AMAZONFACE

Plano Científico 2025-2029

Analisando os efeitos do aumento de CO_2 atmosférico na ecologia e resiliência da Floresta Amazônica



AMAZONFACE

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

AMAZONFACE

Analisando os efeitos do aumento de CO_2 atmosférico na ecologia e resiliência da Floresta Amazônica

PLANO CIENTÍFICO 2025-2029

Autores principais e coordenadores:
David M. Lapola, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Brasil
Iain P. Hartley, Universidade de Exeter, Reino Unido
Richard Norby, Universidade de Birmingham, Reino Unido
Carlos A. N. Quesada, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Brasil

Autores principais:
Adriane Esquivel-Muelbert - Univ. Birmingham, Reino Unido
Anja Rammig - TUM, Alemanha
Bruno Takeshi T. Portela - INPA, Brasil
Carolina Blanco - Unicamp, Brasil
Flavia Santana - INPA, Brasil
Iokanam S. Pereira - INPA, Brasil
Izabela Aleixo - INPA, Brasil
Katrin Fleischer - Universidade Livre Amsterdã, Holanda
Laynara F. Lugli - TUM, Alemanha
Lucia Fuchslueger - Univ. Viena, Áustria
Lucy Rowland - Univ. Exeter, Reino Unido
Maíra C. G. Padgurschi - CNPEM, Brasil
Marko S. Monteiro - Unicamp, Brasil
Sabrina Garcia - INPA, Brasil
Tomas F. Domingues - USP, Brasil

Autores contribuintes:
Adriana Alcântara - Embaixada do Reino Unido, Brasil
Aline Radaelli - UFRGS, Brasil
Amanda Damasceno – INPA, Brasil
Anna Carolina Martins - INPA, Brasil
Andy Wiltshire - MetOffice, Reino Unido
Bárbara R. Cardeli - Unicamp, Brasil
Bart Kruijt - Univ. Wageningen, Holanda
Bianca F. Rius - Unicamp, Brasil
Bruna Lima – INPA, Brasil
Crisvaldo Cassio Souza - INPA, Brasil
Eráclito Sousa Neto - Unicamp, Brasil
Florian Hofhansl - IIASA, Áustria
Gabriela Sophia - Instituto Max Planck de Biogeoquímica, Alemanha
Gustavo Spanner - INPA, Brasil

Joe Davies - MetOffice, Brasil
Juliana Schietti - UFAM, Brasil
Juliane Pyres - INPA, Brasil
Keith Lewin - MetOffice, RU
Leonardo R. de Oliveira - INPA, Brasil
Leonor Patrícia C. Morelatto - Unesp, Brasil
Lina Mercado - Univ. Exeter, RU
Maria Clara Ferreira Guimarães - Unicamp, Brasil
Maria Juliana Monte - INPA, Brasil
Martin De Kauwe - Univ. Bristol, RU
Moara C. Teixeira - INPA, Brasil
Nathielly P. Martins - TUM, Alemanha
Richard Betts - MetOffice, RU
Roberta Souza - INPA, Brasil
Sara A. Andrade - Unicamp, Brasil
Simone Vieira - Unicamp, Brasil
Tiago Jacaúna - UFAM, Brasil
Thorsten Grams - TUM, Alemanha

Revisado por:
Maria Clara Ferreira Guimarães
Matheus Schwab
Luciana Cafasso
Raphael Alves Silva

Traduzido por:
Luciana Cafasso
Maria Clara Ferreira Guimarães

Design por:
Felipe Furlan
Fábio Palomo

Foto de capa por:
Bruno Takeshi T. Portela

Um programa Científico:

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
GOVERNO DO BRASIL DO LADO DO POVO BRASILEIRO

Coordenação Científica:

INPA INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA
UNICAMP
Met Office

Financiamento:

UK Government
FAPESP
CNPq
Finep INOVAÇÃO E PESQUISA
FNDCT
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
GOVERNO DO BRASIL DO LADO DO POVO BRASILEIRO

Um projeto científico:

Créditos de fotos:
Páginas 5, 8, 9, 12, 15, 16, 18, 21, 22, 24, 25, 27, 28, 30, 31, 36, 37, 40, 44, 45, 49, 52, 56, 57, 59, 60, 62, 64, 66 por João M Rosa
Páginas 6, 14, 67 Jackson Figueiredo
Páginas 7, 33, 63, 69 Maria Clara Ferreira Guimarães
Páginas 20, 26, 38 Dado Galdieri
Páginas 34 por Maria Juliana Monte
Páginas 17, 68 por Arquivo AmazonFACE
Foto de apêndice por Paulo Bittencourt

AMAZONFACE

Catalogação na Publicação
Ficha Catalográfica elaborada pelo Autor

A489 AmazonFace: 2025-2023 Science Plan / David M. Lapola, Iain P. Hartley, Richard Norby, Carlos A. N. Quesada - Brasília:- MCTI, 2014.

71p. : il. color.

ISBN :

1. Tropical forest ecology. 2. Climate change. 3. CO_2 fertilization effect. I. Lapola, David M. II. Hartley, Iain P. III. Norby, Richard. IV. Quesada, Carlos A. N.

DD 577.3

Suggested citation: Lapola, D.M., I.P. Hartley, R. Norby, C.A.N. Quesada, A. Esquivel-Muelbert, A. Rammig, B.T.T. Portela, C. Blanco, F. Santana, I.S. Pereira, I. Aleixo, K. Fleischer, L.F. Lugli, L. Fuchslueger, L. Rowland, M.C.G. Padgurschi, M.S. Monteiro, S. Garcia, T.F. Domingues. (2024). AmazonFACE: Assessing the effects of increased atmospheric CO_2 on the ecology and resilience of the Amazon forest - 2025-2030 Science Plan. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, Brasília, DF, Brazil. 92p.

DOI 10.5281/zenodo.13693335.

AMAZONFACE

Sumário

1. *Prefácio* 5
2. *Sumário executivo* 6
3. *Introdução: as bases científicas* 8
   - 3.1. Aumento de CO_2 atmosférico, mudanças climáticas e Amazônia 8
   - 3.2. Lacunas de conhecimento sobre as respostas das florestas tropicais à elevação de CO_2 10
   - 3.3. Por que precisamos de um experimento FACE na Amazônia? 13
4. *Objetivos e principais questões de pesquisa* 15
5. *Resultados esperados e impactos gerais* 16
6. *Histórico (2011-2024)* 17
7. *Resumo dos resultados iniciais* 17
   - 7.1. Fotossíntese e condutância estomática 18
   - 7.2. Biomassa acima do solo 19
   - 7.3. Produção de folhas e raízes finas 21
   - 7.4. Produção Primária Líquida (NPP) 22
   - 7.5. Distribuição da profundidade das raízes 23
   - 7.6. Composição de nutrientes do solo e dinâmicas microbiais do solo 25
   - 7.7. Efeitos de eCO_2 nos sub-bosques da floresta 26
   - 7.8. Modelagem de ecossistemas 27
   - 7.9. Impactos socioeconômicos do ponto de não-retorno da Amazônia 28
   - 7.10. Serviços ecossistêmicos e adaptação a mudanças climáticas 28
8. *Campo experimental do AmazonFACE* 31
   - 8.1. Área de estudo e infraestrutura de apoio 31
   - 8.2. Tecnologia FACE 33
   - 8.3. Guindastes e torres 34
   - 8.4. Design do experimento 35
   - 8.5. Medidas meteorológicas 36
   - 8.6. Demanda e provisão de CO_2 37
   - 8.7. Câmaras de Topo Aberto 38
9. *Áreas de Pesquisa* 40
   - 9.1. Carbono 40
   - 9.2. Nutrientes 45
   - 9.3. Água 49
   - 9.4. Biodiversidade 52
   - 9.5. Socioambiental 57
   - 9.6. Modelagem 60
10. *Integração e síntese de Dados* 62
11. *Comunicação e divulgação* 64
12. *Proposta de Cronograma* 65
13. *Impactos externos e controle* 66
14. *Organização institucional e interações com outros projetos* 68
15. *Estrutura organizacional* 69
16. *Código de Conduta e Política de Dados* 70
17. *Referências* 71
18. *Apêndice 1.* 80

