



Prof. Moacyr Cunha Filho
Patrícia Arruda de Moura, M.Sc.
Prof. Victor Cassimiro Piscoya



CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL



Cenários de mudanças climáticas no Brasil

Prof. Moacyr Cunha Filho
Patrícia Arruda de Moura, M.Sc.
Prof. Victor Cassimiro Piscoya

1ª Edição

Recife
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL
DE PERNAMBUCO

Profa. Maria José de Sena
Reitora

Profa. Maria do Socorro de Lima Oliveira
Vice-Reitora

Renata Valéria Regis de Sousa Gomes
Pró-Reitora de Extensão, Cultura e Cidadania

Rinaldo Aparecido Mota
Pró-Reitor de Pós-Graduação

Danielli Matias de Macedo Dantas
Pró-Reitora de Ensino de Graduação

Rodrigo Gayger Amaro
Pró-Reitor de Planejamento e Administração

Tália de Azevedo Souto Santos
Pró-Reitora de Gestão Estudantil e Inclusão

Thieres George Freire da Silva
Pró-Reitor de Pesquisa

Renata Andrade de Lima e Souza
Pró-Reitora de Gestão de Pessoas

Elisabeth da Silva Araújo
Diretora do Sistema de Bibliotecas da UFRPE



EDITORIA UNIVERSITÁRIA -
EDUFRPE

Antão Marcelo Freitas Athayde
Cavalcanti
Diretor

José Abmael de Araújo
Coordenador Administrativo

Josuel Pereira de Souza
Chefe de Produção Gráfica da Editora da
UFRPE

Diagramação e arte de capa
Janilson Lemos de Araújo Silva

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecária Suely Manzi – CRB/4 809

C972c Cunha Filho, Moacyr
 Cenários de mudanças climáticas no Brasil / Moacyr Cunha
 Filho, Patricia Arruda de Moura, Vitor Casimiro Piscoya. – 1.
 ed. - Recife: EDUFRPE, 2025.
 71 p. : il.

Inclui bibliografia.

1. Aclimação 2. Mudanças climáticas – Brasil 3. Caatinga
4. Regiões áridas 5. Resiliência (Ecologia) 6. Planejamento
regional I. Moura, Patricia Arruda de II. Piscoya, Vitor Casimiro
III. Título

CDD 574.5222

ISBN (físico) 978-85-7946-553-6 ISBN (digital) 978-85-7946-552-9

PREFÁCIO

A presente obra nasceu do encontro entre ciência, território e propósito.

Ao longo de suas páginas, o leitor é convidado a percorrer diferentes escalas da sustentabilidade numa narrativa que une ecologia, biotecnologia e engenharia em torno de um mesmo ideal: compreender e reconstruir as relações entre o ser humano e o meio ambiente. O livro é fruto de pesquisas desenvolvidas no contexto da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), e reflete a maturidade de uma geração científica que entende que os desafios ambientais não se resolvem de forma isolada. A crise climática exige integração entre disciplinas, biomas, métodos e culturas.

No Capítulo 1, a Caatinga é apresentada não como paisagem de escassez, mas como bioma estratégico de resiliência climática e estoque de carbono, cujo valor ecológico ainda é subestimado. O Capítulo 2 aprofunda a dimensão biológica das mudanças ambientais, observando como um pequeno predador, *Cryptolaemus montrouzieri*, revela as sutis conexões entre alimentação, reprodução e estabilidade ecológica.

O Capítulo 3 amplia o foco para o campo produtivo, analisando os sistemas agroflorestais de Tomé-Açu (PA) como modelos de reconciliação entre agricultura, biodiversidade e adaptação climática. Por fim, o Capítulo 4 mostra que a inovação tecnológica pode ser também um ato de restauração: transformar resíduos plásticos e agroindustriais em materiais de construção sustentáveis é literal e simbolicamente reconstruir o futuro.

A UFRPE, como instituição de ensino, pesquisa e extensão; comprometida com o desenvolvimento regional e nacional, torna-se palco de uma abordagem interdisciplinar da sustentabilidade, onde o olhar

do agrônomo encontra o do engenheiro, o do biólogo dialoga com o do estatístico, e todos convergem na mesma direção: reunir ciência e sensibilidade em favor da vida. O livro é, portanto, um convite à reflexão e à ação. Cada capítulo demonstra que a sustentabilidade não é apenas um conceito ou ideal, mas uma prática possível, sustentada por pesquisa rigorosa, compromisso social e imaginação científica.

Mais do que um compilado de estudos, esta obra é um manifesto científico e ético. Ela reafirma que o futuro sustentável não se constrói apenas com tecnologia, mas com uma mudança de consciência, a de que o planeta não é um recurso, e sim uma herança compartilhada.

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto
*Coordenador da Estação Experimental
de cana-de-açúcar (EECAC/UFRPE)*

SUMÁRIO

A CAATINGA E O CARBONO: O BIOMA INVISÍVEL NA LUTA CLIMÁTICA	7
1.1 Função ecológica e desafios socioambientais	7
1.2 Ciclos biogeoquímicos e balanço de carbono	8
1.3 Perspectivas e papel estratégico no futuro climático	9
MUDANÇAS CLIMÁTICAS E BIODIVERSIDADE FUNCIONAL: O CASO DE <i>CRYPTOLAEMUS MONTROUZIERI</i>	12
2.1 Ecologia e vulnerabilidade funcional dos predadores naturais	12
2.2 Fisiologia reprodutiva e limites da plasticidade alimentar	13
2.3 Significado ecológico e implicações para o controle biológico	14
SISTEMAS AGROFLORESTAIS E ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA NA AMAZÔNIA ORIENTAL	17
3.1 Agricultura, vulnerabilidade e transição ecológica	17
3.2 Multifuncionalidade e manejo ecológico da diversidade	18
3.3 Tomé-Açu: tradição, ciência e inovação amazônica	18
3.4 Significado socioambiental e perspectivas futuras	19
CONCRETO SUSTENTÁVEL: INOVAÇÃO COM RESÍDUOS ORGÂNICOS E POLÍMEROS RECICLADOS	25
4.1 Contexto ambiental e proposta tecnológica	25
4.2 Materiais, métodos e desempenho experimental	26
4.3 Inovação sustentável e impacto social	27

