo sistemas produtivos mais equilibrados.

Nesse cenário, o estudo da bioquímica dos microrganismos do solo ganha destaque como base científica para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis. A compreensão de como microrganismos transformam compostos orgânicos e inorgânicos, produzem metabólitos bioativos e interagem quimicamente com as raízes das plantas permite não apenas explicar fenômenos agrônômicos observados no campo, mas também orientar o uso racional de tecnologias baseadas em processos biológicos.

Assim, este capítulo aborda a bioquímica na agricultura sustentável a partir da perspectiva dos microrganismos como agentes transformadores do

solo, explorando os mecanismos metabólicos e moleculares que sustentam a fertilidade, a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Ao integrar conhecimentos de bioquímica, microbiologia do solo e agricultura, busca-se evidenciar como os processos microscópicos são determinantes para os desafios macroscópicos da produção de alimentos no século XXI.

1. O que são bioinsumos, conceitos e definições

Os bioinsumos são um conjunto de produtos, processos ou tecnologias de origem biológica (vegetal, animal ou microbiana), incluindo aqueles produzidos por biotecnologia ou estruturalmente similares aos naturais, destinados a interferir positivamente no crescimento, no desenvolvimento e nas respostas fisiológicas de plantas, microrganismos e animais, além de interagirem com processos físico-químicos e biológicos no solo e nos sistemas de produção agropecuários. Essa definição é a base do conceito adotado no Programa Nacional de Bioinsumos no Brasil, e está alinhada à nova legislação que regulamenta esses produtos no contexto da agricultura sustentável.

Bioinsumos representam uma alternativa e um complemento aos insumos químicos convencionais porque, ao utilizar agentes biológicos ou seus derivados, promovem práticas agrícolas que valorizam processos naturais, reduzem impactos ambientais e fortalecem a sustentabilidade dos sistemas de produção.

Segundo a Embrapa, os bioinsumos e as tecnologias associadas englobam produtos desenvolvidos a partir de enzimas, extratos de plantas ou microrganismos, metabólitos secundários, feromônios e organismos vivos que podem ser direcionados tanto à nutrição e promoção do crescimento de plantas quanto ao controle biológico de pragas e doenças e à melhoria das propriedades físico-biológicas do solo.

Os principais exemplos de produtos utilizando os microrganismos como bioinsumos são os inoculantes e os biodefensivos:

2. Inoculantes

Os inoculantes são produtos formulados com microrganismos benéficos vivos, especialmente bactérias e fungos, que promovem crescimento vegetal e nutrição. Eles atuam por meio de mecanismos como fixação biológica de nitrogênio, solubilização de nutrientes e estímulo de crescimento radicular em plantas. No Brasil, o uso de inoculantes à base de microrganismos como *Bradyrhizobium* (em soja) e *Azospirillum* (em milho) é um exemplo clássico de bioinsumo que aumenta a eficiência de uso de nutrientes e reduz a necessidade de fertilizantes sintéticos.

Esses produtos não apenas contribuem para a nutrição das plantas, mas também favorecem o equilíbrio biológico do solo, melhorando propriedades físicas e microbiológicas do ambiente radicular, o que é essencial para sistemas agrícolas sustentáveis.

3. Biodefensivos (controle biológico)

Os biodefensivos constituem outra classe importante de bioinsumos que utilizam organismos vivos ou seus metabólitos para controlar pragas e doenças agrícolas de forma seletiva e de baixo impacto ambiental. Isso inclui agentes como bactérias, fungos, vírus e mecanismos biológicos (como feromônios) capazes de inibir populações de insetos-praga, nematoides, fungos fitopatogênicos e outros organismos nocivos, mantendo o equilíbrio ecológico dos ecossistemas.

Ao contrário dos defensivos químicos convencionais, os biodefensivos tendem a ser mais específicos, preservando organismos benéficos e polinizadores, o que reduz impactos negativos sobre a biodiversidade e a saúde humana.

4. Bioquímica e o mecanismo de ação dos bioinsumos

4.1. Fixação biológica de nitrogênio

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) é um dos mecanismos mais bem estudados e economicamente relevantes associados aos bioinsumos

microbianos. Nesse processo, bactérias diazotróficas convertem o nitrogênio atmosférico (N_2) (forma inacessível às plantas) em amônia (NH_3), que pode ser assimilada pelos vegetais.

Do ponto de vista bioquímico, a FBN é catalisada pelo complexo enzimático nitrogenase, altamente conservado e sensível ao oxigênio. Essa enzima utiliza grande quantidade de energia metabólica (ATP) e elétrons reduzidos para quebrar a ligação tripla do N_2 , uma das mais estáveis da natureza. A amônia formada é rapidamente incorporada ao metabolismo celular, sendo convertida em aminoácidos como glutamina e glutamato.

No Brasil, a associação simbiótica entre *Bradyrhizobium* e a soja representa um dos maiores exemplos de aplicação prática desse mecanismo, permitindo a redução significativa do uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos, conforme amplamente documentado pela Embrapa Soja.

4.2. Solubilização e mobilização de nutrientes

Outro mecanismo bioquímico central é a solubilização de nutrientes, especialmente do fósforo, elemento essencial, porém frequentemente presente no solo em formas insolúveis. Microrganismos solubilizadores produzem ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como ácido glucônico, cítrico e oxálico, que promovem a acidificação localizada do solo e a quelagem de cátions, tornando o fósforo disponível para absorção pelas plantas.

Além disso, enzimas como fosfatases hidrolisam compostos orgânicos fosfatados, liberando íons fosfato. Esses processos ampliam a eficiência do uso de nutrientes e contribuem para a redução da dependência de fertilizantes minerais, aspecto fundamental para a sustentabilidade agrícola.

Segundo a Embrapa, esse mecanismo é particularmente relevante em solos tropicais, como os brasileiros, caracterizados por alta fixação de fósforo.

4.3. Produção de fitormônios e modulação do crescimento vegetal

Diversos microrganismos promotores de crescimento vegetal são capazes de sintetizar fitormônios ou moléculas com atividade hormonal, como

auxinas (principalmente ácido indolacético, AIA), giberelinas e citocininas. Essas substâncias atuam diretamente na regulação do crescimento e desenvolvimento das plantas, influenciando processos como alongamento celular, formação de raízes laterais e diferenciação de tecidos.

Do ponto de vista bioquímico, a produção de auxinas microbianas geralmente está associada ao metabolismo do triptofano, aminoácido abundante em exsudatos radiculares. A presença desses compostos na rizosfera estabelece uma comunicação química entre planta e microrganismo, favorecendo o desenvolvimento do sistema radicular e aumentando a capacidade de absorção de água e nutrientes.

Pesquisas conduzidas por instituições como a USP e a UEM demonstram que essa modulação hormonal é um dos principais fatores associados ao aumento de produtividade observado com o uso de inoculantes à base de *Azospirillum*.

4.4. Metabólitos antimicrobianos e controle biológico

Microrganismos utilizados como biodefensivos produzem uma ampla variedade de metabólitos secundários, incluindo antibióticos naturais, lipopeptídeos, enzimas hidrolíticas (quitinases, glucanases) e toxinas específicas. Essas moléculas interferem em estruturas celulares de patógenos, como paredes celulares e membranas, ou em processos metabólicos essenciais, levando à inibição ou morte do organismo-alvo.

Fungos do gênero *Trichoderma* e bactérias do gênero *Bacillus* são exemplos amplamente estudados pela Embrapa, devido à sua capacidade de combinar antibiose, parasitismo e indução de resistência sistêmica em plantas, reforçando o sistema de defesa vegetal de forma bioquimicamente mediada.

4.5. Síntese do papel bioquímico dos microrganismos

Os mecanismos descritos demonstram que a eficácia dos bioinsumos está diretamente ligada à bioquímica microbiana e às interações moleculares na interface solo-planta-microrganismo. Ao explorar processos naturais altamente

regulados, os bioinsumos se inserem como soluções tecnológicas compatíveis com os princípios da agricultura sustentável, promovendo produtividade, eficiência no uso de recursos e equilíbrio ambiental.

5. Aplicações práticas no campo:

O avanço do conhecimento sobre a bioquímica e a ecologia dos microrganismos do solo permitiu a consolidação dos bioinsumos como ferramentas efetivas na agricultura sustentável. Diferentemente de abordagens exclusivamente químicas, os bioinsumos atuam por meio de processos biológicos naturais, promovendo a nutrição vegetal, o crescimento das plantas e a sanidade dos agroecossistemas. Atualmente, inoculantes microbianos, biofertilizantes e bioestimulantes já fazem parte do manejo agrícola em larga escala, com resultados consistentes tanto do ponto de vista agrônômico quanto ambiental.