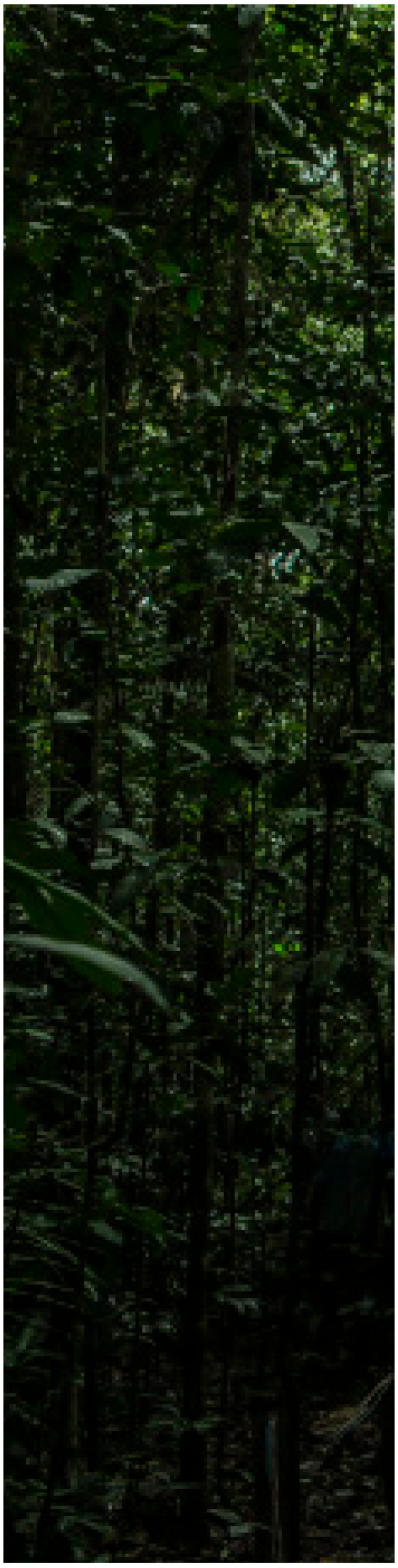
1. Prefácio

É com grande satisfação que o Programa AmazonFACE lança este novo Plano Científico. Assim, inaugura a segunda fase do programa, na qual serão completas a implementação e operação do primeiro experimento FACE (sigla em inglês para Free Air CO_2 Enrichment) em uma floresta tropical. Este documento é uma vasta atualização do primeiro Plano Científico lançado em 2014, quando o Programa foi estabelecido. Desde então, foram aprendidas importantes lições a respeito da organização e do planejamento científico do programa, como a nova distribuição dos temas científicos em Áreas de Pesquisa Carbono, Nutrientes, Água, Biodiversidade, Socioambiental e Modelagem. É importante mencionar que as Áreas de Pesquisa da Biodiversidade e Socioambiental são novas em um experimento FACE, e que assumem relevância no caso da Amazônia. Desde o lançamento do primeiro Plano Científico, em 2014, houve extensa coleta de dados preliminares extremamente importantes para o experimento, para a análise de efeitos do aumento de CO_2 atmosférico na floresta.

Este Plano Científico não tem a intenção de ser exaustivo na apresentação das possibilidades de pesquisa científica que podem ser conduzidas a partir do AmazonFACE, mas, sim, de identificar os processos e parâmetros-chave que devem ser medidos e monitorados durante o experimento. Essas medições e observações são as evidências que auxiliarão a responder as questões centrais do Programa – e caberá à equipe principal de pesquisadores e técnicos do AmazonFACE assegurar que essas avaliações essenciais estão sendo realizadas durante o experimento. É interessante ressaltar que o AmazonFACE é uma estrutura de pesquisa em comunidade e que a participação dos grupos de pesquisa do Brasil, de outras nações Amazônicas e de outros países é enriquecedora.

Agradecemos ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) do Brasil pelo apoio contínuo de longa data ao AmazonFACE como um dos Programas de Pesquisa do MCTI e ao Governo do Reino Unido pela parceria-chave por meio do Ministério das Relações Exteriores, da Commonwealth e Desenvolvimento (FCDO). Essas duas instituições tornam possível a execução de um dos mais esperados experimentos nos campos das Ciências da Ecologia e das Mudanças Climáticas. Também agradecemos ao Instituto Nacional de Pesquisa Amazônica (INPA) do Brasil por receber e coordenar este grande movimento científico, à universidade de Campinas (Unicamp) e ao Escritório de Meteorologia do Reino Unido por também coordenarem esta iniciativa. Por fim, agradecemos aos membros o Comitê Diretivo Científico do AmazonFACE e a todos os demais cientistas técnicos, colaboradores administrativos e estudantes que contribuíram ou promoveram o projeto por fazerem este sonho se tornar realidade.

David M. Lapola
Iain Hartley
Richard Norby
Carlos A. Quesada



2. Sumário Executivo



O Programa AmazonFACE é voltado à resolução de uma das principais fontes de incertezas sobre o futuro da floresta Amazônica: o potencial de crescimento das concentrações de CO_2, e preservar as florestas tropicais contra os efeitos deletérios das mudanças climáticas por meio da estimulação do crescimento florestal e da resiliência à seca. A tarefa principal do AmazonFACE é ser um experimento de enriquecimento de CO_2 de escopo e importância sem precedentes, conduzido em uma floresta primária e madura na Amazônia Central. O experimento simulará a composição futura de CO_2 atmosférico, com o propósito de responder à pergunta: Como o aumento de CO_2 atmosférico afetará a resiliência da floresta Amazônica, da biodiversidade que ela abriga e dos serviços do ecossistema que ela provê?

Mudanças rápidas no clima terrestre provocadas pela queima de combustíveis fósseis e pelo desmatamento representam uma severa ameaça às florestas da bacia amazônica. Enquanto os modelos atuais de sistema terrestre tendem a projetar um forte efeito de fertilização de CO_2 (estimulação de produtividade de plantas devido ao aumento de CO_2 atmosférico), que neutraliza os efeitos das temperaturas mais quentes e condições mais secas na floresta. Observações a longo prazo identificaram que o sumidouro de carbono da Amazônia está se enfraquecendo. A resposta das florestas tropicais às mudanças climáticas de longo prazo, entretanto, segue altamente incerta. Variando de cenários modelados com aumento da capacidade de armazenamento de carbono, ao chamado "ponto de não-retorno da floresta amazônica" em que áreas substanciais de floresta tropicais poderiam ser substituídas por florestas sazonais ou savanas. Reduzir essa incerteza é crítico para conduzir o desenvolvimento futuro de políticas para a região Amazônica, bem como para as análises globais de vulnerabilidade do ecossistema às mudanças climáticas. Este plano científico atualizado apresenta a fundamentação para a implementação e operação do experimento FACE em uma floresta madura da bacia Amazônica perto de Manaus, no Brasil. A tecnologia FACE é comprovadamente um método válido para determinar respostas a longo prazo em escalas ambientais à elevação de CO_2 em regiões temperadas. No entanto, não houve tentativa de implementação de nenhum experimento do tipo em uma floresta tropical, apesar dessa necessidade ser reconhecida pela Ciência e por comunidades políticas há muito tempo.

O experimento é composto por seis áreas de 30 metros de diâmetro, sendo três deles mantidos nas concentrações de CO_2 ambiente e os outros três mantidos em concentração de CO_2 elevada (+200ppm) por, ao menos, dez anos. O local da pesquisa é um platô na estação de pesquisa ZF2, com vegetação e solo representando fração significativa das florestas da Amazônia. Plots experimentais incluem estandes de árvores com 30 metros de altura em profundidade e ferralsolos de argilas bem drenadas. Gerido pelo INPA, no Brasil, o território passou por uma longa prática de pesquisa na ecologia de floresta tropical, gestão florestal e interações entre biosfera e atmosfera.

Seis áreas de pesquisa – Carbono, Nutrientes, Água, Biodiversidade, Socioambiental e Modelagem Ecossistêmica – são o foco do Programa. Desde 2014, uma equipe multidisciplinar de cientistas emprega ferramentas e métodos de última geração para investigar as dinâmicas da floresta, desde sua profundidade no solo ao dossel florestal, para estabelecer parâmetros de linha de base da floresta experimental. O conjunto de dados obtidos do experimento passam a ser recurso relevante para uma vasta comunidade de cientistas e para o aprimoramento das projeções de modelos para o futuro da Amazônia. Produtos científicos significativos deste experimento resultarão da intensa interação entre dados empíricos e de modelagem. Os efeitos em cascata das mudanças climáticas e do CO_2 elevado em florestas e seus impactos nas populações humanas da região são estudados concomitantemente com o experimento de campo. AmazonFACE é um empreendimento científico carro-chefe que estimula o empoderamento científico de instituições de pesquisa no Brasil e fortalece a cooperação com grupos de pesquisa estrangeiros. Os resultados do projeto serão disseminados por meio de periódicos científicos revisados por pares e comunicado para o público em geral, agências do governo e órgãos de tomada de decisão, com o objetivo de minimizar as incertezas das previsões a respeito da vulnerabilidade da floresta Amazônica a mudanças climáticas. Auxiliando na condução e desenvolvimento de políticas futuras para a região Amazônica.



3. Introdução: As bases científicas

3.1 Aumento de CO_2 atmosférico, mudanças climáticas e Amazônia



A sociedade humana elevou a concentração de CO_2 ($[CO_2]$) atmosférico na Terra em 50% desde o final do século 19 por meio, principalmente, da queima de combustíveis fósseis e pelo uso da terra, em menor proporção [1]. A atual $[CO_2]$ de aproximadamente e 420 partes por milhão de volume (ppmv) não tem precedente nos últimos três milhões de anos da história da Terra [2]. A $[CO_2]$ atmosférica pode atingir 1.135 ppmv até o final deste século no cenário mais extremo de emissão, mas as projeções são relativamente variáveis, a depender das suposições sobre uso de energia, crescimento populacional e outros fatores físicos, biológicos e socioeconômicos [3]. Como o CO_2 atmosférico é o substrato primário para toda a produtividade terrestre via fotossíntese, esse aumento substancial certamente está afetando o metabolismo da floresta Amazônica e de outros ecossistemas no mundo inteiro [4].

Na verdade, cerca de um terço de todo o CO_2 liberado anualmente na atmosfera por meio das ações humanas é atualmente absorvido pelos ecossistemas terrestres. Sendo as florestas tropicais e, principalmente, a Amazônia, responsáveis por uma ampla fração do sumidouro de carbono [1,5,6]. A magnitude, duração e extensão global do aumento da captação de CO_2 pela biosfera terrestre em resposta à elevação da concentração de CO_2, o chamado efeito de fertilização de CO_2 é amplamente desconhecido. Ele representa grande fonte de incertezas que limita a capacidade de entendimento dos processos da floresta tropical, de avaliação das suas fragilidades em relação a mudanças climáticas e de aprimoramento da representação desses processos em modelos de sistemas terrestres. Essa imprecisão acerca das respostas da floresta tropical à elevação de CO_2 atmosférico (eCO_2) e de mudanças climáticas é especialmente crítica devido ao amplo impacto que as florestas da bacia Amazônica têm nos ciclos de carbono e água globais e no clima.