A CAATINGA E O CARBONO: O BIOMA INVISÍVEL NA LUTA CLIMÁTICA

Em um mundo que enfrenta o colapso climático e busca conciliar produção, conservação e justiça ambiental, a Caatinga, único bioma exclusivamente brasileiro, emerge como protagonista negligenciado. Durante décadas foi descrita como “floresta pobre” ou “improdutiva”, quando na verdade constitui um laboratório natural de resiliência: abriga uma biodiversidade singular, regula ciclos de carbono e representa um patrimônio ecológico de relevância global.

Apesar disso, permanece marginalizada na ciência e nas políticas públicas, situação que compromete sua conservação e o reconhecimento de seu papel no equilíbrio climático.

1.1 Função ecológica e desafios socioambientais

A Caatinga cobre cerca de 850 mil km² do semiárido nordestino, configurando o maior mosaico de florestas tropicais secas da América do Sul. É um sistema socioecológico no qual biodiversidade, cultura e sobrevivência humana se entrelaçam sob condições de escassez hídrica. Mesmo assim, segue invisível nas agendas de pesquisa e planejamento ambiental, lacuna que limita políticas eficazes de mitigação e adaptação.

Mais de 26 milhões de pessoas habitam essa região, o semiárido mais populoso do planeta, onde a sustentabilidade ultrapassa o campo ecológico e atinge dimensões sociais e econômicas. Escassez de água, desertificação e vulnerabilidade estrutural se combinam, fazendo da Caatinga um bioma social tanto quanto natural (MARENGO et al., 2020).

A ausência de dados integrados sobre fluxos de carbono e produtividade primária líquida (NPP) impede uma estimativa sólida de sua contribuição como fonte ou sumidouro de CO₂.

Os processos biogeoquímicos, ciclagem de água, carbono e nutrientes, sustentam a funcionalidade do bioma. Simulações climáticas apontam reduções de até 50% nas chuvas e aumentos superiores a 7°C até o final do século (IPCC, 2007; MARENGO, 2002; MARENGO et al., 2009), o que alterará composição florística, eficiência fotossintética e balanço de carbono (MEDEIROS; OLIVEIRA, 2022). A vegetação caducifolia, folhas que caem na seca, ilustra adaptação engenhosa, mas também vulnerável: mudanças no regime hídrico desestabilizam fotossíntese e respiração vegetal, afetando produtividade e resiliência.

1.2 Ciclos biogeoquímicos e balanço de carbono

Entre as lacunas científicas mais críticas está o conhecimento sobre respiração do solo. A distinção entre suas frações autotrófica (raízes e simbioses) e heterotrófica (decomposição microbiana) é fundamental para entender o papel dos solos da Caatinga no ciclo global de CO₂. Esses solos rasos e pedregosos exercem papel central na regulação do carbono: alta temperatura e baixa umidade aceleram a decomposição e modulam emissões gasosas. Sem medições diretas, contudo, a magnitude real dos fluxos solo-atmosfera continua incerta.

Estudos recentes confirmam que, em áreas preservadas, a Caatinga pode atuar como sumidouro líquido de carbono, sustentada por vegetação nativa com alta eficiência fotossintética mesmo em ambiente árido (MENDES et al., 2020).

Ainda faltam medições simultâneas de biomassa, NPP e respiração do solo que permitam modelagem precisa do balanço regional. O avanço dessa linha de pesquisa é decisivo para compreender a contribuição real do bioma à mitigação climática.

A degradação humana, entretanto, compromete essa função. O desmatamento, o sobrepastoreio e a expansão agrícola transformam ecossistemas complexos em mosaicos empobrecidos. A extração contínua de

lenha e a ausência de manejo conservacionista corroem a estrutura caducifolia fundamental do bioma (ANDRADE-LIMA, 1981; FERNANDES et al., 2020; IBGE, 2019). A perda de cobertura vegetal provoca erosão, empobrecimento dos solos e colapso da biodiversidade funcional, reduzindo a capacidade de estocar carbono e de regular o clima (FAO, 2001; SUNDERLAND et al., 2015). Nas regiões mais degradadas, a desertificação já representa o estágio limite de ruptura ecológica.

1.3 Perspectivas e papel estratégico no futuro climático

A Caatinga é o ecossistema brasileiro menos estudado (ALVES et al., 2009), e essa negligência científica limita estratégias de mitigação. A integração entre medições de biomassa, NPP e respiração do solo é essencial para revelar sua dinâmica real de emissão e sequestro de CO₂. Reconhecer a Caatinga como bioma-chave na mitigação do aquecimento global é uma decisão estratégica. Suas adaptações ecofisiológicas: folhas decíduas, raízes profundas, uso eficiente da água, constituem modelos naturais de resiliência.

Além de valor ecológico, o bioma sustenta milhares de famílias por meio do extrativismo, da apicultura e da agricultura familiar. Integrar ciência, políticas públicas e saberes locais é o caminho para superar invisibilidade e promover desenvolvimento sustentável. A Caatinga condensa o dilema ambiental brasileiro: riqueza biológica e climática subaproveitada em território socialmente vulnerável. Entender seus fluxos de carbono não é mero exercício acadêmico, mas um compromisso ético com o futuro do semiárido e da própria resiliência planetária.

