

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 CO_2 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 CO_2 para a atmosfera, exerce influência direta sobre o balanço global de carbono. Assim, as alterações bioquímicas induzidas pelo CO_2 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 CO_2 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.