A bacia Amazônica também abriga fração considerável da biodiversidade do mundo e provê serviços ecossistêmicos essenciais para a humanidade. Há projeções para a floresta Amazônica enfrentar mudanças climáticas particularmente severas nas próximas décadas [7-9], que pode comprometer a provisão destes serviços [10-12]. O potencial para o efeito de fertilização de CO_2 terá um papel fundamental na resposta da floresta às mudanças climáticas [13-21] e, portanto, deve ser avaliado. Há amplo conhecimento sobre os efeitos de e CO_2 em processos bioquímicos e fisiológicos de folhas, inclusive as de árvores tropicais em condições tropicais [22-25]. No

entanto, as respostas primárias de eCO_2, especialmente o estímulo de fotossíntese, não revelam necessariamente as respostas definitivas da produtividade do ecossistema, do armazenamento de biomassa, do ciclo de carbono e das interações bióticas.

Os experimentos FACE em florestas temperadas, incluindo plantações jovens e estandes nativos antigos, têm revelado muitas respostas de ordem superior e enfatizado a importância das interações e feedback entre CO_2 e outras fontes ambientais (nomeadas nutrientes do solo), desenvolvimento de estandes e integração entre tempo e espaço [26-28]. Não houve outro experimento conduzido em uma floresta tropical, apesar de tais florestas contabilizarem um terço da atividade metabólica total da superfície terrestre da Terra [29]. Florestas tropicais e temperadas se diferem substancialmente em espécies e diversidades de plantas, estrutural florestal, solos e clima. Essas variações limitam severamente nossa habilidade de usar os resultados de estudos de zonas temperadas para prever as respostas de florestas tropicais [30,31]. Portanto, os esquemas atuais de superfície terrestre e modelos de modelos de vegetação são altamente incertos em suas previsões sobre as respostas de florestas tropicais ao aumento de CO_2 e ao feedback que a interação entre vegetação e eCO_2 provoca no sistema climático global [20,32].

Não obstante, análises do perfil vertical da concentração de CO_2 na atmosfera [5,33] e observações de campo a longo prazo a partir das redes de plotagem [6] indicam que as florestas tropicais sem distúrbios são fortes sumidouros de CO_2 e, por meio de sua produção biológica, provêm feedback negativo crucial para o acúmulo de CO_2 na atmosfera. No entanto, particularmente na Amazônia, a força desse sumidouro de carbono decaiu em 30% desde a década de 1990 [6], aumentando as consternações sobre a Amazônia atingir o seu "ponto a beira do não-retorno" de degradação florestal climática progressiva [34,35]. A importância dessa resposta do sumidouro de carbono para o entendimento dos desdobramentos das mudanças climáticas, o ponto de não-retorno da Amazônia, e seus impactos no bem-estar humano ao longo deste século é indiscutível, e a necessidade de evidências de observação direta da resposta da floresta Amazônica a eCO_2 é irrefutável.



3.2 Lacunas de conhecimento sobre as respostas das florestas tropicais à elevação de CO_2

Evidência experimental

O aumento observado e as taxas de recrutamento coletadas em florestas tropicais nas últimas três décadas são mais bem explicadas pela eCO_2 (com temperatura próxima à superfície maior e aumento da frequência de secas, elucidando os 30% de queda no sumidouro de carbono da Amazônia desde os anos de 1990) [6]. Apesar de não haver experimentos FACE nos trópicos, as lições dos experimentos FACE temperados [26,27] podem elucidar alguns pontos críticos de incertezas que devem ser solucionados para melhorar as precisões a respeito das respostas do ecossistema tropical às mudanças atmosféricas e climáticas. O estímulo da absorção de CO_2 fotossintética é a interação inicial entre o eCO_2 em elevação e as àrvores da floresta – e, na maioria dos ecossistemas, o aumento da produtividade primária líquida (net primary productivity - NPP) é o resultado esperado. Nos experimentos FACE anteriores em florestas temperadas jovens, a NPP aumentou em torno de 23% em eCO_2 [36] A questão crítica é quando a NPP aumentada resulta no acúmulo de carbono no tecido perene, como madeiras, ou melhor, quando é ciclada rapidamente através ecossistema e liberada como CO_2 de volta para a atmosfera [37].

A NPP representa o insumo de matéria orgânica no ecossistema, mas, individualmente não prevê o ecossistema de armazenamento de carbono, um processo que depende de como o carbono é particionado entre diferentes reservatórios de planta e de solo e o tempo de turnover desses reservatórios. É necessário entender a repartição relativa do carbono para a produção de folhas, madeiras e raízes, para armazenamento de compostos, para respiração e outras perdas para avaliar o destino do carbono no ecossistema. Por tanto, uma incerteza importante que precisa ser solucionada é se a estimulação de NPP nos trópicos resulta primariamente em aumentos de biomassa de madeira ou no aumento de detritos no solo. No experimento Oak Ridge FACE (ORNL-FACE) em uma floresta temperada no Tennessee, EUA, o estímulo de NPP foi primariamente associado ao aumento da produção de raízes finas, apesar do turnover dessas raízes ser rápido e não contribuírem com o armazenamento de carbono no ecossistema, a entrada de C no solo resultou no aumento do carbono orgânico no solo [38]. Nosso entendimento das respostas dos sistemas de raízes em florestas tropicais é especialmente debilitado e deve ser aperfeiçoado devido aos muitos pontos de intersecção entre raízes, crescimento de plantas, carbono, água e ciclos de nutrientes em ecossistemas de florestas tropicais.

Experimentos em zonas temperadas também revelam a importância da avalição de nutrientes e do feedback entre os ciclos de carbono e de nitrogênio nas mudanças de respostas a eCO_2. No experimento ORNL-FACE, o estímulo inicial de NPP em eCO_2 decaiu devido a uma limitação progressiva de nitrogênio que foi acelerada nas áreas de eCO_2 [39]. Muitas florestas tropicais não devem ter nitrogênio limitado, a partir de forte evidência que indica que a NPP em florestas tropicais é limitada por fósforo (P) [40-45]. Mesmo havendo grandes diferenças entre florestas de eucaliptos e florestas tropicais, o fato da limitação de P ter sido considerada a razão primária para não haver respostas a eCO_2 no experimento EucFACE na Austrália [28] enfatiza a real necessidade de quantificar as respostas do ciclo de P ao eCO_2 na Amazônia. Novos dados observacionais da interação entre eCO_2, limitação de P e secas são necessários para informar modelos sobre limitação de P em fotossíntese tropical e mecanismos em que a limitação de P deve se atenuar sob eCO_2, como o aumento da atividade da enzima fosfatase para estimular a disponibilidade de fósforo do solo [46] e o aumento de raízes e exploração micorrízica do perfil do solo, que melhora a habilidade das árvores de aumentar o acesso a formas menos disponíveis de fósforo sob eCO_2 [47,48].

Interações entre eCO_2 e o ciclo da água podem ser muito importantes para as florestas tropicais em um mundo futuro de alto CO_2, especialmente na Amazônia, onde uma quantidade substancial de precipitação

depende do fluxo do vapor de água da floresta para a atmosfera [49]. Ao aumentar a fotossíntese e/ou diminuir o uso de água através de reduções da condutância estomática, a eficiência de uso da água (water use efficiency - WUE; captação de carbono por unidade de água perdida) normalmente aumenta em resposta a eCO_2 [50]. Dependendo de outros fatores, especialmente respostas nas áreas foliares totais, a WUE aumentada pode ou não resultar na diminuição do uso da água [26], mas pode, potencialmente, conferir às árvores maior tolerância às secas em eCO_2 [24]. A elevação da hidratação do solo tem sido associada a eCO_2 em alguns experimentos, com efeitos subsequentes na respiração do solo e no turnover de nutrientes [51], bem como consequência potencial para o fluxo de hidratação para a atmosfera.

Interações entre CO_2 e luz derivam da capacidade da eCO_2 de elevar o uso eficiente da luz na fotossíntese e de reduzir o ponto de compensação de luz fotossintética [52]. Apesar das plantas na sombra profunda (sub-bosque) de uma floresta tropical fechada terem crescimento lento, sua resposta relativa a eCO_2 pode ser expressiva [53,54]. Consequentemente, eCO_2 tem o potencial para facilitar a expansão da vegetação do sub-bosque [23,54] e alterar a composição das espécies que resultam após uma abertura de dossel. Esse é um ponto crítico na determinação das respostas do Índice de Área Foliar (LAI – leaf area index, m2 de área foliar por m2 de área) e a mudança associada nas interações entre atmosfera e biosfera sob condições de eCO_2.

Há poucos dados disponíveis para descrever a diferente sensibilidade a eCO_2 entre as espécies tropicais, mas se existem diferenças significativas em larga escala, estas podem representar uma expressiva influência na estrutura da floresta resultante de revegetação de uma clareira ou terreno de agricultura abandonado. Lianas (trepadeiras lenhosas) estão crescendo em florestas neotropicais, representando uma das primeiras mudanças composicionais de larga escala documentadas em florestas tropicais maduras. Pesquisas indicam que lianas, leguminosas lenhosas e espécies pioneiras devem ser particularmente sensíveis a eCO_2 [55-60], e isso pode potencialmente ter vastas consequências para o armazenamento de carbono no ecossistema. .