5.1. Inoculantes microbianos

Os inoculantes microbianos consistem em preparações comerciais contendo bactérias ou fungos benéficos, aplicados diretamente às sementes, ao solo ou às plantas. Esses microrganismos são selecionados com base em sua capacidade de promover o crescimento vegetal, aumentar a eficiência no uso de nutrientes e estabelecer interações simbióticas ou associativas com as raízes.

Entre os principais grupos utilizados destacam-se:

- Bactérias fixadoras de nitrogênio, como *Bradyrhizobium* e *Azospirillum*
- Fungos micorrízicos arbusculares, que ampliam a absorção de fósforo e outros nutrientes pouco móveis no solo;
- Bactérias solubilizadoras de fosfato, capazes de converter formas insolúveis em nutrientes assimiláveis.

A adoção de inoculantes permite reduzir significativamente o uso de fertilizantes minerais, especialmente nitrogenados, diminuindo custos de produção e impactos ambientais associados à sua fabricação e aplicação.

5.2. Biofertilizantes e bioestimulantes: benefícios agronômicos

Os biofertilizantes são produtos derivados de microrganismos vivos ou de seus metabólitos, capazes de melhorar a disponibilidade e a assimilação de nutrientes pelas plantas. Já os bioestimulantes atuam estimulando processos fisiológicos vegetais, como o desenvolvimento radicular, a absorção de nutrientes e a tolerância a estresses abióticos.

Do ponto de vista bioquímico, esses produtos exercem seus efeitos por meio de:

- Produção de fitormônios (auxinas, giberelinas e citocininas);
- Liberação de ácidos orgânicos e enzimas;
- Modulação do metabolismo vegetal e da microbiota do solo.

Os benefícios agronômicos incluem aumento da produtividade, maior uniformidade de plantas, melhoria da eficiência nutricional e maior resiliência frente a condições adversas, como déficit hídrico e solos de baixa fertilidade.

5.3. Casos de sucesso: inoculação com *Bradyrhizobium* e *Azospirillum*

Um dos exemplos mais bem-sucedidos do uso de bioinsumos na agricultura brasileira é a inoculação da soja com bactérias do gênero *Bradyrhizobium*. Essa simbiose permite a fixação biológica do nitrogênio atmosférico (N₂), suprimindo praticamente toda a demanda nitrogenada da cultura, dispensando a aplicação de fertilizantes nitrogenados. Estima-se que essa tecnologia gere economia de bilhões de reais por safra e reduza drasticamente a emissão de gases de efeito estufa associados à produção de fertilizantes.

Outro caso relevante é a inoculação com bactérias do gênero *Azospirillum*, amplamente utilizada em culturas como milho. Diferentemente da simbiose clássica, *Azospirillum* estabelece uma associação com as raízes, promovendo crescimento vegetal principalmente pela produção de auxinas e pelo estímulo ao desenvolvimento radicular, o que resulta em maior eficiência na absorção de água e nutrientes.

Esses casos ilustram como o conhecimento bioquímico das interações microrganismo–planta foi traduzido em tecnologias consolidadas, demonstrando o potencial dos bioinsumos como pilares da agricultura sustentável moderna.

6. Benefícios e limitações dos bioinsumos

A adoção de bioinsumos representa um avanço significativo rumo a sistemas agrícolas mais sustentáveis, baseados na valorização de processos biológicos naturais. No entanto, apesar dos benefícios agronômicos e ambientais amplamente documentados, a consolidação desses produtos em larga escala enfrenta desafios técnicos, industriais e regulatórios. A compreensão equilibrada de benefícios e limitações é essencial para o desenvolvimento de tecnologias biologicamente eficazes e economicamente viáveis.

6.1. Benefícios esperados do uso de bioinsumos

Entre os principais benefícios associados ao uso de bioinsumos destaca-se a redução da dependência de fertilizantes minerais e defensivos químicos sintéticos. Inoculantes microbianos capazes de fixar nitrogênio, solubilizar fósforo ou estimular o crescimento vegetal permitem maior eficiência no uso de nutrientes, reduzindo custos de produção e impactos ambientais relacionados à extração de recursos naturais e à emissão de gases de efeito estufa.

Outro benefício central é a melhoria da saúde do solo. Bioinsumos promovem o aumento da diversidade e da atividade microbiológica, favorecendo a ciclagem de nutrientes, a estabilidade da estrutura do solo e a resiliência dos sistemas produtivos. Esses efeitos contribuem para a manutenção da fertilidade a longo prazo e para a sustentabilidade dos “agroecossistemas”, especialmente em solos tropicais intensamente manejados.

Além disso, o uso de biodefensivos tende a reduzir a contaminação ambiental e os riscos à saúde humana, uma vez que esses produtos apresentam maior especificidade biológica e menor persistência no ambiente quando comparados aos defensivos químicos convencionais.

6.2. Limitações e desafios no uso de bioinsumos

Apesar dos benefícios, os bioinsumos apresentam limitações inerentes à sua natureza biológica, sendo fortemente influenciados por fatores ambientais como temperatura, umidade, pH do solo e composição da microbiota nativa. Essa variabilidade ambiental pode resultar em respostas agronômicas menos previsíveis quando comparadas às de insumos químicos, exigindo estratégias de manejo mais ajustadas às condições locais.

Outro desafio relevante é a sobrevivência e a estabilidade dos microrganismos no solo, especialmente após a aplicação. Fatores como competição com microrganismos nativos, radiação solar, estresse hídrico e presença de resíduos de agroquímicos podem comprometer a viabilidade celular e reduzir a eficiência dos produtos.

No entanto, um dos maiores entraves à ampla adoção dos bioinsumos está relacionado à escalabilidade industrial e à estabilidade das formulações comerciais, especialmente aquelas à base de água.

6.3. Escalabilidade, shelf life e desafios de formulação

Produtos microbiológicos formulados em meio aquoso apresentam desafios significativos de shelf life, uma vez que a água constitui um ambiente altamente favorável ao crescimento microbiano, tanto do microrganismo de interesse quanto de contaminantes indesejáveis. A manutenção da viabilidade celular ao longo do armazenamento exige controle rigoroso de fatores como oxigênio dissolvido, pH, atividade de água, temperatura e disponibilidade de nutrientes residuais.

A contaminação microbiana representa um dos principais riscos durante a produção, formulação e armazenamento de bioinsumos líquidos. Bactérias oportunistas, fungos e leveduras podem competir por nutrientes, produzir metabólitos tóxicos ou alterar as condições físico-químicas do produto, comprometendo sua eficácia e segurança. Esse risco é ampliado em processos de produção em larga escala, nos quais pequenas falhas de assepsia podem resultar em perdas significativas.

Para mitigar esses problemas, estratégias tecnológicas têm sido adotadas, como:

- Uso de meios de cultura quimicamente definidos ou pobres em nutrientes após o crescimento celular;
- Ajuste de pH e potencial redox para limitar o crescimento de contaminantes;
- Emprego de agentes estabilizantes e protetores celulares;
- Formulações sólidas ou semissólidas (turfa, polímeros, encapsulação), que reduzem a atividade de água;
- Implementação rigorosa de boas práticas de fabricação (BPF) e controle microbiológico ao longo de toda a cadeia produtiva.

Essas estratégias demonstram que o sucesso dos bioinsumos depende não apenas da seleção do microrganismo, mas também do desenvolvimento de processos industriais robustos, capazes de garantir estabilidade, segurança e desempenho agrônômico consistente.

6.4. Regulamentação e perspectivas

A regulamentação dos bioinsumos, embora necessária para garantir qualidade e segurança, pode representar um desafio adicional à inovação, especialmente para pequenas empresas e startups. No Brasil, avanços recentes na legislação têm buscado simplificar processos sem comprometer critérios técnicos, mas ainda há necessidade de harmonização entre exigências regulatórias e a dinâmica de desenvolvimento tecnológico.

Os bioinsumos apresentam enorme potencial para transformar os sistemas agrícolas, aliando produtividade e sustentabilidade. No entanto, seu sucesso em larga escala depende da superação de desafios bioquímicos, microbiológicos e industriais, especialmente aqueles relacionados à estabilidade de formulações aquosas, controle de contaminações e escalabilidade produtiva. O enfrentamento desses desafios requer integração entre pesquisa científica, engenharia de bioprocessos e políticas públicas, consolidando os bioinsumos como pilares da agricultura do futuro.