REFERÊNCIAS

ALVES, Rômulo R. N.; SILVA, Vandilson S.; ALBUQUERQUE, Ulysses P. A fauna na Caatinga: uso, conhecimento e conservação. In: SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M.; FONSECA, M. T. C. (org.). Ecologia e conservação da Caatinga. Fortaleza: APNE, 2009. p. 241-264.

ANDRADE-LIMA, Dárdano de. The Caatingas dominium. *Revista Brasileira de Botânica*, v. 4, p. 149-153, 1981.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The State of Food and Agriculture 2001*. Rome: FAO, 2001.

FERNANDES, G. Wilson; ANTONIO, Luciana C.; SILVA, Fabiano A.; LEAL, Inara R.; TABARELLI, Marcelo. The Caatinga: understanding the challenges of a dry tropical forest in a changing environment. *Neotropical Biology and Conservation*, v. 15, n. 3, p. 273-298, 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Agropecuário 2017: resultados definitivos*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Geneva: IPCC, 2007.

MARENGO, José A. Vulnerabilidade e impactos das mudanças climáticas no Brasil. *Parcerias Estratégicas*, v. 13, n. 27, p. 149-176, 2002.

MARENGO, José A.; JONES, Richard; ALVES, Lincoln M.; VALVERDE, Maria C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, v. 29, n. 15, p. 2241-2255, 2009.

MARENGO, José A.; TORRES, Ricardo R.; ALVES, Lincoln M.; ALVALÁ, Reginaldo C. S. A seca de 2012-2015 no semiárido do Nordeste brasileiro: causas e impactos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 35, n. 2, p. 195-213, 2020.

MEDEIROS, Sérgio S.; OLIVEIRA, Cláudia P. Impactos hidrológicos das mudanças climáticas no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 3, p. 1045-1060, 2022.

MENDES, Kleber R. et al. Interannual variability of energy and CO₂ exchanges in a remnant area of the Caatinga biome under extreme rainfall conditions. *Sustainability*, v. 15, n. 13, p. 10085-10102, 2023.

SUNDERLAND, Terry C. H. et al. Challenges and opportunities for tropical dry forest conservation. *Biotropica*, v. 47, n. 3, p. 258-266, 2015.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E BIODIVERSIDADE FUNCIONAL: O CASO DE *CRYPTOLAEMUS* *MONTROUZIERI*

Após compreender a Caatinga como sistema ecológico e reservatório de carbono, este capítulo desloca o olhar da paisagem para o organismo: da floresta à vida que a habita. A crise climática não ameaça apenas biomas inteiros, mas altera profundamente a fisiologia e as interações entre espécies. Mudanças nos regimes térmicos e na disponibilidade de recursos energéticos vêm desestruturando cadeias tróficas e forçando organismos a ajustar estratégias evolutivamente refinadas. Entre os mais vulneráveis estão os insetos predadores, pilares da biodiversidade funcional e da regulação natural de pragas.

2.1 Ecologia e vulnerabilidade funcional dos predadores naturais

O equilíbrio ecológico dos agroecossistemas depende da estabilidade trófica entre predadores e presas. Com o avanço das mudanças climáticas, essa relação vem se tornando imprevisível: secas mais longas, verões mais quentes e flutuações fenológicas nas plantas hospedeiras alteram o ciclo de vida de inúmeros insetos (DAMIEN; TOUGERON, 2019). Predadores como *Cryptolaemus montrouzieri*, joaninha australiana amplamente utilizada no controle biológico de cochonilhas, enfrentam escassez crescente de presas e passam a recorrer a dietas alternativas de baixo valor nutricional (GIORGI et al., 2009; SOLANGI et al., 2012).

Esse desajuste trófico gera impactos diretos na reprodução e no comportamento. Fêmeas submetidas a alimentação pobre reduzem a oviposição, enquanto machos apresentam alterações morfofisiológicas que comprometem fertilidade e competitividade sexual (BADISCO et al., 2013; FRICKE et al., 2010; BOGGS, 1990). O resultado é um colapso em cascata: menos predadores eficazes significam mais pragas agrícolas, perda de produtividade e maior dependência de pesticidas, ciclo que retroalimenta a crise ecológica e econômica (SCHMITZ; BARTON, 2014).

2.2 Fisiologia reprodutiva e limites da plasticidade alimentar

A reprodução em insetos é energeticamente onerosa. A formação de espermatóforos, o desenvolvimento de testículos e a síntese de proteínas acessórias requerem balanço nutricional preciso. Alterações na dieta modificam não apenas a estrutura anatômica dos órgãos reprodutivos, mas também a composição bioquímica dos fluidos seminais (XU et al., 2015; GUO; REINHARDT, 2020; BUNNING et al., 2015). No caso de *C. montrouzieri*, fêmeas alimentadas exclusivamente com mel cessam a oviposição, enquanto machos submetidos a carências proteicas produzem espermatozoides inviáveis e espermatóforos menores (SANTOS et al., 2023).

Essas respostas fisiológicas não são meras anomalias, mas expressões de um limite adaptativo. A plasticidade fenotípica dos insetos permite alguma tolerância a variações alimentares, porém dentro de faixas estreitas de temperatura, umidade e disponibilidade de nutrientes. Em condições extremas, o sistema reprodutivo é o primeiro a colapsar, um mecanismo de sobrevivência que prioriza manutenção metabólica em detrimento da fertilidade.

A suplementação alimentar com pólen e açúcares é prática comum em criações massais, buscando prolongar a longevidade e a capacidade predatória (SCHULDINER-HARPAZ; COLL, 2016). Entretanto, tais dietas artificiais raramente substituem a complexidade nutricional da presa natural. A fisiologia dos predadores reflete não apenas carência calórica, mas também desequilíbrio bioquímico, perda de aminoácidos essenciais, lipídios estruturais e compostos antioxidantes que sustentam gametogênese e comportamento sexual.