Percepções dos modelos

Os modelos são a ferramenta primária para interpretar as medidas do ecossistema, entender sua relação com as variações ambientais e situar essas observações em um contexto espacial e temporal amplo. Modelos têm sido utilizados para interpretar respostas passadas e atuais dos ecossistemas terrestres ao CO_2 atmosférico. São especialmente úteis para projetar respostas para cenários futuros de eCO_2 e as trocas entre a terra e atmosfera, que deve alterar o clima no futuro. A confiabilidade nas projeções dos modelos depende de eles estarem bem-parametrizados a respeito das observações do processo e de larga escala, e por respostas a manipulações experimentais [61].

Modelos globais que compõem um sistema heurístico completo ilustram a potencial importância de eCO_2 ao ciclo de carbono tropical e as trocas dos trópicos para o clima global [13,62]. As previsões do ciclo de carbono de diferentes modelos dinâmicos globais de vegetação (DGVMs) são parcialmente consistentes com o balanço de carbono global e divergem consideravelmente quando forçados com o clima futuro previsto pelos modelos de circulação gerais (GCMs), cenários de emissão de CO_2 e diferentes parametrizações nos efeitos de aumento de $[CO_2]$ atmosférico na fotossíntese e na eficiência de uso da água pelas plantas. Sobretudo, os DGMVs atuais não representam satisfatoriamente as flutuações do sumidouro de carbono na Amazônia e, em geral se considera que o sumidouro de carbono da floresta continuará indefinidamente no futuro devido à fertilização de CO_2 [21].

Estudos passados limitaram a provável gama de sensibilidade dos fluxos de carbono em terras tropicais a mudanças climáticas por observações atuais, sugerindo que florestas tropicais, especialmente a Amazônia, são mais resilientes a mudanças climáticas do que previamente assumido, entendendo que os efeitos de fertilização de CO_2 são consideráveis como sugerido por modelos de vegetação atuais [16]. No Modelo Dinâmico de Vegetação Global (DGVM) LPJ, o reforço de NPP guiada por CO_2 mostra-se mais acentuado nos trópicos (35% de aumento de NPP) em relação a florestas temperadas (26% de aumento de NPP) em

concentração de CO_2 atmosférico de 550 ppm, com relação a 370 ppm [30]. Este último resultado deriva primeiramente do processo de fotossíntese no modelo, que mostra alta estimulação por eCO_2 em temperaturas mais elevadas (devido à especificidade alterar de CO_2 /O2 da enzima RuBisCO em temperaturas mais altas). É importante enfatizar que potenciais limitações de nutrientes não foram incluídas no modelo. Uma inter-comparação de modelos mais recente, entre modelos que consideram o ciclo de nutrientes, mostram que a ausência de P no solo pode reduzir ganhos de biomassa devido ao efeito de fertilização de CO_2 em 50% em média na Amazônia, a depender em que o ciclo de P é representado [20,46,63].

O projeto de Síntese de Dados-Modelos FACE utilizou dados dos experimentos FACE Duke e Oak Ridge (depois de concluídos) como referências de previsão de modelos de respostas de florestas temperadas a eCO_2, explorando também, em padrão detalhado, as razões adjacentes para o comportamento dos modelos sob condições de CO_2 ambiental e elevado [64,65]. Percepções fundamentais foram providas nas premissas dos modelos, com melhor compreensão das respostas das vegetações de florestas temperadas a eCO_2, como a dependência do acoplamento folha-atmosfera para melhor compreender as mudanças no uso de água pelas plantas [50], ou o uso de métodos de alocação de carbono baseados em alometria, para melhor representar as mudanças na biomassa [66].

Muitos outros estudos, utilizando diferentes modelos de vegetação, têm destacado o papel fundamental do efeito da fertilização de CO_2 para neutralizar os prováveis efeitos deletérios das mudanças climáticas na vegetação, mantendo a biomassa da floresta Amazônica relativamente inalterada e resultando em territórios tropicais sendo consideradas sumidouros líquidos de carbono ao invés de fonte de carbono ao longo do século 21 [14,15,16,17,18,20,21,62,67-71]. Exceções foram encontradas em cenários de clima extremos – elevações extremas na temperatura ou quedas de pluviosidade anual – para as quais até mesmo um forte efeito de fertilização de CO_2 não é suficiente para evitar a perda de biomassa modelada. Portanto, a probabilidade das mudanças climáticas causarem perda substancial da área de floresta Amazônica e de seu estoque de carbono e amplificar o retorno do ciclo de carbono e o clima – então chamado "dieback da floresta Amazônica" ou "o ponto de não retorno" da Amazônia [34,72] – é, ainda, uma questão aberta. Isso devido à potencial resiliência que a eCO_2 pode conferir para a vegetação e à ausência de estudos experimentais de campo para determinar melhor os modelos de vegetação a respeito dessa resiliência.

No entanto, muitas incertezas relacionadas aos efeitos da eCO_2 em florestas tropicais ainda devem ser melhor abordadas por modelos, como a limitação de NPP e do crescimento das árvores pela disponibilidade de P [20,46,73], a integração do fluxo de hidratação no continuum solo-floresta-atmosfera sob eCO_2 e o efeito simultâneo das secas [74,75], ou a hipótese de que a hiperdiversidade de árvores encontrada nas florestas tropicais tem função amortecedora nas respostas a eCO_2 no nível ecossistêmico [68,69]. Atualmente, previsões de modelo sobre esses processos são baseadas em informações limitadas e omitem o que podem ser considerados modificadores críticos dos processos. Considerando o nexo entre caracterização funcional da comunidade de plantas em área experimental, sua relação com processos ecológicos e biogeoquímicos [76,77] sob eCO_2 e os efeitos em cascata nos serviços ecossistêmicos e bem-estar humano [12,78], tais incertezas poderiam comprometer a adaptabilidade das populações humanas a estas mudanças [51]. A própria integração entre os dados experimentais do AmazonFACE e seus modelos, com análises aprofundadas das pressuposições dos modelos [64], tem potencial significativo de avanços consideráveis para o conhecimento acerca das respostas de florestas tropicais a eCO_2 e da resiliência da floresta Amazônica e suas populações às mudanças climáticas em progresso.



3.3 Por que precisamos de um experimento FACE na Amazônia?

A necessidade latente de abordar muitos tópicos científicos acerca da resposta da floresta Amazônica à elevação de CO_2 atmosférico é a justificativa primária para um experimento FACE de longo prazo e de larga escala na Amazônia. Estudos de modelos indicam que há risco substancial, apesar de incerto, de um dieback, ou ponto de não-retorno, generalizado da floresta Amazônica sob mudanças climáticas futuras [14,15,7,18,20,21,62,67-71]. Essa ocorrência pode gerar impacto-chave na base de recursos naturais da América Latina, representando ameaça significativa à economia da região, por exemplo, por meio de mudanças nos padrões do ciclo de água e os impactos subsequentes na produção agrícola, no suprimento de energia hidrelétrica, e, por fim, guiando a perdas financeiras de ordem de US$ 8.2 trilhões, migração e outras adversidades socioeconômicas [12].

Como descrito anteriormente, alguns dos efeitos negativos das mudanças climáticas em florestas devem ser mitigados pelo efeito de fertilização de CO_2, estimulando o crescimento florestal e aumentando sua resiliência às secas. No entanto, se a mitigação por meio da fertilização de CO_2 não ocorrer, as florestas tropicais devem ser muito mais vulneráveis a mudanças climáticas, e o risco de cruzar o ponto de não-retorno poderia aumentar. Atualmente, modelos não podem prover confiança suficiente em projeções futuras para a floresta Amazônica sem embasamento de evidência experimental de campo, em escala ecossistêmica, das respostas das florestas tropicais a eCO_2. Portanto, a redução das incertezas nessas áreas é crucial para a condução de desenvolvimento de políticas para a região Amazônica.

As respostas das florestas à eCO_2 não foram testadas na Amazônia ou em outra região dos trópicos e a necessidade de reduzir essa imprecisão é inegável. O experimento FACE é a mais direta e robusta abordagem científica para atingir esse objetivo. O AmazonFACE fornecerá informação científica primária que amplie nosso conhecimento e entendimento dos efeitos fisiológicos e ecológicos da e[CO_2] em florestas tropicais. Ele oferecerá dados necessários para a parametrização e melhoria dos modelos de previsão dos efeitos a longo prazo de CO_2 elevado no ciclo de carbono e mudanças climáticas. Diversas razões tornam o experimento FACE na Amazônia especialmente relevante:

- As florestas da bacia Amazônica – a maior extensão de floresta tropical do mundo – abrange o maior repositório de biodiversidade do mundo tem grande impacto na atmosfera global, nos ciclos de água e carbono e provê serviços ecossistêmicos para a humanidade. O fluxo do rio Amazonas, por exemplo, representa 20% do fluxo global de água fresca para os oceanos [11]. Todas essas funções serão afetadas pela eCO_2 [32], e é importante prever o papel da Amazônia para os ciclos de carbono e água, regulação climática e conservação da biodiversidade nas próximas décadas.
- Acrescentando à sua relevância para os ciclos de carbono e água globais, para a biodiversidade e para as populações humanas tradicionais, a floresta Amazônica também é a única região de floresta tropical considerada "elemento crítico" do sistema climático [34]. O impacto definitivo ou a recuperação das ameaças presentes à maior floresta tropical do mundo – como desmatamento, degradação florestal e a chamada mudança climática – dependerão seriamente da resposta fisiológica direta da floresta à eCO_2.
- A bacia Amazônica é habitação para cerca de 28 milhões de pessoas, e, se o dieback florestal – ou ponto de não-retorno – prosseguir de fato, resultará em consequências consideráveis para o bem-estar social e a economia da região.
- Dados e infraestrutura: Já há uma rede de trabalho coerente e bem conservada de áreas florestais pela bacia em que a biodiversidade e a dinâmica florestal têm sido

estudadas e catalogadas e o crescimento das árvores, monitorado [6] – algumas, com co-ocorrência de torres de fluxos turbulentos, em sua maior parte, provenientes do projeto LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia) [79].