7. perspectivas futuras

O avanço contínuo da bioquímica, da biologia molecular e da engenharia de bioprocessos tem ampliado significativamente o potencial dos bioinsumos na agricultura moderna. As perspectivas futuras apontam para o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais precisas, eficientes e integradas aos princípios da sustentabilidade, consolidando os bioinsumos como elementos centrais na transição para sistemas agrícolas de baixo impacto ambiental.

7.1. Biotecnologia e engenharia genética: genomas e cepas superiores

O sequenciamento de genomas microbianos e o avanço das ferramentas de biologia molecular têm permitido uma compreensão aprofundada dos mecanismos genéticos e metabólicos responsáveis pelos efeitos benéficos dos microrganismos utilizados como bioinsumos. A análise genômica possibilita a identificação de genes associados à fixação de nitrogênio, solubilização de nutrientes, produção de fitormônios, sideróforos e metabólitos antimicrobianos, orientando a seleção racional de cepas superiores.

Além da seleção natural, técnicas de engenharia genética e edição genômica têm potencial para otimizar características específicas, como maior tolerância a estresses ambientais, melhor desempenho metabólico e maior estabilidade em formulações comerciais. Embora o uso de microrganismos geneticamente modificados ainda enfrente desafios regulatórios e de aceitação pública, essa abordagem representa uma fronteira importante para o aumento da eficiência e da previsibilidade dos bioinsumos.

Nesse contexto, a integração entre genômica, transcriptômica e metabolômica tende a acelerar o desenvolvimento de bioinsumos baseados em evidências moleculares, reduzindo o empirismo e fortalecendo o caráter científico dessas tecnologias.

7.2. Formulações avançadas: encapsulamento e sistemas de nanoentrega

Paralelamente aos avanços genéticos, o desenvolvimento de formulações avançadas surge como uma estratégia essencial para superar limitações

relacionadas à estabilidade, à viabilidade celular e à eficiência de aplicação dos bioinsumos. Técnicas de encapsulamento micro e nanométrico permitem proteger microrganismos e metabólitos contra estresses físicos, químicos e biológicos, como radiação, variações de temperatura e competição microbiana no solo.

Sistemas de nanoentrega e matrizes poliméricas biodegradáveis possibilitam a liberação controlada de microrganismos ou compostos bioativos na rizosfera, aumentando o tempo de ação e a eficácia agrônômica. Do ponto de vista bioquímico, essas tecnologias contribuem para a manutenção da atividade metabólica e da integridade celular, além de reduzir perdas durante o armazenamento e após a aplicação no campo.

Essas abordagens representam uma convergência entre bioquímica, ciência dos materiais e engenharia de processos, ampliando o potencial de escalabilidade e comercialização de bioinsumos de alta performance.

8. Referências

- ANDERSON, Kayli. Popular fad diets: An evidence-based perspective. **Progress in Cardiovascular Diseases**, v. 77, p. 78-85, 2023
- DHAMIJA, Radhika; ECKERT, Susan; WIRRELL, Elaine. Ketogenic Diet. **Canadian Journal of Neurological Sciences**, v. 40, n. 2, p. 158-167, 2013
- IRUSA, Karina F.; VENCE, Brian; DONOVAN, Terry. Potential oral health effects of e-cigarettes and vaping: A review and case reports. **Journal of Esthetic and Restorative Dentistry**, p. 1-5, 2020
- KHAWANDANAH, Jomana; TEWFIK, Ihab. Fad Diets: Lifestyle Promises and Health Challenges. **Journal of Food Research**, v. 5, n. 6, p. 80-94, 2016
- KOUZOUKAS, Erika et al. The health effects of vaping and e-cigarettes: consensus recommendations. **International Journal of Drug Policy**, v. 148, 105117, 2026
- KUCHKUNTALA, Aravind R. et al. Fad Diets: Hype or Hope?. **Current Nutrition Reports**, v. 7, p. 310-323, 2018
- LU, Rong et al. Alcohol injury damages intestinal stem cells. **Alcoholism: Clinical and Experimental Research**, 2017

MARTINS, Larissa Castelo Guedes et al. The factors related to a sedentary lifestyle: A meta-analysis review. **Journal of Advanced Nursing**, v. 77, p. 1188–1205, 2021

MENDONCA, Vineetha. Modern Food Habits and Its Impact on Human Health. **International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM)**, p. 182-185, 2023

NORDLI JR., Douglas R.; DE VIVO, Darryl C. The Ketogenic Diet Revisited: Back to the Future. **Epilepsia**, v. 38, n. 7, p. 743-749, 1997

OBAD, Adam et al. Alcohol-Mediated Organ Damages: Heart and Brain. **Frontiers in Pharmacology**, v. 9, n. 81, 2018

O'NEILL, Blair; RAGGI, Paolo. The ketogenic diet: Pros and cons. **Atherosclerosis**, v. 292, p. 119-126, 2019

PARGA, Andres D.; COVEN, Hannah. When Diet Trends Go Viral: Cutaneous Manifestations of Social Media-Driven Fad Diets and Supplements. **Cureus**, v. 17, n. 6, e86334, 2025

PARK, Jung Ha et al. Sedentary Lifestyle: Overview of Updated Evidence of Potential Health Risks. **Korean Journal of Family Medicine**, v. 41, n. 6, p. 365-373, 2020

RINNINELLA, Emanuele et al. Food Components and Dietary Habits: Keys for a Healthy Gut Microbiota Composition. **Nutrients**, v. 11, n. 10, 2393, 2019.

SCHUTZ, Yves; MONTANI, Jean-Pierre; DULLOO, Abdul G. Low-carbohydrate ketogenic diets in body weight control: A recurrent plaguing issue of fad diets?. **Obesity Reviews**, v. 22, n. S2, e13195, 2021

SHRIDHAR, G. et al. Modern Diet and its Impact on Human Health. **Journal of Nutrition & Food Sciences**, v. 5, n. 6, p. 1000430, 2015

TREMBLAY, Mark Stephen et al. Physiological and health implications of a sedentary lifestyle. **Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism**, v. 35, p. 725-740, 2010

WU, Defeng; CEDERBAUM, Arthur I. Alcohol, Oxidative Stress, and Free Radical Damage. **Alcohol Research & Health**, v. 27, n. 4, p. 277-284.

Autores

Rhuan Ribeiro dos Reis

Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Maringá

CAPÍTULO 15

Além das Calorias: Como a microbiota intestinal contribui para a regulação do peso corporal e obesidade

Suellen Cristina dos Passos

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c15>

Resumo

A obesidade é uma doença complexa influenciada por fatores metabólicos, hormonais e neurológicos. Nesse cenário, a microbiota intestinal desempenha um papel central no controle do peso, atuando na digestão e no armazenamento de energia. O desequilíbrio dessas comunidades bacterianas, conhecido como disbiose, aumenta a extração de energia dos alimentos, favorece o acúmulo de gordura e desencadeia uma inflamação crônica de baixo grau, associada à resistência à insulina. Além de sofrer as consequências da obesidade, a microbiota ativamente impulsiona o seu desenvolvimento ao modular eixos de comunicação com o cérebro (regulando fome e saciedade) e com o fígado. A alimentação é o principal regulador desse ecossistema: enquanto alimentos *in natura* promovem bactérias benéficas, produtos ultraprocessados prejudicam o equilíbrio. Compreender a microbiota intestinal amplia a visão tradicional sobre a obesidade, abrindo caminho para tratamentos inovadores focados na saúde do intestino, indo muito além da simples contagem de calorias.

Palavras chaves: Cérebro; disbiose; inflamação; microbiota; obesidade.

Abstract

Obesity is a complex disease influenced by metabolic, hormonal, and neurological factors. In this context, the gut microbiota plays a central role in weight management by regulating digestion and energy storage. The imbalance of these bacterial communities, known as dysbiosis, increases energy extraction from food, promotes fat accumulation, and triggers chronic low-grade inflammation associated with insulin resistance. Beyond suffering the consequences of obesity, the microbiota actively drives its development by modulating communication axes with the brain (regulating hunger and satiety) and the liver. Diet is the main regulator of this ecosystem: while whole foods promote beneficial bacteria, ultra-processed products disrupt the balance. Understanding the gut microbiota broadens the traditional perspective on obesity, paving the way for innovative treatments focused on gut health, going far beyond simple calorie counting.

Keywords: Brain; dysbiosis; inflammation; microbiota; obesity.

1. Introdução



A obesidade é uma doença multifatorial, associada a um desequilíbrio entre ingestão e gasto energético, mas que não pode mais ser explicada apenas pelo conceito de balanço calórico. Evidências demonstram que diversos fatores — incluindo mecanismos hormonais, inflamatórios, neuroendócrinos e metabólicos — exercem papel central na regulação do peso corporal. Nesse contexto, a microbiota intestinal emergiu como um componente-chave na modulação do metabolismo energético do hospedeiro, influenciando diretamente o desenvolvimento e a progressão da obesidade.