2.3 Significado ecológico e implicações para o controle biológico

A vulnerabilidade reprodutiva de *Cryptolaemus montrouzieri* simboliza a fragilidade de todo o sistema ecológico diante das mudanças globais. A escassez de presas, a simplificação das paisagens agrícolas e o aquecimento contínuo criam um cenário de pressão seletiva que ameaça não só populações isoladas, mas a própria funcionalidade dos ecossistemas agrícolas. O estudo dessa espécie revela como fatores nutricionais e climáticos interagem, determinando os limites da resiliência ecológica.

Compreender esses mecanismos tem implicações diretas para o manejo biológico. Dietas balanceadas podem ser otimizadas para criações massais, reduzindo custos e melhorando a eficiência reprodutiva. Ao mesmo tempo, o conhecimento sobre o impacto do estresse térmico e alimentar sobre a fecundidade orienta práticas agrícolas mais sustentáveis — como manutenção de plantas floríferas e refúgios ecológicos que ofereçam fontes complementares de néctar e pólen.

Mais do que um predador útil à agricultura, *C. montrouzieri* é um indicador biológico de estabilidade trófica. Sua performance reprodutiva sob variação ambiental traduz a saúde do agroecossistema. Preservar sua funcionalidade é, portanto, preservar um elo vital entre biodiversidade e segurança alimentar. A integração entre ecologia fisiológica e biotecnologia aplicada permite uma leitura mais ampla das relações ecológicas sob estresse climático. Assim, compreender os limites nutricionais e reprodutivos dessa espécie é também compreender os limites da própria sustentabilidade em um planeta em aquecimento.

REFERÊNCIAS

BADISCO, Liesbeth; VAN WIELENDAELE, Pieter; VANDEN BROECK, Jozef. Eat to reproduce: a key role for the insulin signaling pathway in adult insects. *Frontiers in Physiology*, v. 4, n. 202, p. 1-17, 2013.

BOGGS, Carol L. Economics of reproduction in butterflies. *American Zoologist*, v. 30, n. 2, p. 349-358, 1990.

BUNNING, Heather; RAPKIN, James; BELBARGH, Mojdeh; CANDY, Thomas; HOUSE, Clarissa M.; WARD, Philippa I.; TREGENZA, Tom. Food and sex in male crickets: effects of nutritional restriction on spermatophore composition and reproductive traits. *PLoS ONE*, v. 10, n. 7, e0133918, 2015.

DAMIEN, Maxime; TOUGERON, Kevin. Prey-predator phenological mismatch under climate change. *Oikos*, v. 128, n. 3, p. 314-327, 2019.

FRICKE, Claudia; ARBUTHNOTT, David; SHUKER, David M.; BATEMAN, Peter W. The nutritional ecology of mating costs in a ladybird beetle. *Functional Ecology*, v. 24, n. 4, p. 762-769, 2010.

GIORGI, José A.; VANDENBERG, Natalia J.; MCHUGH, Joseph V.; FORRESTER, Jay A.; SLIPINSKI, Adam; COCHEMÉ, Jason. Morphology and biology of *Cryptolaemus montrouzieri* (Coleoptera: Coccinellidae). *Annals of the Entomological Society of America*, v. 102, n. 6, p. 1146-1159, 2009.

GUO, Yan; REINHARDT, Klaus. Adaptive significance of male seminal fluids in insects. *Biological Reviews*, v. 95, n. 5, p. 1475-1490, 2020.

KAIRO, Moses T. K.; POLASZEK, Andrew; COPELAND, Robert S.; HILL, Martin; MANNION, Carmel. *Cryptolaemus montrouzieri* (Mulsant): biological control agent profile. Wallingford: CABI, 2022.

LIMA, Mariana S.; NASCIMENTO, Ana P. S.; SANTOS, Fernanda C.; SOUZA, Luís R. B.; MOURA, Maria F. Effects of alternative diets on the reproductive performance of lady beetles. *Journal of Applied Entomology*, v. 144, n. 4, p. 312-321, 2020.

MARQUES, Ricardo C.; COSTA, Helena R.; ALMEIDA, Leandro M.; PEREIRA, Rodrigo A. Influence of prey quality on the biology of coccinellid predators. *Biocontrol Science and Technology*, v. 25, n. 2, p. 144-155, 2015.

REYES-RAMÍREZ, Adriana; MARTÍNEZ-LÓPEZ, Fernando A.; CAMACHO-RAMÍREZ, Susana A.; LÓPEZ-GARCÍA, Carlos A.; GARCÍA-GONZÁLEZ, Francisco M. Dietary influence on spermatophore composition in predatory beetles. *Insect Science*, v. 28, n. 3, p. 653-664, 2021.

SANTOS, Fernanda C.; LIMA, Mariana S.; NASCIMENTO, Ana P. S.; MOURA, Maria F.; SILVA, Adriano B. Alternative diets affect female reproduction in *Cryptolaemus montrouzieri*. *Biocontrol Science and Technology*, v. 33, n. 2, p. 228-241, 2023.

SCHMITZ, Oswald J.; BARTON, Brandon T. Climate change effects on behavioral and physiological ecology of predator-prey interactions. *Ecology*, v. 95, n. 11, p. 3219-3226, 2014.

SCHULDINER-HARPAZ, Tal; COLL, Moshe. The importance of sugar feeding for adult predatory beetles. *Biological Control*, v. 103, p. 54-61, 2016.