- Capacidade institucional: A região amazônica e o Brasil desenvolveram, nas últimas décadas, expertise de alta qualidade na área de interações biosfera-atmosfera em florestas tropicais, com fortes colaborações científicas com instituições e grupos de pesquisa europeus e estadunidenses.

Mesmo antes de seu início, o AmazonFACE é um empreendimento científico de destaque com alta visibilidade na comunidade científica internacional e na mídia [80]. Além da justificativa científica principal para o experimento proposto, há inúmeros benefícios adicionais. A análise do efeito de fertilização por CO_2 na floresta amazônica deve ter muitas implicações econômicas e ambientais significativas para a bacia amazônica e para os ciclos globais de carbono e água. Espera-se que o experimento também tenha implicações diretas para questões como conservação biológica, práticas florestais, uso da terra e políticas climáticas, além da provisão de serviços ecossistêmicos pela floresta amazônica. A equipe de pesquisa multidisciplinar já envolvida no programa promoverá o fortalecimento científico das nações em desenvolvimento (países amazônicos e outras nações com florestas tropicais) por meio de educação, treinamento, experiência prática em pesquisa e colaboração internacional. O experimento fornecerá um fórum para divulgação e educação sobre questões relacionadas às mudanças climáticas e à ecologia das florestas tropicais para partes interessadas, formuladores de políticas e o público em geral.



4. Objetivos e principais questões de pesquisa



O programa de pesquisa AmazonFACE é voltado para a resolução de uma fonte chave de incerteza na ciência das mudanças climáticas: o potencial das crescentes concentrações de CO_2 atmosférico, para proteger as florestas tropicais e os serviços ecossistêmicos que elas fornecem contra os efeitos negativos das mudanças climáticas, estimulando o crescimento florestal e aumentando a resiliência à seca.

O objetivo central do projeto é o planejamento, implementação e execução de um experimento de enriquecimento de CO_2 de escopo e importância sem precedentes em uma floresta tropical madura e hiperdiversa localizada 80 km ao norte de Manaus, no Brasil. O experimento simulará a composição atmosférica de CO_2 do futuro[1] para ajudar a responder à seguinte questão fundamental:

"Como o aumento do CO_2 atmosférico afetará a resiliência da floresta amazônica, a biodiversidade que ela abriga e os serviços ecossistêmicos que ela fornece à luz das mudanças climáticas?"

O AmazonFACE permitirá avanços em seis áreas-chave de pesquisa: Carbono, Nutrientes, Água, Biodiversidade, Socioambiental e Modelagem. As áreas de Biodiversidade e Socioambiental agregam definitivamente, em relação a experimentos FACE anteriores, dado que este é o primeiro FACE em um ecossistema altamente diverso e os potenciais impactos das mudanças climáticas e da eCO_2 em diversos setores socioeconômicos da região [12]. Tais avanços de pesquisa também são marcados desde o início do Programa por atividades de modelagem, com o principal objetivo de melhorar modelos de vegetação, clima e sistemas terrestres em relação aos efeitos da eCO_2 em florestas tropicais.

[1] A concentração de ~615 ppm deve ser alcança, segundo previsão, até os anos de 2070 no cenário SSP2-4.5 (4), em que como 2023, parece a trajetória de emissão mais plausível.

5. Resultados esperados e impactos gerais

O maior resultado esperado é a ampliação do conhecimento científico sobre o futuro da floresta Amazônica no contexto de mudanças climáticas e atmosféricas: como a floresta Amazônica pode auxiliar a humanidade a reduzir a emissão de carbono, e o quão vulnerável a floresta ficará para resistir às mudanças climáticas. Esse novo conhecimento será disseminado por meio de diversos produtos. Serão publicamente disponibilizadas séries de dados que descrevem respostas fisiológicas e ecológicas que fornecerão contribuição valiosa para parametrização, testagem e melhorias de modelos de vegetação, clima e sistemas da Terra usados para prever respostas terrestres à eCO_2, mudanças climáticas e outros distúrbios. Os resultados do experimento de campo e dos exercícios de modelagem embasarão a compreensão sobre como as mudanças na floresta em consequência da CO_2 e às mudanças climáticas impactarão os diferentes setores socioeconômicos da bacia Amazônica e regiões vizinhas. Ademais, auxiliarão na criação de estratégias de adaptação e mitigação climática a níveis local e regional.

Os resultados das atividades experimental e de modelagem serão publicados em periódicos científicos revisados por pares, incluindo artigos de síntese em publicações internacionais de alta visibilidade, com objetivo da maioria das publicações do programa serem de acesso aberto. Os produtos científicos também serão preparados em parceria com profissionais de jornalismo científico em formatos adequados para informar a sociedade e tomadores de decisão (incluindo canais ativos de redes sociais) e fornecer insumos para iniciativas sustentáveis na Amazônia.

Outo resultado importante do Programa AmazonFACE será o treinamento científico de estudantes brasileiros e o fortalecimento das capacidades de instituições nacionais. A implementação bem-sucedida do projeto demandará a participação de muitos estudantes em diferentes disciplinas: Botânica, Ecologia Experimental, Modelagem Ecológica, Ciência do Solo, Microbiologia, Meteorologia, Análise de Dados, Engenharia, Ciência Social, Antropologia e Comunicação (pública e científica). O programa espera receber ao menos 30 pesquisadores de pós-doutorado, cerca de 50 estudantes de doutorado (PhD) e um número similar de técnicos de campo e laboratório e estudantes de mestrado ao longo do processo. Um grupo de estudantes treinados pelo AmazonFACE estará preparado para usar essas habilidades em programas de pesquisa futuros e - talvez, até mais ambiciosamente - análises de programas de pesquisa, de políticas governamentais e organizações sem fins lucrativos que promovam a sustentabilidade.

O AmazonFACE tem enorme potencial para fomentar ciência inovadora nas instituições brasileiras, especialmente em Manaus e no Amazonas, regiões que historicamente sofrem com a falta de equipes científicas especializadas e de infraestrutura. Além do treinamento de estudantes locais e inserção deles no intercâmbio de métodos de pesquisa de comunidades científicas do Reino Unido, da Europa, dos Estados Unidos e do Brasil, o AmazonFACE criará pesquisa transformadora, que pode mudar nosso entendimento sobre a região Amazônica, durante o período de persistente crise ambiental na Amazônia.

Infraestruturas e experimentos de campo integrados e amplos impulsionam avanços tecnológicos em técnicas de monitoramento, e o AmazonFACE pode contribuir substancialmente nessa área. Novos desenvolvimentos devem ocorrer no sensoriamento remoto, em técnicas de observação automatizada do dossel florestal, mensuração automatizada de fisiologia vegetal, em análises do solo e da bioquímica de raízes e nas interações de modelo solo-vegetação-atmosfera – particularmente proveitosas para o AmazonFACE. O projeto buscará ativamente colaboração com empresas de engenharia regionais (na Amazônia e no Brasil) e centros de pesquisa brasileiros para desenvolver abordagens inovadoras nestes campos.



6. Histórico (2011-2024)



A importância científica de conduzir o experimento de enriquecimento de CO_2 em uma floresta tropical tem sido levantada desde o início da década de 1990 [81], quando a ideia de executar uma iniciativa na floresta Amazônica também começou a ser considerada. Em meados de 1990, uma primeira tentativa de implementar o experimento FACE na floresta Amazônica, mais especificamente em Rondônia, foi obstruída por limitações financeiras e logísticas. As primeiras discussões que posteriormente culminaram no AmazonFACE ocorreram em um encontro híbrido nos dias 12 e 13 de outubro de 2011, no INPA em Manaus. As conversas seguiram no Rio+20 Summit, em 2012, e o AmazonFACE foi efetivamente materializado em uma oficina na sede do Banco Interamericano de Desenvolvimento (IDB) em julho de 2013, (que foi apresentado como uma história na revista Nature [82]). Em 2014, tornou-se programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) do Brasil sob realização do Instituo Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA).

Acordos de cooperação entre MCTI, Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) e a Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) forneceram subsídio inicial para o projeto, com o objetivo de elaborar por escrito o primeiro Plano de Científico & Estratégia de Implementação [83], delimitando os territórios experimentais, conduzindo uma caracterização de linha de base ecológica e da área experimental (que começou em 2015), desenvolvendo planos de engenharia formais, gerando hipóteses a partir de exercícios de modelagem [12,20,84] e coordenando a primeira avaliação em larga escala dos impactos socioeconômicos do dieback da floresta Amazônica [12]. Outras instituições, como a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional (USAid) e o Instituto Serrapilheira forneceram recursos para projetos menores conduzidos dentro do AmazonFACE.