O intestino humano abriga trilhões de microrganismos, conhecidos como microbiota intestinal, formados principalmente por bactérias “do bem”. Esses microrganismos ajudam o corpo a digerir partes dos alimentos que não conseguimos quebrar sozinhos, produzem substâncias importantes para o funcionamento do organismo e contribuem para o equilíbrio do metabolismo. Quando ocorre um desequilíbrio nessa microbiota, situação chamada de disbiose, o organismo pode passar a retirar mais energia dos alimentos, acumular mais gordura e apresentar uma inflamação leve e contínua, alterações frequentemente encontradas em pessoas com obesidade.

Além de ajudar a aproveitar melhor a energia dos alimentos, a microbiota intestinal funciona como uma espécie de “central de comunicação” do organismo. Ela produz substâncias que enviam sinais para o corpo, ajudando a controlar a fome, a sensação de saciedade e o funcionamento do metabolismo. Esses sinais influenciam hormônios que avisam quando já comemos o suficiente, além de ajudar o organismo a usar melhor o açúcar e a gordura, protegendo também a parede do intestino.

Estudos mostram ainda que o tipo de microbiota presente no intestino pode influenciar diretamente o ganho de peso. Em pesquisas com animais, a transferência da microbiota de pessoas obesas foi capaz de causar aumento de peso e alterações no metabolismo, mesmo sem maior consumo de alimentos. Isso indica que a microbiota não apenas sofre as consequências da obesidade, mas também pode contribuir para o seu desenvolvimento. Assim, entender como esses microrganismos atuam no controle do peso ajuda a ir além da ideia de que a obesidade depende apenas das calorias ingeridas, abrindo caminho para novas formas de prevenção e tratamento.

1.1 Microbiota intestinal: funções, mecanismos de ação e sua relação com a obesidade

O corpo humano convive diariamente com uma grande quantidade de microrganismos que vivem principalmente no intestino, formando o que chamamos de microbiota intestinal. Embora muitas vezes associadas apenas à digestão, essas bactérias exercem funções muito mais amplas, atuando diretamente na regulação do metabolismo, no funcionamento do sistema imunológico e no controle do peso corporal. A composição da microbiota começa a formar-se logo após o nascimento e pode ser influenciada por diversos fatores ao longo da vida, como o tipo de parto, a alimentação, o uso de medicamentos (especialmente antibióticos) e o estilo de vida.

Uma das principais funções da microbiota intestinal é auxiliar na digestão de componentes dos alimentos que o organismo humano não consegue digerir sozinho, como as fibras alimentares. Durante esse processo, as bactérias produzem substâncias chamadas de ácidos graxos de cadeia curta, que servem como fonte de energia para as células do intestino e atuam como sinais químicos para outros órgãos. Esses compostos ajudam a regular o apetite, melhoram o uso da glicose pelo organismo e influenciam o metabolismo das gorduras, contribuindo para o equilíbrio energético do corpo.

Além disso, a microbiota intestinal exerce papel importante na comunicação entre o intestino e o cérebro, conhecida como eixo intestino-cérebro. Por meio da liberação de substâncias químicas e da ativação de hormônios intestinais, a microbiota participa no controle da fome e da saciedade, influenciando o comportamento alimentar. Quando esse sistema funciona adequadamente, o organismo consegue regular melhor a ingestão de alimentos e o gasto energético.

Alterações na composição da microbiota intestinal, conhecidas como disbiose, podem prejudicar esses mecanismos de controle. Em situações de disbiose, observa-se maior capacidade do organismo em retirar energia dos alimentos, favorecendo o acúmulo de gordura corporal. Além disso, o desequilíbrio da microbiota pode comprometer a barreira intestinal, permitindo a passagem de substâncias inflamatórias para a circulação, o que contribui para um estado de inflamação crônica de baixo grau. Esse tipo de inflamação está

diretamente associado ao desenvolvimento da obesidade e de doenças metabólicas relacionadas, como a resistência à insulina e o diabetes tipo 2.

Evidências experimentais reforçam que a microbiota intestinal não apenas sofre influência da obesidade, mas também pode participar ativamente da sua origem. Estudos com animais livres de microrganismos demonstraram que a introdução da microbiota proveniente de indivíduos obesos foi suficiente para induzir ganho de peso e alterações metabólicas, mesmo sem mudanças no consumo alimentar. Esses achados indicam que o tipo de microbiota presente no intestino pode determinar como o organismo lida com a energia ingerida.

Outro ponto importante é que a alimentação exerce forte influência sobre a microbiota intestinal. Dietas ricas em fibras, frutas, vegetais e alimentos minimamente processados favorecem o crescimento de bactérias benéficas, enquanto dietas ricas em gorduras saturadas e açúcares simples tendem a promover a disbiose. Assim, mudanças nos hábitos alimentares podem modular positivamente a microbiota, contribuindo para a prevenção e o controle da obesidade.

A compreensão do papel da microbiota intestinal amplia a visão tradicional da obesidade, que por muito tempo foi atribuída apenas ao excesso de calorias. Atualmente, sabe-se que o equilíbrio da microbiota intestinal é um dos fatores determinantes para a saúde metabólica, representando um importante alvo para estratégias nutricionais e terapêuticas voltadas ao manejo da obesidade.

1.2. A ligação entre as bactérias do intestino, o fígado e a gordura no corpo

O fígado é um órgão muito importante para o funcionamento do corpo, pois ajuda a controlar o uso da energia, a produção de açúcar e o armazenamento de gordura. O que muitas pessoas não sabem é que o fígado está diretamente ligado ao intestino e às bactérias que vivem nele, formando uma conexão conhecida como eixo intestino-fígado.

As bactérias do intestino produzem substâncias que podem chegar até o fígado por meio do sangue. Quando a microbiota intestinal está equilibrada, essas substâncias ajudam o fígado a funcionar corretamente. Porém, quando ocorre um desequilíbrio das bactérias do intestino, a parede intestinal pode ficar

mais “frágil”, permitindo a passagem de substâncias inflamatórias para a corrente sanguínea.

Essas substâncias chegam ao fígado e ativam mecanismos que provocam uma inflamação constante, mesmo que leve. Com o tempo, essa inflamação prejudica a ação da insulina, favorece o acúmulo de gordura no fígado e contribui para o aumento da gordura corporal. Esse processo está relacionado ao desenvolvimento da obesidade e ao surgimento da gordura no fígado, conhecida como esteatose hepática.

Quando uma pessoa ganha peso, principalmente na região abdominal, o corpo passa a armazenar mais gordura do que consegue usar. Parte dessa gordura acaba por ser enviada para o fígado. Com o tempo, o órgão fica sobrecarregado e começa a acumular gordura em excesso, dando início à esteatose hepática. A obesidade também está associada à resistência à insulina, uma condição em que o corpo tem dificuldade em usar o açúcar do sangue como fonte de energia. Quando isso acontece, o fígado passa a produzir mais gordura e a liberar menos gordura para ser usada pelo organismo, agravando ainda mais o acúmulo de gordura hepática.

O excesso de tecido adiposo libera substâncias inflamatórias que afetam vários órgãos, incluindo o fígado. Essa inflamação constante pode fazer com que a gordura acumulada no fígado evolua para quadros mais graves, como inflamação do fígado (esteato-hepatite), fibrose e, em casos mais avançados, cirrose. Muitas pessoas com gordura no fígado não apresentam sintomas claros. No entanto, o problema pode causar cansaço, desconforto abdominal e alterações em exames de sangue. Se não for tratado, pode aumentar o risco de doenças cardiovasculares e diabetes tipo 2.

Cuidar do peso corporal é uma das formas mais eficazes de proteger o fígado. A relação entre obesidade e esteatose hepática mostra que manter hábitos saudáveis não é importante apenas para a estética, mas também para o bom funcionamento dos órgãos e para a qualidade de vida.

1.3. Disbiose intestinal e inflamação silenciosa no corpo

A disbiose acontece quando as bactérias boas do intestino diminuem e bactérias menos saudáveis passam a predominar. Esse desequilíbrio prejudica

o funcionamento do intestino e enfraquece a sua parede, que deveria agir como uma barreira de proteção. Quando essa barreira fica comprometida, substâncias que causam inflamação conseguem passar do intestino para o sangue. Isso gera uma inflamação contínua e silenciosa no corpo, que muitas vezes não apresenta sintomas imediatos.