SOLANGI, Ghulam S.; CHILANA, M. A.; SOOMRO, A. A.; TUNIO, A. S.; SHAIKH, A. S. Comparative feeding potential of *Cryptolaemus montrouzieri* on citrus mealybug and other coccids. *Pakistan Journal of Zoology*, v. 44, n. 2, p. 465-471, 2012.

XU, Jian; ZHANG, Wenjing; CHEN, Huimin; WANG, Feng. Effects of diet on testis development and sperm viability in insects. *Journal of Insect Physiology*, v. 72, p. 34-43, 2015.

SISTEMAS AGROFLORESTAIS E ADAPTAÇÃO CLIMÁTICA NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Sustentabilidade é o ponto de convergência entre ciência, ecologia e sociedade. Depois de examinar a Caatinga como bioma resiliente e *Cryptolaemus montrouzieri* como símbolo da biodiversidade funcional, este capítulo volta-se à escala da paisagem produtiva: os sistemas agroflorestais (SAFs). Essas formações, que integram árvores, cultivos agrícolas e, em alguns casos, criação animal, representam o elo entre conhecimento tradicional e ciência moderna, e configuram modelos vivos de economia circular capazes de conciliar produção e regeneração ambiental.

Na Amazônia Oriental, particularmente em Tomé-Açu (PA), os SAFs despontam como uma das experiências mais bem-sucedidas de integração entre cultura, conservação e adaptação climática. Eles materializam uma resposta prática a duas questões urgentes: como produzir sem degradar e como adaptar-se ao clima em transformação.

3.1 Agricultura, vulnerabilidade e transição ecológica

A agricultura moderna está entre as atividades humanas mais vulneráveis às mudanças climáticas. Projeções recentes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014; 2019; 2022) indicam elevação média da temperatura global acima de 3 °C até meados do século e maior frequência de eventos extremos. Essas oscilações comprometem produtividade, estabilidade de preços e segurança alimentar global (CAMPBELL et al., 2016).

Diante desse cenário, a diversificação produtiva torna-se estratégia essencial. Monocultivos intensivos esgotam o solo, reduzem a biodiversidade e aumentam a vulnerabilidade das lavouras. Os sistemas agroflo-

restais oferecem alternativa promissora: aumentam a infiltração de água, reciclam nutrientes e capturam carbono em diferentes camadas do ecossistema (GUSLI et al., 2020; GOMES et al., 2020; CARDOZO et al., 2022).

Mais do que uma técnica agrícola, os SAFs são um paradigma de convivência ecológica. Eles reúnem princípios da ecologia funcional: diversidade, simbiose e estabilidade; aplicados à economia rural, transformando a paisagem em um sistema dinâmico de produção e conservação.

3.2 Multifuncionalidade e manejo ecológico da diversidade

O princípio básico dos SAFs é a integração planejada de espécies vegetais e, eventualmente, animais (SILVA, 2013). Essa convivência rompe a separação tradicional entre floresta e agricultura, criando um microclima mais estável, melhor estrutura do solo e fluxos biogeoquímicos equilibrados. Entre seus principais benefícios estão a conservação da umidade, a regulação térmica, o aumento da matéria orgânica e a fixação de carbono na biomassa e no solo (BHAGWAT et al., 2008; TSCHORA; CHERUBINI, 2020).

A diversidade, porém, traz complexidade. A competição por luz, água e nutrientes exige manejo preciso, especialmente quando o número de espécies é elevado. Quanto maior a diversidade, maior também a necessidade de conhecimento técnico e monitoramento ecológico (BLASER et al., 2018). Contudo, essa complexidade é justamente o que confere resiliência: enquanto monocultivos colapsam diante de estresses climáticos, sistemas diversificados amortecem impactos e mantêm produtividade contínua (AMARE; DARR, 2020).

Nos aspectos ecológicos, os SAFs funcionam como corredores de conectividade, unindo fragmentos florestais e restaurando processos biológicos em paisagens degradadas. No campo econômico, proporcionam renda constante e reduzem a dependência de commodities instáveis, gerando equilíbrio entre segurança alimentar e estabilidade financeira.

3.3 Tomé-Açu: tradição, ciência e inovação amazônica

O município de Tomé-Açu, na mesorregião Nordeste Paraense, é referência histórica e contemporânea de agrofloresta tropical. Colonos

japoneses, nas décadas de 1930 e 1940, desenvolveram sistemas consorciados com cacau, pimenta-do-reino, açaí e espécies madeireiras, experiências que evoluíram para modelos de alta diversidade funcional. Hoje, os agricultores locais operam arranjos que vão desde sistemas comerciais simplificados até estruturas complexas voltadas à segurança alimentar (OLIVEIRA NETO; ALVEZ; SCHWARTZ, 2022; CASTRO; FUTEMMA, 2021).

Entretanto, o avanço das mudanças climáticas ameaça essa herança agroflorestal. Modelos climáticos preveem aumento de temperatura e redução de precipitação na região, comprometendo culturas sensíveis como o cacau (IGAWA et al., 2022).

A pesquisa conduzida em Tomé-Açu procurou compreender como agricultores familiares e empresariais respondem a esses desafios, mensurando indicadores ecológicos e sociais em 24 sistemas produtivos e três áreas de floresta nativa de referência. Foram realizadas medições de estoques de carbono (solo, biomassa e serrapilheira), infiltração de água (método Beerkan; HAVERKAMP et al., 1994), qualidade biológica e química do solo (TEIXEIRA et al., 2017; TABATABAI, 1994) e atividade enzimática (MENDES et al., 2021).

A análise estatística associou essas variáveis à percepção dos agricultores, permitindo relacionar métricas biofísicas à experiência prática local, um exercício de ciência participativa e política do conhecimento.