Em 2017, o apoio da parceria entre BID e MCTI foi descontinuado e o programa dedicou-se a experimentos de eCO_2 de menor escala nos sub-bosques da floresta com Câmaras de Topo Aberto (OTCs) instaladas a cerca de 100 metros dos anéis FACE do experimento (ver seção 7.7), cujos resultados estão sendo publicamente disponibilizados [54]. Simultaneamente, diversas mensurações de linha de base conduzidas nos anéis do FACE prosseguiram, especialmente o crescimento do tronco das árvores.

Em 2021, investimentos significativos do Governo Britânico, acompanhado pelo MCTI, foram anunciado na COP26, em Glasgow, na Escócia. Esses investimentos asseguraram a aquisição e instalação de toda a infraestrutura necessária na área experimental, incluindo torres, guindastes e tanques. As duas primeiras áreas do AmazonFACE foram concluídas e testadas em meados de 2024, e o experimento integralmente replicado está previsto para ser iniciado até o final do mesmo ano.

O AmazonFACE reúne uma comunidade de aproximadamente 130 pessoas entre pesquisadores de diferentes disciplinas, estudantes, administradores, cientistas sociais, jornalistas e artistas de cerca de 40 instituições do Brasil, Reino Unido, Europa, EUA e Austrália. Devido à importância de seu tópico de estudo, ao porte e qualidade da comunidade e à sua natureza interdisciplinar, o AmazonFACE é considerado uma das iniciativas científicas de maior relevância na região Amazônica.

7. Resumo dos resultados inicias

7.1 Fotossíntese e condutância estomática

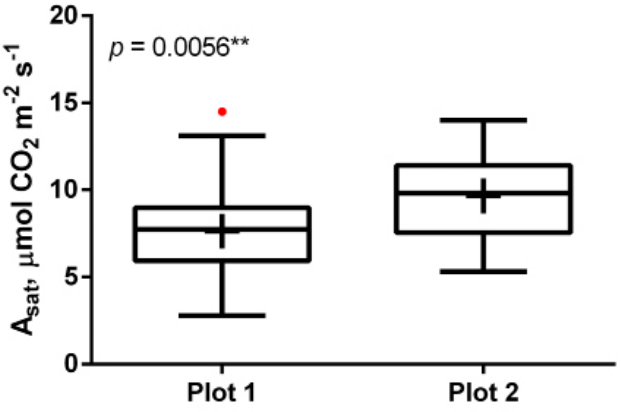


Figura 1. Assimilação líquida de CO_2 pré-experimental em saturação de luz (Asat, Mmolm−2 S−1) de oito espécies nos anéis 1 (tratamento) e 2 (tratamento) da área experimental do programa AmazonFACE.

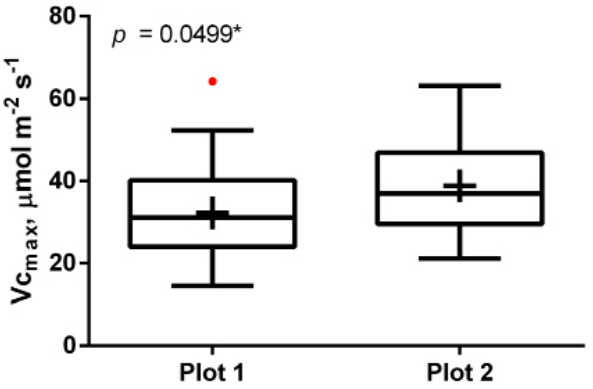


Figura 2. Taxa máxima pré-experimental de carboxilação de RuBisCO (VCmax, µmolm –2 S –1) de oito espécies nos anéis 1 (tratamento) e 2 (tratamento) da área experimental do programa AmazonFACE.

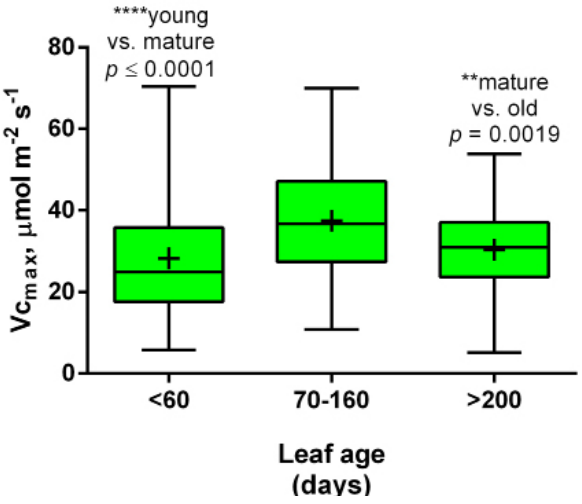


Figura 3. Efeito da idade das folhas em taxa de carboxilação máxima de RuBisCO (VCmax, µmolm –2 S –1) entre as classes de idade das folhas de nove espécies de árvores (n = 213). As caixas do diagrama representam as categorias de idade, divididas em "jovem" (< 60 dias, n = 61), "madura" (70 < x < 160 dias, n = 86) e "velha" (>200 dias, n = 66). As linhas horizontais indicam a mediana Vcmax, enquanto as caixas representam o intervalo interquartílico (50% das medições). Os filamentos se estendem em 1,5 vezes o intervalo interquartílico, e os pontos pretos denotam dados discrepantes para além desse intervalo. A idade da folha tem uma margem de erro de ±30 dias.



7.2 Biomassa acima do solo

A biomassa do solo e a sua produção têm sido mensuradas anualmente, provendo dados de linha de base essenciais para avaliação subsequente das respostas críticas à eCO_2. Dada a grande variação espacial da biomassa e sua produção, foram detectadas diferenças nas respostas dos anéis ao enriquecimento de CO_2, o que seria indetectável sem a capacidade de separar os efeitos de CO_2 das diferenças pré-existentes. Todas as árvores >2 cm DAP (diâmetro a altura do peito) foram medidas em outubro, de cada ano desde 2015 em seis anéis, o que resulta em, aproximadamente, 1.400 árvores. No entanto, um dos anéis, o 5, não compõe mais o experimento e foi substituído pelo anel 7. A massa seca de madeira dessas árvores de 13 m do anel central (excluindo, por exemplo, um buffer de 2 m do círculo definido pelo tubo de ventilação) é calculada por meio da equação alométrica publicada [85].

Em um subgrupo de árvores, são disponíveis os dados de altura, permitindo o uso da alometria baseada tanto nessa altura quanto em DAP – caso não seja possível, é utilizada a equação baseada somente na DAP. Em ambos os casos a densidade da madeira das espécies é um fator adicional. Os valores de densidade da madeira foram obtidos da base de dados Global Use Density Database, usando o pacote BIOMASSA de R. Se a espécie estiver nesse banco de dados, a média de todas as observações a seu respeito será fornecida. Se a espécie não estiver, ou se somente o gênero da árvore do anel for conhecido, a média de todas as observações desse gênero é feita. Se o gênero não for conhecido ou não constar na base de dados, a média de valores das árvores do AmazonFACE (0,69) é usada nos cálculos. A biomassa permanente é expressa como o total de todas as árvores dividido pela área do anel de 531 m2.

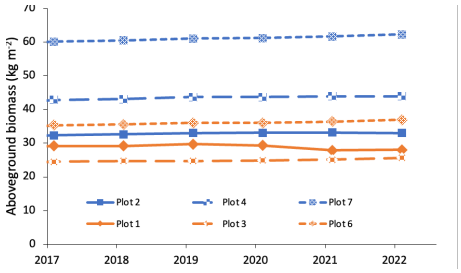


Figura 4. Variação da biomassa permanente do solo nos anéis do AmazonFACE.

A biomassa permanente do solo varia de acordo com o fator de 1,8 sobre os seis anéis do AmazonFACE. Os anéis atribuídos aCO_2 (linhas azuis) obtiveram biomassa do solo maior do que os de eCO_2 (linhas laranja). É importante ressaltar que a seleção de anéis foi realizada em 2013 para minimizar as diferenças em produtividade, evitando áreas com árvores emergentes e áreas de lacunas abertas recentemente na época.

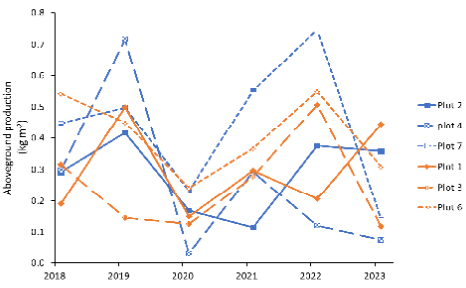


Figura 5.a

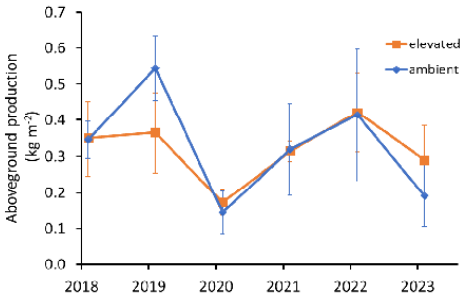


Figura 5.b. "elevated" e "ambient" significa as áreas que receberão, respectivamente, ar com CO_2 elevado e ar ambiente, quando o experimento começar.

A produção anual de madeira é calculada como a diferença entre a biomassa de cada árvore de um ano para o próximo. As árvores que morrem durante o processo são excluídas do cálculo. (a) A produtividade em 2021 variou até 3,2 vezes, uma variação substancial de um ano para o outro, o que não é consistente pelos anéis. Isso enfatiza a importância de haver dados de base substanciais de múltiplos anos. (b) Felizmente, o meio das três repetições dos dois grupos de tratamento é muito similar de 2020 a 2022. Meios "elevados" e "ambiente" são os anéis que receberão, respectivamente, CO_2 enriquecido e ar ambiente uma vez que o experimento estiver em andamento.