Essa inflamação atrapalha o uso do açúcar e da gordura pelo organismo, dificultando a ação da insulina e favorecendo o acúmulo de gordura corporal. Por isso, a disbiose intestinal está frequentemente associada à obesidade e a outros problemas metabólicos. A disbiose pode interferir na sensação de fome e saciedade. Um intestino desequilibrado pode enviar sinais errados para o cérebro, fazendo com que a pessoa sinta fome com mais frequência ou tenha dificuldade em perceber quando já comeu o suficiente. Isso torna o controle do peso ainda mais difícil.

1.4. A microbiota intestinal pode influenciar o surgimento da obesidade

Durante muito tempo, acreditou-se que a obesidade acontecia apenas porque a pessoa comia mais do que gastava. No entanto, hoje sabemos que essa explicação é incompleta. As bactérias que vivem no intestino também têm um papel importante nesse processo e podem influenciar diretamente o ganho de peso.

Para entender melhor, imagine duas pessoas que comem praticamente a mesma quantidade de comida e têm hábitos parecidos. Mesmo assim, uma ganha peso com mais facilidade do que a outra. Isso pode acontecer porque o intestino dessas pessoas funciona de forma diferente. Em algumas pessoas, as bactérias do intestino conseguem “aproveitar” mais os alimentos, retirando mais energia da mesma refeição, o que favorece o acúmulo de gordura.

Estudos com animais ajudam a explicar esse fenômeno. Em pesquisas, animais que não tinham bactérias no intestino receberam bactérias de pessoas obesas. Mesmo sem aumentar a quantidade de comida, esses animais passaram a ganhar peso e apresentaram alterações no metabolismo. Isso mostra que o tipo de bactéria presente no intestino pode influenciar diretamente o peso corporal.

No dia a dia, isso ajuda a explicar por que algumas pessoas engordam com mais facilidade, mesmo dizendo que “comem pouco”. Um intestino desequilibrado pode fazer o corpo armazenar mais gordura, dificultando o emagrecimento. Além disso, esse desequilíbrio pode aumentar a inflamação no organismo e atrapalhar o funcionamento de hormônios importantes, como a insulina, que controla o açúcar no sangue.

Por outro lado, quando a microbiota intestinal está equilibrada, o corpo tende a usar melhor a energia dos alimentos e a controlar melhor a fome. Hábitos simples, como consumir mais frutas, verduras, legumes e alimentos ricos em fibras, ajudam a alimentar as bactérias boas do intestino. Já o excesso de alimentos ultraprocessados, ricos em açúcar e gordura, pode prejudicar esse equilíbrio.

1.5. A influência da alimentação nas bactérias do intestino

A alimentação tem um papel fundamental na saúde do intestino e das bactérias que vivem nele. Tudo o que comemos serve de alimento não só para o nosso corpo, mas também para a microbiota intestinal. Por isso, o tipo de alimento escolhido no dia a dia pode ajudar a fortalecer as bactérias boas ou, ao contrário, favorecer o crescimento de bactérias prejudiciais.

Alimentos naturais, como frutas, verduras, legumes, feijão, grãos integrais e sementes, são ricos em fibras. Essas fibras funcionam como “combustível” para as bactérias benéficas do intestino. Quando essas bactérias recebem o alimento adequado, elas multiplicam-se, ajudam o intestino a funcionar melhor e produzem substâncias importantes para o controle da fome, do açúcar no sangue e da gordura corporal.

Por outro lado, uma alimentação baseada principalmente em alimentos ultraprocessados, ricos em açúcar, gordura e sal — como refrigerantes, doces, salgadinhos, *fast food* e produtos industrializados —, pode prejudicar o equilíbrio da microbiota. Esse tipo de dieta favorece a diminuição das bactérias benéficas e o aumento das bactérias menos saudáveis, levando ao desequilíbrio intestinal, conhecido como disbiose.

No dia a dia, esse desequilíbrio pode dificultar o controle do peso, aumentar a inflamação no organismo e favorecer o acúmulo de gordura. Além disso, um intestino desequilibrado pode atrapalhar o funcionamento de hormônios ligados à saciedade, fazendo com que a pessoa sinta fome com mais frequência.

1.6. Limitações do conhecimento atual e caminhos para o futuro

Nos últimos anos, a ciência avançou muito na compreensão do papel das bactérias do intestino na saúde e no controle do peso. No entanto, esse assunto ainda é bastante complexo. Cada pessoa possui uma microbiota intestinal diferente, influenciada pela genética, pela alimentação, pelo ambiente em que vive e pelos hábitos do dia a dia. Por isso, os resultados observados em pesquisas nem sempre se aplicam da mesma forma a todas as pessoas.

Grande parte do que se sabe hoje vem de estudos experimentais, principalmente com animais. Embora esses estudos sejam muito importantes, nem sempre é possível aplicar diretamente esses resultados aos seres humanos. Além disso, fatores como a idade, o estilo de vida, o uso de medicamentos e o histórico alimentar podem modificar a microbiota, tornando difícil encontrar uma única solução que funcione para todos.

Por causa dessa diversidade, cresce a necessidade de abordagens mais personalizadas. Isso significa entender melhor as características individuais de cada pessoa, como o seu tipo de microbiota, os seus hábitos alimentares e o seu perfil metabólico. O uso de tecnologias modernas, que analisam genes, bactérias e características do organismo em conjunto, pode ajudar a identificar padrões específicos relacionados à obesidade.

No futuro, espera-se que as pesquisas consigam identificar quais os tipos de bactérias que estão mais associados ao ganho de peso e como elas atuam no organismo. Com esse conhecimento, será possível desenvolver tratamentos mais eficazes, como orientações alimentares personalizadas, o uso direcionado de probióticos e outras estratégias voltadas para melhorar a saúde do intestino.

2. Considerações finais

As bactérias que vivem no intestino têm um papel muito importante na saúde do nosso corpo. Elas ajudam na digestão dos alimentos, participam no controle da fome e influenciam a forma como o organismo usa e armazena a energia. Quando a microbiota intestinal está equilibrada, o corpo tende a funcionar melhor, com maior controle do peso e do metabolismo.

Ao longo deste capítulo, foi possível compreender que o desequilíbrio dessas bactérias pode contribuir para o desenvolvimento da obesidade. Esse desequilíbrio pode aumentar a inflamação no organismo, dificultar a ação da insulina e favorecer o acúmulo de gordura corporal. Por isso, a obesidade não pode ser explicada apenas pela quantidade de calorias consumidas, mas também pela forma como o corpo processa os alimentos, processo no qual o intestino tem papel fundamental.

Entender a relação entre microbiota intestinal e obesidade amplia a visão sobre a prevenção e o tratamento desse problema de saúde. Estratégias como uma alimentação mais equilibrada, rica em alimentos naturais e fibras, associadas a hábitos de vida saudáveis, podem ajudar a manter o equilíbrio das bactérias intestinais. Além disso, esse conhecimento abre espaço para o desenvolvimento de novas abordagens terapêuticas voltadas para a saúde do intestino.

Dessa forma, cuidar da microbiota intestinal representa um passo importante para promover a saúde, prevenir o ganho excessivo de peso e melhorar a qualidade de vida, reforçando que o intestino é um aliado essencial no cuidado com o corpo como um todo.

3. Referências

BÄCKHED, F. et al. The gut microbiota as an environmental factor that regulates fat storage. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 101, n. 44, p. 15718–15723, 2004. DOI: 10.1073/pnas.0407076101.

BYRNE, C. D.; TARGHER, G. NAFLD: a multisystem disease. **Journal of Hepatology**, Amsterdam, v. 62, n. 1, p. S47–S64, 2015. DOI: 10.1016/j.jhep.2014.12.012.

CANFORA, E. E.; JOCKEN, J. W.; BLAAK, E. E. Short-chain fatty acids in control of body weight and insulin sensitivity. **Nature Reviews Endocrinology**, London, v. 11, n. 10, p. 577–591, 2015. DOI: 10.1038/nrendo.2015.128.

CANI, P. D. et al. Selective increases of bifidobacteria in gut microflora improve high-fat-diet-induced diabetes in mice through a mechanism associated with endotoxaemia. **Diabetologia**, Berlin, v. 50, n. 11, p. 2374–2383, 2007a. DOI: 10.1007/s00125-007-0781-z.

CANI, P. D.; HOSTE, S.; GUIOT, Y.; DELZENNE, N. M. Dietary non-digestible carbohydrates promote L-cell differentiation in the proximal colon of rats. **British Journal of Nutrition**, Cambridge, v. 98, n. 1, p. 32–37, 2007b. DOI: 10.1017/S0007114507691962.