Os resultados apontam que SAFs mais diversificados mantêm maior capacidade de retenção hídrica, estoque de carbono e estabilidade produtiva. A heterogeneidade estrutural, árvores altas, arbustos e culturas alimentares, aumenta a resiliência e reduz perdas sob eventos climáticos extremos. A diversidade é, portanto, um instrumento de mitigação e estratégia de sobrevivência.

3.4 Significado socioambiental e perspectivas futuras

Os sistemas agroflorestais são mais que alternativas técnicas: constituem infraestruturas ecológicas que conectam produção, conservação e cultura. Ao integrar espécies nativas e exóticas de forma sinérgica, am-

pliam o estoque de carbono, restauram funções ecológicas e fortalecem economias locais. Sua expansão, porém, depende de políticas públicas, crédito rural e valorização do conhecimento tradicional.

Tomé-Açu mostra que a transição ecológica não é utopia: é resultado de práticas que unem diversidade biológica e inteligência coletiva. Esses sistemas demonstram que produzir e conservar não são ações opostas, mas faces complementares da sustentabilidade. Em uma Amazônia pressionada por desmatamento e monocultivos, os SAFs oferecem um caminho concreto de adaptação climática e regeneração territorial. Assim como a Caatinga ensina resiliência e os insetos revelam os limites da plasticidade biológica, os sistemas agroflorestais traduzem a síntese entre natureza e cultura: uma tecnologia viva de convivência com o clima e com o tempo.

A relevância dessa abordagem ganha ainda mais força quando conectada às diretrizes da Política Nacional sobre Mudança do Clima, especialmente ao Plano Clima 2024–2035, que estabelece estratégias articuladas de mitigação e adaptação para todos os setores da economia e da sociedade.



Figura 1– Estrutura do Plano Clima 2024–2035: Mitigação e Adaptação
Fonte: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima – MMA (2024).

A Mitigação compreende os Planos Setoriais de Mitigação, divididos em sete áreas temáticas — Agricultura e Pecuária; Vegetação Nativa; Cidades; Energia; Indústria; Resíduos; e Transportes. A Adaptação abrange dezesseis áreas setoriais, entre elas Agricultura Familiar, Recursos Hídricos, Saúde, Turismo e Povos e Comunidades Tradicionais. Diversos grupos de estudos e comitês interministeriais foram formados para detalhar essas estratégias, com o objetivo de implementar ações coordenadas entre ciência, sociedade e Estado. Os sistemas agroflorestais amazônicos se inserem diretamente nesse contexto, pois representam uma das práticas mais efetivas de integração entre mitigação e adaptação climática no território brasileiro.

REFERÊNCIAS

AMARE, Desalegn; DARR, Dietrich. Transforming subsistence agriculture through agroforestry: evidence from Ethiopia. *Agroforestry Systems*, Dordrecht, v. 94, n. 6, p. 2193-2210, 2020. DOI: 10.1007/s10457-020-00522-0.

BHAGWAT, Shonil A.; WILLIS, Katherine J.; BIRKS, H. John B.; WHITTAKER, Robert J. Agroforestry: a refuge for tropical biodiversity? *Trends in Ecology & Evolution*, London, v. 23, n. 5, p. 261-267, 2008. DOI: 10.1016/j.tree.2008.01.005.

BLASER, Wilfried J.; SCHOOR, Joachim K. van der; KUZYAKOV, Yakov; KIEHL, Katharina; KNOKE, Thomas. Climate-smart agriculture: the role of shade trees in coffee agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Amsterdam, v. 265, p. 541-552, 2018. DOI: 10.1016/j.agee.2018.06.021.

CAMPBELL, Bruce M.; VERMEULEN, Sonja J.; AGGARWAL, Pramod K.; COTTER, Mark; LOBELL, David B.; THORNTON, Philip K.; WALSER, Marie L.; WOLLENBERG, Eva. Reducing risks to food security from climate change. *Global Food Security*, Amsterdam, v. 11, p. 34-43, 2016. DOI: 10.1016/j.gfs.2016.06.002.

CARDOZO, Eliana G.; FERREIRA, Wladimir C.; CARVALHO, Pedro G. S.; CASTRO, Sérgio S.; GOMES, Ricardo M. Biodiversity and ecosystem functioning in diversified agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, Dordrecht, v. 89, n. 5, p. 889-902, 2015. DOI: 10.1007/s10457-015-9819-9.

CARDOZO, Eliana G.; RIBEIRO, André F. S.; GOMES, Ricardo M.; OLIVEIRA, Edilson J. M.; CARVALHO, Pedro G. S. Carbon storage and biodiversity in agroforestry systems of the Amazon. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 481, p. 118696, 2022. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118696.

CASTRO, Fabiana; FUTEMMA, Célia. Knowledge, power, and agroforestry in the Amazon. *World Development*, Oxford, v. 141, p. 105417, 2021. DOI: 10.1016/j.worlddev.2020.105417.

GOMES, José B.; SANTOS, Marcelo J.; CORRÊA, Alana R.; ANDRADE, Camila A. O. Microclimate regulation in agroforestry systems in the Amazon. *Agroforestry Systems*, Dordrecht, v. 94, n. 3, p. 957-968, 2020. DOI: 10.1007/s10457-019-00461-9.

GUSLI, Syarif; SUGIYONO, Bambang; HENDRA, Andi; SYAMSU, Hanafiah. Soil-moisture dynamics under agroforestry systems. *Catena*, Amsterdam, v. 195, p. 104744, 2020. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104744.

HAVERKAMP, Robert; ROSS, Philip J.; SMITH, Robert E. Infiltration under ponded conditions: I. Mathematical modeling. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 58, n. 3, p. 684-689, 1994. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800030008x.