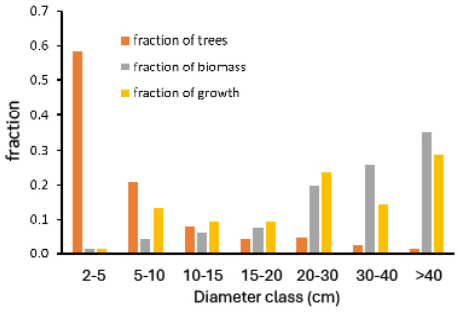


Figura 6. Biomassa de pé, produtividade das árvores e crescimento.

71% da biomassa de pé e 66% da produtividade foi em árvores com DAP > 20 cm, apesar de essas árvores representarem apenas 8,9% do total. 58% das árvores tinha DAP < 5 cm, mas essas pequenas árvores contavam com somente 1,5% da biomassa e produtividade totais.

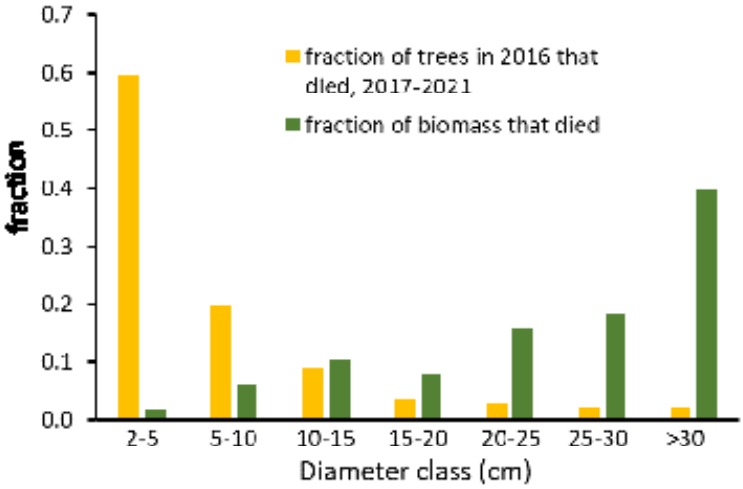


Figura 7. A mudança anual na biomassa florestal é igual à nova produção menos a mortalidade.

Em 2021, em mais de seis anéis (incluindo o 5, mas não o 7), a biomassa das árvores aumentou 1,72 m–2, o que foi compensado pela mortalidade de 1,83 g m–2 das árvores, para uma perda de rede de 0,11 g m–2 da biomassa do solo. 132 árvores do total vivo em 2016 morreram de 2017 a 2021 (8,4% ou 1,7% ao ano). 10 árvores representam 74% da biomassa perdida. É importante perceber que eventos raros, como análises precisas de mortalidade, requerem anéis maiores do que os que estão sendo utilizados no AmazonFACE.



7.3 Produção de folhas e raízes finas

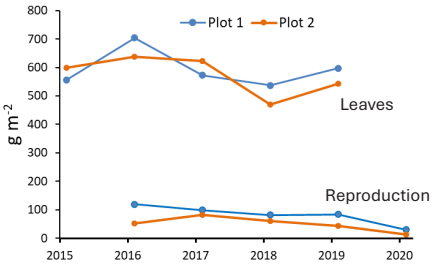


Figura 8. Folhas, frutas, flores e galhos colhidos quinzenalmente de 12 cestas de 0.25 M2 de resíduos por anel, secas em estufa e pesadas. Os cálculos assumem que a queda dos detritos representa a produção de folhas do ano anterior baseada em investigação cuidadosa da fenologia da folha. O total para o ano (1° de outubro a 30 de setembro) é ajustado para mudança em massa por área de folhas verdes vs. resíduos (1,4%). O anel 1 é designado a eCO_2 e o anel 2, a aCO_2.

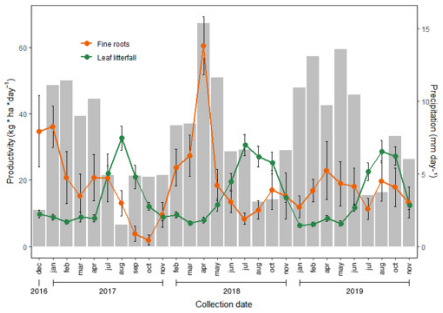
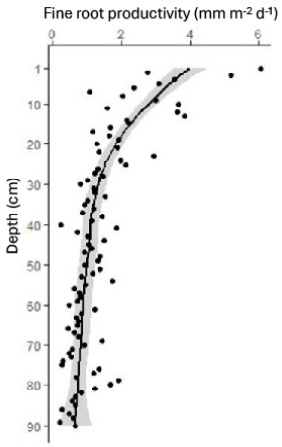


Figura 9. A produção de raízes finas foi mensurada por meio de mini rizotrons nos anéis 1 e 2 de dezembro de 2016 a novembro de 2019.A produção anual de raízes finas foi de 6.7 Mg ha–1, com maior produção na estação da chuva do que na seca. Houve uma assincronia diferente entre a produção de raízes finas e o resíduo de folhas. Desde que a nova produção de folhas ocorra junto com a queda, essa assincronia representa uma troca na alocação entre folhas e produção de raízes finas.



Depth	Fraction of standing stock	Fraction of productivity	Turnover (year^{-1})
0-30	0.51	0.60	1.02
30-60	0.38	0.26	0.61
60-90	0.12	0.13	0.40

Figura 10. O estoque de raízes finas e a sua produção foram maiores na superfície do solo, mas não houve fração significativa de raízes profundas no solo. O turnover de raízes finas caiu com profundidade [86].



7.4 Produção primária líquida (NPP)



Com os dados adicionais sobre as folhas, tecido reprodutor e procução de raízes finas nos anéis 1 e 2, a produção primária líquida pôde ser calculada para 2017-2019 – considerando o ano de outubro a setembro seguinte. A produção de folhas é considerada produção de detritos do ano anterior × 1,014. Esse fator considera que a matéria seca é reabsorvida das folhas à medida que senescem. A massa de galhos coletada nos detritos é acrescentada à madeira no solo do ano anterior, e o teciso reprodutor nos nas cestas de detritos são para o ano vigente. Produção de raízes espessas é em 21% da produção de madeira no solo [87].

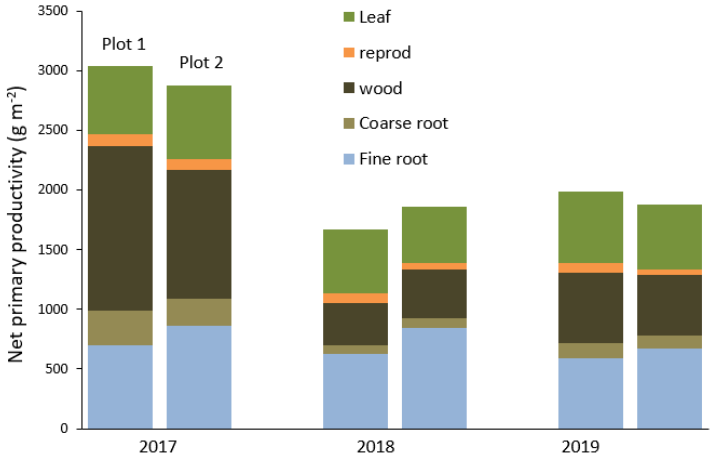


Figura 11.a. NPP foi de 2,740 g m–2 em 2017, 1,776 g m–2 em 2018 e 1,769 g m–2 em 2019. A média dos três é de 2,065 g m–2.

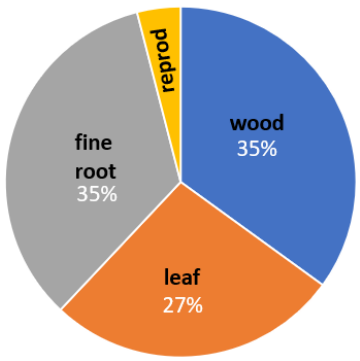


Figura 11.a. NPP foi de 2,740 g m–2 em 2017, 1,776 g m–2 em 2018 e 1,769 g m–2 em 2019. A média dos três é de 2,065 g m–2.

7.5 Distribuição da profundidade das raízes

A construção de torres em volta de cada anel requeriu a escavação de poços profundos para bases concretas, gerando a oportunidade de coletar dados valiosos e de difícil obtenção sobre a distribuição de raízes, sua morfologia e as características físicas e bioquímicas do solo – sendo 1.200 amostras coletadas em três campanhas. Apresentamos, aqui, dados preliminares sobre a distribuição de raízes de cinco poços no anel 1 e cinco no anel 2, coletados em outubro de 2022 dos poços em direção aos anéis. Raízes finas (0-1 mm e 1-2 mm de diâmetro) foram extraídas das amostras de solo de volume controlado em intervalos de profundidade de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-50 cm e 50-100 cm. Amostras adicionais foram coletadas com um perfurador de solo do fundo do poço em profundidades de 100-150 cm e 150-200 cm.

A densidade de raízes finas < 1 mm de diâmetro foi a maior nos 5 cm do topo e diminuiu com a profundidade (Fig. 12.a.). Multiplicando a densidade pela espessura da camda resulta na contribuição d cada camada para o pilar da massa de raízes finas (Fig. 12.b.). A massa total de raízes finas (<1 mm) nos anéis 1 e 2 é 524 g m–2, com 36% nos 5 cm do topo, 50% nos 10 cm de topo e 24% com profundidade maior que 30 cm.