CHALASANI, N. et al. The diagnosis and management of nonalcoholic fatty liver disease: practice guidance from the American Association for the Study of Liver Diseases. **Hepatology**, Hoboken, v. 67, n. 1, p. 328–357, 2018. DOI: 10.1002/hep.29367.

CRYAN, J. F. et al. The microbiota–gut–brain axis. **Physiological Reviews**, Bethesda, v. 99, n. 4, p. 1877–2013, 2019. DOI: 10.1152/physrev.00018.2018.

KOH, A.; DE VADDER, F.; KOVATCHEVA-DATCHARY, P.; BÄCKHED, F. From dietary fiber to host physiology: short-chain fatty acids as key bacterial metabolites. **Cell**, Cambridge, v. 165, n. 6, p. 1332–1345, 2016. DOI: 10.1016/j.cell.2016.05.041.

LEY, R. E.; TURNBAUGH, P. J.; KLEIN, S.; GORDON, J. I. Human gut microbes associated with obesity. **Nature**, London, v. 444, n. 7122, p. 1022–1023, 2006. DOI: 10.1038/4441022a.

MAKKI, K.; DEEHAN, E. C.; WALTER, J.; BÄCKHED, F. The impact of dietary fiber on gut microbiota in host health and disease. **Cell Host & Microbe**, Cambridge, v. 23, n. 6, p. 705–715, 2018. DOI: 10.1016/j.chom.2018.05.012.

MARCHESINI, G. et al. Nonalcoholic fatty liver, steatohepatitis, and the metabolic syndrome. **Hepatology**, Hoboken, v. 37, n. 4, p. 917–923, 2003. DOI: 10.1053/jhep.2003.50161.

MONTEIRO, C. A. et al. Ultra-processed foods: what they are and how to identify them. **Public Health Nutrition**, Cambridge, v. 22, n. 5, p. 936–941, 2019. DOI: 10.1017/S1368980018003762.

RIDAURA, V. K. et al. Gut microbiota from twins discordant for obesity modulate metabolism in mice. **Science**, Washington, v. 341, n. 6150, p. 1241214, 2013. DOI: 10.1126/science.1241214.

SINGH, R. K. et al. Influence of diet on the gut microbiome and implications for human health. **Journal of Translational Medicine**, London, v. 15, n. 1, p. 73, 2017. DOI: 10.1186/s12967-017-1175-y.

SOMMER, F.; BÄCKHED, F. The gut microbiota: masters of host development and physiology. **Nature Reviews Microbiology**, London, v. 11, n. 4, p. 227–238, 2013. DOI: 10.1038/nrmicro2974.

SONNENBURG, J. L.; BÄCKHED, F. Diet–microbiota interactions as moderators of human metabolism. **Nature**, London, v. 535, n. 7610, p. 56–64, 2016. DOI: 10.1038/nature18846.

TILG, H.; MOSCHEN, A. R. Evolution of inflammation in nonalcoholic fatty liver disease: the multiple parallel hits hypothesis. **Hepatology**, Hoboken, v. 52, n. 5, p. 1836–1846, 2010. DOI: 10.1002/hep.24001.

TURNBAUGH, P. J. et al. An obesity-associated gut microbiome with increased capacity for energy harvest. **Nature**, London, v. 444, n. 7122, p. 1027–1031, 2006. DOI: 10.1038/nature05414.

YOUNOSSI, Z. M.; COREY, K. E.; LIM, J. K. AGA clinical practice update on lifestyle modification using diet and exercise to achieve weight loss in the management of nonalcoholic fatty liver disease: expert review. **Gastroenterology**, Philadelphia, v. 160, n. 3, p. 912–918, 2021. DOI: 10.1053/j.gastro.2020.10.031.

ZINÖCKER, M.; LINDSETH, I. The Western diet–microbiome–host interaction and its role in metabolic disease. **Nutrients**, Basel, v. 10, n. 3, p. 365, 2018. DOI: 10.3390/nu10030365.

Autores

Suellen Cristina dos Passos

Pós-Graduação em Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Maringá

CAPÍTULO 16

Como armazenamos informação? O peso ambiental da nuvem

Vinicius Franco de Oliveira

<https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-43-5.c16>

Resumo

Este capítulo desmistifica o conceito etéreo da "nuvem", revelando a infraestrutura física e os impactos ambientais que sustentam o armazenamento digital e o avanço da Inteligência Artificial. Através de uma perspectiva histórica, traça-se a evolução do armazenamento de memórias físicas para os gigantescos *data centers* modernos. O texto explora o consumo massivo de eletricidade e de água potável necessários para o arrefecimento dos servidores, introduzindo o Paradoxo de Jevons para explicar como o aumento da eficiência tecnológica resulta num maior consumo de recursos. São também abordadas as implicações geopolíticas da extração de minerais raros, a obsolescência programada do *hardware* e o destino do lixo eletrônico. Por fim, propõe-se o conceito de "sobriedade digital" e o "Direito ao Reparo" como caminhos para mitigar o fardo ecológico da era dos dados, exigindo maior transparência corporativa e um consumo tecnológico mais consciente.

Palavras-chave: Nuvem; Inteligência Artificial; Impacto ambiental; *Data centers*; Sobriedade digital.

Abstract

This chapter demystifies the ethereal concept of the "cloud," revealing the physical infrastructure and environmental impacts that sustain digital storage and the advancement of Artificial Intelligence. Through a historical perspective, it traces the evolution of storage from physical memories to gigantic modern data centers. The text explores the massive consumption of electricity and potable water required for server cooling, introducing Jevons Paradox to explain how increased technological efficiency results in greater resource consumption. It also addresses the geopolitical implications of rare mineral extraction, the planned obsolescence of hardware, and the fate of electronic waste. Finally, it proposes the concept of "digital sobriety" and the "Right to Repair" as pathways to mitigate the ecological burden of the data age, calling for greater corporate transparency and more conscious technological consumption.

Keywords: Cloud; Artificial Intelligence; Environmental impact; Data centers; Digital sobriety.

1. Como armazenamos informação?

Estamos em 1975. A sua família reúne-se para o Natal e o seu tio aparece com uma novidade: uma câmara fotográfica analógica. Naquela época, "eternizar o momento" era um exercício de paciência e precisão. Você tirava a foto e ela ficava presa num rolo de filme escuro. Eram necessários dias para revelar e, se alguém piscasse, o registo estava perdido para sempre. A memória era física, cabia num envelope de papel e morava numa gaveta.

Damos um salto para o início dos anos 2000. Agora, a câmara digital é a estrela. Não há mais filme; a foto aparece instantaneamente no pequeno ecrã. Se o primo saiu mal, é só apagar e tirar outra. Para guardar, você usa um cabo USB e transfere o arquivo para o disco rígido do seu computador. Pela primeira vez, a memória tornou-se um arquivo digital, mas ela ainda "morava" com você, dentro daquele disco rígido barulhento na sua escrivaninha.

Corte para o presente. No Natal de 2025, você nem lembra quando tocou numa câmara pela última vez. O telemóvel faz tudo. Você tira a foto, publica-a numa rede social e, muitas vezes, até apaga o arquivo do aparelho para liberar espaço. Mas a foto continua lá, disponível para qualquer um, a qualquer hora. Como?

Fomos ensinados que essa foto vai para a "Nuvem". O nome é poético, sugere algo leve, etéreo, que flutua acima das nossas cabeças sem ocupar espaço. Mas a verdade é que a nuvem não é feita de vapor; ela é feita de aço, silício, cabos submarinos e muito, muito cimento.

Este "palácio de dados" na Carolina do Norte (imagem 1) é um dos endereços reais de um banco de dados (ou *data center*). Segundo dados técnicos, estruturas como esta abrigam dezenas de milhares de servidores a operar sem parar. Imagine um edifício do tamanho de um centro comercial, mas, em vez de lojas, é preenchido por corredores infinitos de máquinas que roncam 24 horas por dia.

Quando você publica aquela foto na cafetaria com os amigos, acontece uma epopeia invisível. A sua imagem é fatiada em códigos e viaja como pulsos de luz por fibras óticas escondidas sob as ruas e os oceanos. Ela passa por

"portões" (roteadores e provedores) que consomem energia para empurrar o dado adiante, até chegar a um disco rígido num banco de dados.

Lá, ela não fica sozinha. Para garantir que você nunca a perca, a "Nuvem" cria cópias de segurança noutros servidores, às vezes em continentes diferentes. Se você guardou uma foto, a infraestrutura da internet sustenta três.



Imagem 1. Sistema de refrigeração do banco de dados da Google, na Carolina do Norte (EUA).



Imagem 2. Banco de dados da Google na Carolina do Norte (EUA).