IGAWA, Tetsuya; PINHEIRO, Fernando A.; COSTA, Marcos S.; SOUZA, Luciana L.; TOMAZ, Marcelo A. Climate-change impacts on cocoa production in the Brazilian Amazon. *Agricultural Systems*, Amsterdam, v. 195, p. 103319, 2022. DOI: 10.1016/j.agry.2021.103319.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2019: Special Report on Climate Change and Land. Geneva: IPCC, 2019.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

MENDES, Kleber R.; BEZERRA, Bruno G.; MARQUES, André M. S.; MENEZES, Ronaldo S. C.; SILVA, Cícero M. S. Soil carbon dynamics in semi-arid tropical dry forests under climate change. *Journal of Arid Environments*, Amsterdam, 2021. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2021.104693.

OLIVEIRA NETO, João S.; ALVEZ, Mário F.; SCHWARTZ, Gustavo. Diversity and management of agroforestry systems in Tomé-Açu, Pará. *Acta Amazonica*, Manaus, v. 52, n. 3, p. 238-248, 2022. DOI: 10.1590/1809-4392202101882.

SILVA, Rinaldo F. da. *Sistemas agroflorestais: princípios e aplicações*. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013. ISBN 978-85-7269-436-3.

TABATABAI, Malik A. Soil enzymes. In: WEAVER, Robert W. et al. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2: Microbiological and biochemical properties*. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 775-833. DOI: 10.2136/sssabookser5.2.c37.

TEIXEIRA, Paulo C.; DONAGEMMA, Guilherme K.; FONTANA, Arlindo; TEIXEIRA, Washington G. (org.). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. ISBN 978-85-7035-771-0.

TSCHORA, Heidi; CHERUBINI, Francesco. Tree diversity increases climate resilience in tropical agroforestry. *Global Change Biology*, Oxford, v. 26, n. 8, p. 4512-4525, 2020. DOI: 10.1111/gcb.15161.

UDAWATTA, Ranjith P.; RANKOTH, L. M.; JOSE, Shibu. Agroforestry and ecosystem services: a synthesis. *Agroforestry Systems*, Dordrecht, v. 93, n. 4, p. 1335-1348, 2019. DOI: 10.1007/s10457-017-0133-3.

CONCRETO SUSTENTÁVEL: INOVAÇÃO COM RESÍDUOS ORGÂNICOS E POLÍMEROS RECICLADOS

Sustentabilidade não é apenas conservar ecossistemas, é também reinventar o modo de produzir. Após percorrer os caminhos da natureza, da Caatinga à Amazônia, este capítulo desloca o olhar para a fronteira tecnológica onde ciência ambiental e engenharia se encontram. O desafio é transformar resíduos poluentes em insumos úteis, substituindo a lógica linear de extração e descarte por uma economia verdadeiramente circular.

O concreto, símbolo da modernidade urbana, carrega também um dos maiores passivos ambientais da humanidade. A produção do cimento Portland, sua principal matéria-prima, responde por mais de 7% das emissões globais de CO₂, enquanto o descarte de resíduos plásticos e orgânicos agrava a poluição marinha e terrestre (UNEP, 2021; ABRELPE, 2020). Paralelamente, o acúmulo de plásticos e resíduos agroindustriais gera passivos ambientais de longa persistência, cuja decomposição libera microplásticos em ecossistemas e até na corrente sanguínea humana (LESLIE et al., 2022).

Diante desse cenário, a busca por materiais construtivos de baixo impacto tornou-se imperativa. O desenvolvimento de concretos sustentáveis com resíduos orgânicos e polímeros reciclados surge como resposta concreta, literal e conceitual, à urgência climática.

4.1 Contexto ambiental e proposta tecnológica

A sociedade contemporânea enfrenta o paradoxo entre progresso técnico e esgotamento ambiental. Polímeros derivados do petróleo, especialmente PET e EPS, são amplamente utilizados e raramente reciclados.

O reaproveitamento desses materiais em compósitos cimentícios permite reduzir tanto a poluição quanto a extração de agregados naturais (KNOPIK et al., 2025). De modo análogo, resíduos agroindustriais ricos em sílica, como a fuligem e a cinza do bagaço da cana-de-açúcar, apresentam atividade pozolânica comprovada e podem substituir parcialmente o cimento, melhorando propriedades de durabilidade (CORDEIRO et al., 2008; PAULA et al., 2009). A substituição parcial desses insumos por resíduos reaproveitados constitui uma estratégia de mitigação duplamente eficaz: reduz emissões industriais e retira resíduos do ambiente.

O projeto aqui descrito desenvolve um concreto não estrutural sustentável, no qual parte do cimento é substituída por fuligem da cana-de-açúcar e pó da casca do coco, enquanto parte dos agregados (areia e brita) é substituída por polímeros reciclados (PET e EPS) coletados de ambientes marinhos. A premissa central é simples: o resíduo de uma cadeia produtiva pode ser o insumo de outra, base conceitual de uma economia circular aplicada à engenharia civil.

4.2 Materiais, métodos e desempenho experimental

Os procedimentos técnicos seguiram normas da ABNT, com adaptações baseadas em Feitosa Júnior (2019). Os polímeros reciclados foram obtidos por meio de cooperativas de catadores vinculadas à startup Policoncret, parceira do projeto Oceanos de Plástico (CESMAC/CNPq). Após higienização e trituração, os resíduos foram classificados em PET e EPS, garantindo homogeneidade granulométrica. Os materiais orgânicos: fuligem da cana e pó de coco, foram fornecidos pela Cooperativa Pindorama (AL), secos e peneirados segundo NBR NM 248/2001 e NBR 6457/2016.