O problema é que este "corpo" físico da internet tem uma fome insaciável. Cada passo desse caminho, do clique no telemóvel ao armazenamento no

servidor, exige eletricidade. E as máquinas, a trabalhar no limite, aquecem como motores de caminhão. Para não derreterem, precisam de sistemas de refrigeração gigantescos que bebem milhões de litros de água e consomem uma fatia cada vez maior da energia do planeta (imagem 2).

Só no Instagram, são mais de 95 milhões de publicações por dia. Agora, some isso com e-mails, vídeos no YouTube, pesquisas no Google e pelo novo grande vilão: as consultas à Inteligência Artificial. A nuvem, que parecia não pesar nada, está a tornar-se um dos maiores fardos ambientais do nosso século.

2. O suor das máquinas

Quando você está a correr num parque, num calor de 35 °C, transpirar por todas as partes do seu corpo dá-lhe uma vontade imensa de beber água. É o seu corpo a aquecer e a avisá-lo de que está a gastar líquido para manter a temperatura normal e de que precisa de repor esses líquidos para continuar a funcionar.

Se encostar a mão à parte de trás da sua televisão ou ao carregador do seu telemóvel após algumas horas de uso, sentirá um calor persistente. Agora, imagine esse calor multiplicado por milhões. Dentro dos imensos armazéns a que chamamos de "nuvem", o processamento de dados gera uma temperatura tão alta que, sem um sistema de arrefecimento constante, os chips simplesmente derreteriam em poucos minutos, transformando bilhões de dólares em sucata inútil.

Para evitar que o "cérebro" da internet entre em colapso (convenhamos que isso seria parecido com o apocalipse), a indústria de dados recorre a um dos recursos mais preciosos do planeta: a água.

Existem duas formas principais de arrefecer um banco de dados. A primeira é o uso de ar condicionado industrial, que consome uma quantidade astronómica de energia elétrica, o que torna o processo inviável. A segunda, mais comum e barata para as empresas, é o arrefecimento evaporativo.

Funciona de forma parecida com o nosso suor: a água é bombeada pelas instalações, absorve o calor dos servidores e, ao chegar às torres de

arrefecimento, parte dela evapora, levando o calor para a atmosfera. O problema é que, ao contrário do ciclo natural da chuva, essa água precisa de ser potável. Se as empresas usarem água salobra ou suja, os minerais corroem os canos e destroem as máquinas.

Aí vem o facto chocante: um banco de dados de médio porte consome cerca de 2 milhões de litros de água por dia. Isso é o equivalente ao consumo diário de uma cidade de 10 mil habitantes. Estamos a falar apenas de UM banco de dados de médio porte; imagine juntando os milhões espalhados por todo o mundo.

Se o simples armazenamento de fotos já gasta água, a Inteligência Artificial elevou essa conta a um novo patamar. O treino de modelos de linguagem exige que milhares de processadores trabalhem no limite máximo durante meses a fio.

Investigadores da Universidade da Califórnia, Riverside, publicaram um estudo revelador em 2023. Eles calcularam que, para cada conversa simples de 20 a 50 perguntas com uma IA generativa, o sistema "consome" (evapora) o equivalente a uma garrafa de 500 ml de água.

Pense nisto: cada vez que você pede à IA para escrever um e-mail, gerar uma imagem de um "gato astronauta a comer pizza na estação espacial" ou resumir um texto, é como se estivesse a despejar meio litro de água potável diretamente no ralo. No agregado global, com bilhões de consultas diárias, estamos a falar de rios inteiros a serem transformados em vapor para sustentar a nossa curiosidade digital.

3. A era da IA: o salto no consumo

Se a internet "comum" já tinha fome, a Inteligência Artificial é insaciável. De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE), o consumo de eletricidade dos bancos de dados pode duplicar até ao final de 2026.

Para se ter uma ideia da escala: uma pesquisa simples no Google consome cerca de 0,3 Wh. Uma interação com o ChatGPT consome cerca de 2,9 Wh.

Isso significa que a IA gasta quase 10 vezes mais energia do que uma pesquisa tradicional. Multiplique isso pelos bilhões de utilizadores e compreenderá por que razão empresas como a Microsoft e a Google viram as suas emissões de carbono aumentar nos últimos anos, apesar de todas as promessas de sustentabilidade. Elas estão a instalar servidores mais depressa do que o mundo consegue construir parques eólicos.

Estamos a viver um paradoxo contemporâneo: o Paradoxo de Jevons, que afirma que: "à medida que as melhorias tecnológicas aumentam a eficiência com a qual um recurso é usado, o consumo total desse recurso pode aumentar em vez de diminuir". Ou seja, estamos num efeito de ricochete: conseguimos extrair mais energia do carvão hoje do que há 30 anos, mas usamos muito mais carvão para sustentar as comodidades que esses 30 anos de evolução nos trouxeram; no final, o consumo de carvão aumentou mesmo com o melhor aproveitamento dele.

As empresas de chips dizem: "Os nossos novos processadores são 20% mais eficientes!". O problema é que, como eles são mais eficientes e potentes, nós passamos a usá-los 100% mais. Criamos IAs que geram vídeos, que analisam triliões de dados, que mineram criptomoedas. A eficiência não nos trouxe economia; trouxe-nos uma escala de uso que o planeta está a lutar para sustentar.

4. A política ambiental por trás dos bancos de dados

O peso ambiental da nuvem não é distribuído de forma igual. As *Big Techs* instalam frequentemente os seus bancos de dados em regiões onde a energia é barata e a legislação ambiental é flexível.

No Chile, o projeto de um novo banco de dados gerou protestos intensos da população local. O motivo? A instalação consumiria 169 litros de água por segundo numa região que enfrenta uma seca histórica há mais de uma década. No Uruguai, a situação repetiu-se: enquanto o país vivia um racionamento de água para o consumo humano, os planos para um novo centro de dados previam o uso de milhões de litros diários para arrefecer servidores.

Aqui, a divulgação científica revela-nos uma verdade incômoda: a nossa facilidade digital de "enviar um arquivo" pode estar a competir diretamente com a irrigação da horta de um agricultor ou com o abastecimento de uma escola noutra canto do mapa.

E se a questão ambiental não o deixa incomodado, vou apelar à sua carteira: segundo uma notícia da Consecti, milhões de consumidores de 13 estados nos Estados Unidos pagaram contas de luz 20% mais caras devido ao consumo elétrico de bancos de dados, modelos de inteligência artificial e *chatbots* (aqueles que as empresas usam para responder a clientes), pois estas estruturas estão a aumentar o consumo de energia mais rapidamente do que a construção de novas centrais.

5. O Motor do Mundo Digital

Quando pensamos em tecnologia de ponta, visualizamos painéis solares e fazendas eólicas. No entanto, a realidade por trás das paredes dos bancos de dados é, muitas vezes, mais cinzenta. A "nuvem" tem uma fome de energia que não para de crescer, e essa energia precisa de vir de algum lugar 24 horas por dia, 7 dias por semana, faça sol ou faça chuva.

O grande desafio energético da internet é a constância. Ao contrário de uma fábrica que pode reduzir a produção à noite, ou de uma casa que apaga as luzes para dormir, um banco de dados não pode ser desligado. Se ele parar, o sistema bancário trava, os hospitais perdem o acesso a exames e as redes sociais silenciam.

Esta necessidade de energia ininterrupta cria um problema: fontes renováveis, como a solar e a eólica, são intermitentes (o sol põe-se, o vento para). Para garantir que a sua foto no Instagram esteja disponível às três da manhã, os bancos de dados precisam de estar conectados a redes elétricas que ofereçam uma "carga de base" sólida. E, em grande parte do mundo, essa base ainda é composta por carvão e gás natural.

Um exemplo fascinante (e preocupante) é o estado da Virgínia, nos Estados Unidos. Existe lá uma região chamada *Data Center Alley* (Beco dos bancos de dados), por onde passa cerca de 70% do tráfego mundial de internet.



Imagem 3. O Beco dos Bancos de Dados, na Virgínia (EUA).

As empresas de tecnologia adoram a Virgínia por causa dos incentivos fiscais e da infraestrutura. O problema? A matriz energética local está fortemente dependente de combustíveis fósseis. Quando você faz uma pesquisa rápida ou treina uma IA, há uma hipótese enorme de que os dados estejam a ser processados por servidores alimentados pela queima de carvão em centrais da Virgínia. É a ironia máxima da era moderna: a tecnologia mais avançada da humanidade a ser movida pela tecnologia mais poluidora da Revolução Industrial.

6. O Esqueleto da Nuvem: Mineração e o Cemitério de Silício

Até aqui, vimos que a nuvem tem sede e fome. Mas ela também tem um corpo. Cada vez que falamos em "armazenamento de dados", estamos a falar de máquinas físicas compostas por metais raros, plásticos e vidro; e o grande paradoxo da era digital é que, enquanto os nossos arquivos parecem eternos, o *hardware* que os sustenta é cada vez mais efêmero.

Para que uma IA processe informações à velocidade da luz, ela não usa processadores comuns. Ela depende das chamadas GPUs (Unidades de Processamento Gráfico), verdadeiras joias da engenharia. Mas essas joias têm uma origem brutal.

Dentro de um servidor de alto desempenho, encontramos uma tabela periódica inteira de materiais exóticos: lítio, cobalto, cobre e as chamadas "terras raras" (como o neodímio e o praseodímio). A extração destes minerais é o primeiro grande peso ambiental da nuvem.

Para obter um quilo de um metal raro, é necessário escavar e processar toneladas de rocha, destruindo ecossistemas inteiros e consumindo quantidades massivas de energia em minas que, muitas vezes, operam em regiões de conflito ou com legislações ambientais frágeis, como na República Democrática do Congo.

Frequentemente, mais de 80% da pegada de carbono de um dispositivo eletrônico ocorre antes mesmo de o ligar pela primeira vez, durante a fase de mineração e fabrico.

Na era da computação doméstica, um computador durava dez anos. No mundo competitivo da Inteligência Artificial, o *hardware* "envelhece" a uma velocidade assustadora. As grandes empresas de tecnologia estão numa corrida armamentista: assim que uma empresa lança um chip 10% mais rápido, os servidores antigos são substituídos para garantir que a IA daquela empresa não fique para trás.

Isso cria um ciclo de obsolescência programada pelo desempenho. Servidores que ainda funcionariam perfeitamente para tarefas comuns são descartados porque não são mais "rápidos o suficiente" para os novos algoritmos. O resultado? Uma montanha de lixo eletrônico que cresce a cada segundo.

Para onde vai o servidor que guardava as suas fotos de há dez anos? Embora o discurso oficial das empresas fale em "reciclagem", a realidade global é mais sombria. O lixo eletrônico (*e-waste*) é uma das categorias de resíduos que mais cresce no planeta e uma das mais difíceis de processar.

Grande parte destes resíduos acaba por ser exportada para o Sul Global. Em lugares como Agbogbloshie, no Gana, ou em aldeias na Índia e na China, o que sobra da "nuvem" é queimado a céu aberto por trabalhadores em condições precárias para recuperar fios de cobre e gramas de ouro. O que era uma

"tecnologia limpa" no Vale do Silício termina como fumo tóxico de chumbo e mercúrio, a contaminar o solo e o sangue de populações distantes.

7. O despertar da nuvem e a sobriedade digital

Ao longo deste capítulo, fizemos uma viagem que começou num álbum de fotos de família e terminou em minas de cobalto e rios evaporados. Descobrimos que a "nuvem" não é um lugar etéreo, mas um complexo industrial que exige um tributo pesado da Terra. Mas, perante este cenário, a pergunta que fica não é "devemos parar de usar a tecnologia?", mas sim: "como podemos habitá-la de forma consciente?".

Muitas vezes, a responsabilidade pelo impacto ambiental é atirada inteiramente para as costas do utilizador. Dizem-lhe para apagar os seus e-mails antigos ou para não enviar GIFs de "bom dia". Embora a higiene digital seja importante, precisamos de ser honestos: o grande peso da era dos dados advém de decisões corporativas e da arquitetura da inteligência artificial.

Apagar mil e-mails economiza uma fração mínima de energia se comparado ao treino de uma única IA de grande porte. Portanto, o primeiro passo para uma nuvem mais leve é a transparência. Precisamos de exigir que as empresas de tecnologia revelem o custo hídrico e de carbono de cada ferramenta que nos oferecem. Assim como hoje olhamos para a etiqueta de eficiência energética de um frigorífico, deveríamos saber quanta água foi "bebida" pelo algoritmo antes de gerarmos uma imagem ou um texto.

A saída não é o ludismo (o ódio às máquinas), mas a sobriedade digital. Esse conceito, defendido por grupos como o *The Shift Project*, sugere que devemos dar prioridade ao digital para o que realmente importa.

Precisamos mesmo de vídeos em 4K no telemóvel para assistir a uma palestra em que apenas o áudio bastaria? Precisamos de treinar IAs gigantescas para tarefas rotineiras que um código simples resolveria? A sobriedade digital convida-nos a sair do "modo automático" de consumo e a compreender que cada bit tem um corpo físico no planeta.

Para que a nuvem pare de pesar tanto, precisamos de mudar a nossa relação com o *hardware*. O movimento pelo Direito ao Reparo é uma das frentes mais importantes da ciência e da política atuais. Exigir que servidores e dispositivos sejam modulares, fáceis de consertar e que durem uma década em vez de três anos é a forma mais direta de reduzir as feridas da mineração e a acumulação de lixo eletrônico.

A nuvem não vai desaparecer. Ela é, agora, a infraestrutura da nossa civilização. Ela guarda a nossa história, impulsiona curas para doenças e conecta pessoas através de oceanos. No entanto, para que ela continue a servir-nos, não pode custar o futuro do planeta que tenta documentar.

Eternizar o momento, como aquele seu tio fez em 1975, não deveria significar esgotar os recursos para os Natais que virão. Quando fechar este livro e olhar para o seu telemóvel, lembre-se: ele é uma janela para um mundo de informações, mas também é um terminal ligado a cabos submarinos, turbinas de energia e rios distantes. A nuvem só será verdadeiramente leve quando respeitar o peso da Terra.

8. Referências

AGÊNCIA BRASIL. Mais de 5 bilhões de pessoas usam aparelho celular, revela pesquisa. 2019. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-09/mais-de-5-bilhoes-de-pessoas-usam-aparelho-celular-revela-pesquisa>. Acesso em: 14 jan. 2026.

BLUM, Andrew. Tubos: A física da Internet. Rio de Janeiro: Editora Rocco, 2013.

CRAWFORD, Kate. Atlas de inteligencia artificial. Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica Argentina, 2023.

DOS, C. Paradoxo de Jevons. Wikipedia. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Paradoxo_de_Jevons. Acesso em: 14 jan. 2026.

GOMES, B. Our 2024 Environmental Report. Google Blog. Disponível em: <https://blog.google/company-news/outreach-and-initiatives/sustainability/2024-environmental-report/>. Acesso em: 14 jan. 2026.

INDEX. Milhões de consumidores vão pagar mais caro a conta de luz por culpa do ChatGPT, dos data centers e dos chatbots IA. Consecti. Disponível em: <https://consecti.org.br/milhoes-de-consumidores-vao-pagar-mais-carro-a-conta-de-luz>. Acesso em: 14 jan. 2026.

KARA, Siddharth. Cobalt Red: How the Blood of the Congo Powers Our Lives. Nova Iorque: St. Martin's Press, 2023.

LI, P. et al. Making AI Less "Thirsty": Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models. 2023. Disponível em: arXiv. Acesso em: 14 jan. 2026.

MACÊDO, D. Veja as fotos do Datacenter do Google. Blog Diego Macêdo. Disponível em: <https://www.diegomacedo.com.br/veja-as-fotos-do-datacenter-do-google/>. Acesso em: 14 jan. 2026.

SEMRUSH. Principais estatísticas sobre o Instagram: quantas pessoas usam e mais!. Disponível em: <https://pt.semrush.com/blog/estatisticas-instagram/>. Acesso em: 14 jan. 2026.

SOUZA, F. Saiba quantas fotos e vídeos são postados no Instagram todos os dias. Folha Vitória. Disponível em: <https://www.folhavitoria.com.br/curiosidades/quantas-fotos-e-videos-sao-postados-no-instagram-todos-os-dias/>. Acesso em: 14 jan. 2026.

STRUBELL, E.; GANESH, A.; MCCALLUM, A. Energy and Policy Considerations for Modern Deep Learning Research. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, v. 34, n. 09, p. 13693–13696, abr. 2020.

THE SHIFT PROJECT. Lean ICT: Towards digital sobriety. Disponível em: <https://theshiftproject.org/en/publications/lean-ict/>. Acesso em: 14 jan. 2026.

UNITAR. The global E-waste Monitor 2024 – Electronic Waste Rising Five Times Faster than Documented E-waste Recycling: UN. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/>. Acesso em: 14 jan. 2026.

Autores

Vinicius Franco de Oliveira

Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas, Universidade Estadual de Maringá.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001



www.meridapublishers.com