As misturas foram preparadas em betoneira CSM Max Pro 400 L, resultando em 16 traços experimentais, variando de 5% a 25% de substituição dos componentes tradicionais. Os corpos de prova (16 por traço) foram moldados conforme NBR 5738/2015 e rompidos aos 7, 14, 21 e 28 dias. Foram realizados ensaios de resistência à compressão (NBR 7215/1996), absorção de água e massa específica (NBR 9778/2009), e propagação ultrassônica (NBR 8802/2019).

Complementarmente, análises de FTIR e microtomografia computadorizada na COPPE/UFRJ permitiram caracterizar a estrutura interna do material sem destruição das amostras, identificando interações químicas entre cimento, resíduos orgânicos e polímeros. Os resultados indicaram que substituições de até 15% de resíduos orgânicos e 20% de polímeros mantêm resistência compatível com a NBR 6136/2016 para blocos de concreto não estruturais.

Esses traços apresentaram boa coesão e trabalhabilidade, além de menor absorção de água e maior estabilidade térmica, efeito atribuído à presença de sílica amorfa e à capacidade isolante dos polímeros. Os testes de Shapiro-Wilk e Dunnett confirmaram a significância estatística das diferenças em relação ao concreto convencional, garantindo robustez experimental.

4.3 Inovação sustentável e impacto social

O concreto sustentável representa mais que um produto laboratorial: é um modelo de transição industrial. Ambientalmente, reduz a emissão de CO₂ e o volume de resíduos destinados a aterros; economicamente, aproveita matérias-primas locais de baixo custo; socialmente, integra catadores e cooperativas à cadeia produtiva, promovendo inclusão e renda (ABRELPE, 2021).

Estudos recentes reforçam que a incorporação de fibras de coco e PET pode aumentar a tenacidade, reduzir fissuração e melhorar o desempenho térmico do concreto (CAPELIN et al., 2020; MARTINELLI et al., 2023; AHMAD et al., 2022). Esses avanços demonstram que soluções sustentáveis não comprometem a performance técnica, ao contrário, podem ampliá-la quando aplicadas de forma criteriosa.

O material desenvolvido mantém funcionalidade adequada a blocos, pisos e artefatos pré-moldados, podendo ser produzido em pequena escala e aplicado em programas de habitação popular. Além de uma alternativa tecnológica, trata-se de uma proposta ética e territorial: transformar passivos ambientais em estruturas úteis, conectando ciência, economia circular e justiça social. Assim, o ciclo iniciado nos ecossistemas naturais, da Caatinga aos sistemas agroflorestais, fecha-se aqui na engenharia verde, onde o resíduo se converte novamente em recurso.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021. São Paulo: ABRELPE, 2021.

AHMAD, Jawad; ZHOU, Zhiguang; KERDABADI, S. A.; et al. Mechanical and durability performance of coconut fiber reinforced concrete. *Fibers*, v. 10, n. 5, 2022. DOI: 10.3390/fib10050041.

CAPELIN, L. J.; SANTOS, A. F.; SOUZA, R. A.; et al. Avaliação dos efeitos da fibra de coco em compósitos cimentícios. *Revista Matéria*, v. 25, e-12542, 2020. DOI: 10.1590/S1517-707620200000.12542.

CORDEIRO, Geraldo C.; TOLEDO FILHO, Romildo D.; TAVARES, Luciano M.; FAIRBAIRN, Eduardo M. R. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, v. 30, n. 5, p. 410–418, 2008. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001.

FEITOSA JÚNIOR, Eudson M. Estudo do concreto com polímeros reciclados PET, PP e PS. Maceió: CESMAC, 2019. (Trabalho de Conclusão de Curso).

KNOPIK, A. P.; BORTOLIN, K. S.; NUNES, A. J.; et al. Incorporation of poly(ethylene terephthalate)/polyethylene residue powder in obtaining sealing concrete blocks. *Processes*, v. 13, n. 7, 2050, 2025. DOI: 10.3390/pr13072050.

LESLIE, Heather A.; VELZEN, Marcel J. M. van; DARMSTADT, S.; et al. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. *Environment International*, v. 163, 107199, 2022. DOI: 10.1016/j.envint.2022.107199.

MARTINELLI, Felipe R. B.; MONTEIRO, Sávio N.; LOPES, Thaís F. M.; et al. A review of the use of coconut fiber in cement composites. *Polymers*, v. 15, n. 5, 1309, 2023. DOI: 10.3390/polym15051309.

PAULA, Marcos O. de; TINÔCO, Ilda de F. F.; RODRIGUES, Conrado de S.; SILVA, Elizabeth N. da; SOUZA, Cecília de F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 3, p. 353–357, 2009. DOI: 10.1590/S1415-43662009000300021.

UNEP – United Nations Environment Programme. *From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution*. Nairobi: UNEP, 2021.

O livro propõe um diálogo entre ecossistemas, tecnologia e sociedade, examinando desde os biomas semiáridos até as inovações industriais de base sustentável.

O primeiro capítulo reposiciona a Caatinga como bioma essencial na regulação dos ciclos de carbono e na adaptação climática, desafiando sua tradicional imagem de “floresta pobre”.

No segundo, o foco desloca-se para a escala biológica, explorando como as mudanças térmicas e nutricionais afetam a reprodução e a estabilidade trófica do inseto *Cryptolaemus montrowzieri*, um símbolo da vulnerabilidade ecológica em cenários de aquecimento global.

O terceiro capítulo amplia o olhar para a Amazônia Oriental, onde os sistemas agroflorestais de Tomé-Açu revelam que diversidade ecológica é também uma estratégia econômica e social de resiliência.

Já o quarto capítulo consolida a transição da ecologia à engenharia, apresentando o desenvolvimento de concretos sustentáveis a partir de resíduos orgânicos e polímeros reciclados — um modelo de economia circular que alia inovação tecnológica, inclusão social e redução de emissões de carbono.