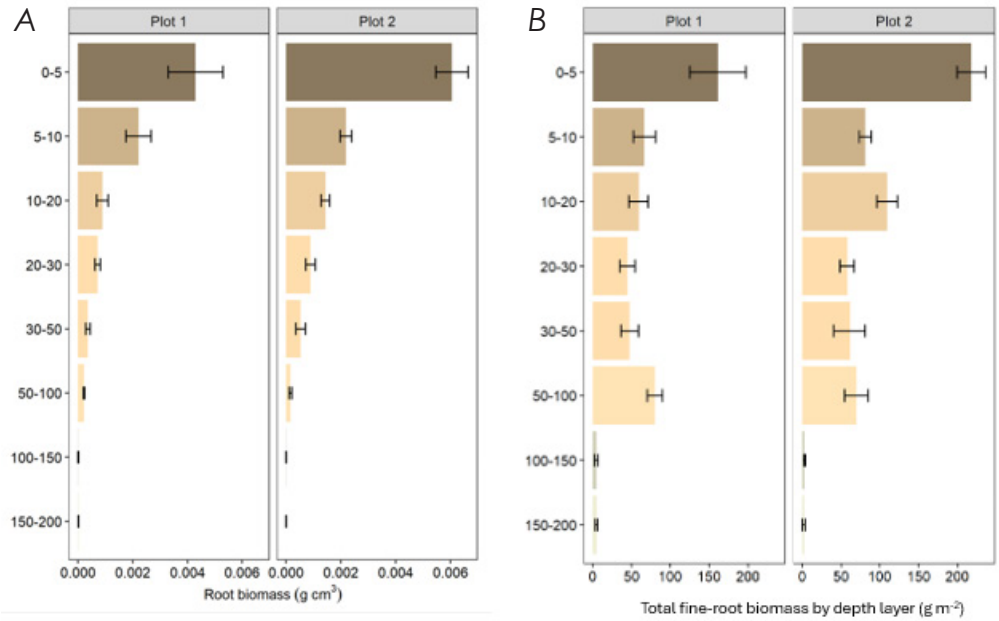


Figura 12. Biomassa de raízes finas nos anéis 1 e 2 do AmazonFACE. A biomassa de raízes finas (<1 mm de diâmetro) por unidade de volume do solo (a) e por unidade de área de solo (b). Os dados são ±SE de cinco poços em cada anel, 1 e 2. Os gráficos foram fornecidos por N. Martins.

A distribuição em profundidade pode ser moldada pela função beta desenvolvida por Gale e Grigal (1987) [188], em que a fração cumulativa de massa de raízes = 1-ßD, onde D é profundidade (Fig. 13). O valor de ß (0,944) para anéis 1 e 2 está dentro da gama de valores ß dos biomas globais, reportados por Jackson e outros (1996) [88], mas indica uma distribuição de raízes mais superficial do que a média para florestas tropicais perenes (0,962). A equação desenvolvida por Zeng (2001) é mais adequada, uma vez que foi desenvolvida para melhor representar a captação profunda de água por florestas tropicais: fração cumulativa = 1 – 1/2 × [exp(-a× D) + exp(-b× D)], apropriada para os anéis 1 e 2; a = 0,02477 e b = 0,1673.

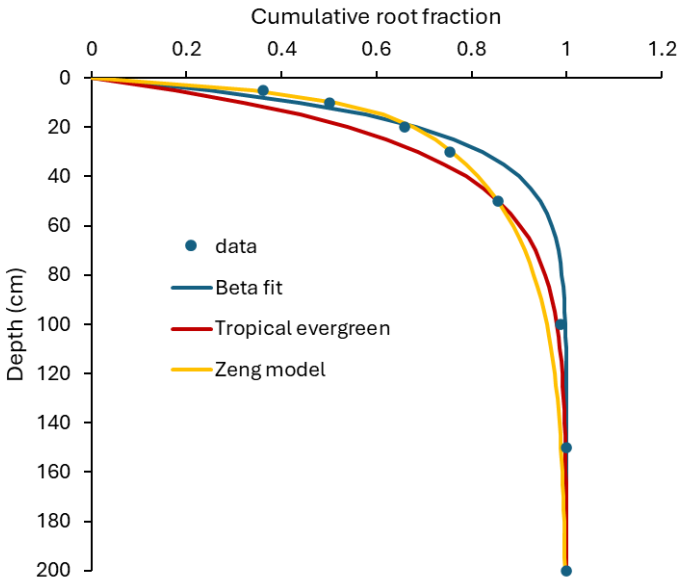


Figura 13. Fração cumulativa de massa de raiz fina (<1 mm) por profundidade. O R2 da função ß é de 0,929, e R2 de Zeng é 0,995. Esses ajustes são comparados à distribuição para florestas tropicais perenes. Jackson et al. (1996) [88].

Esses dados e os ajustes ao modelo dos dados serão importantes na análise da produção de dados sobre raízes finas com minirhizotrons, ciclagem bioquímica, captação de água e modelagem de ecossistema.



7.6 Composição de nutrientes do solo e dinâmicas micro-



Os solos na área do AmazonFACE contêm cerca de 180,5 Mg C ha–1 nos dois primeiros metros. As concentrações totais de C mostram distribuição similar ao longo do perfil do solo como raízes, com maior concentração de C nos 30 cm mais superficiais do solo, mas quase 70% do C é armazenado no primeiro metro (Fig. 14). Os solos são caracterizados pela baixa presença de P total e disponível, com valores chegando somente a 150 µg g–1 nos primeiros 15 cm [89]. Por outro lado, isso resulta em uma ciclagem intensa de nutrientes minerais, como P e K, pelas raízes vegetais da camada de detritos [90]. Também influencia consideravelmente na instabilidade da disponibilidade orgânica e inorgânica de P ao longo de um ano no solo [89]. Ademais, a biomassa microbiana do solo apresenta alta proporção C:P, indicando que a comunidade microbiana do solo deve ser limitada em relação a P, não a N. além disso, as taxas de enzimas extracelulares, que podem ser usadas como substituitas da atividade microbiana do solo, são altamente dinâmicas e respondem às flutuações de C disponível e de abastecimento de nutrientes minerais [91,92].

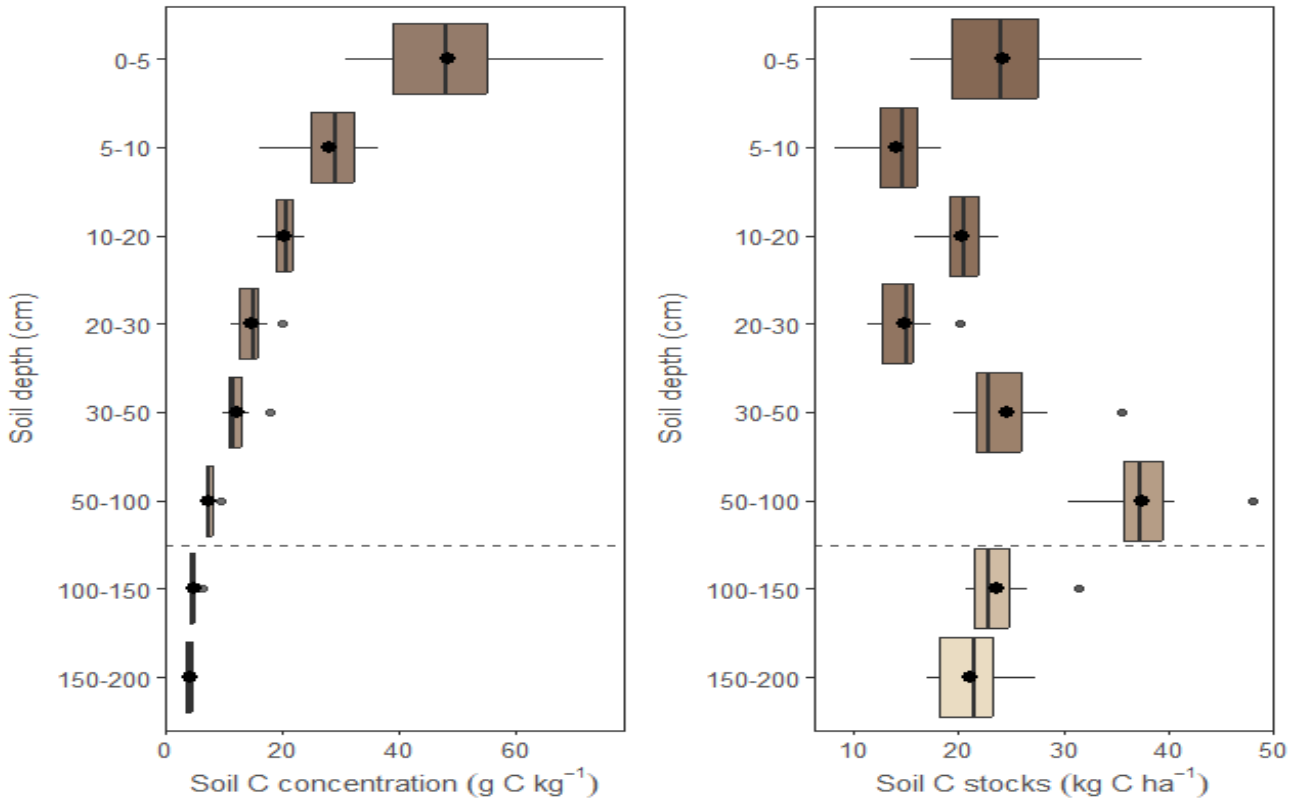


Figura 14. Concentrações de carbono no solo ao longo do perfil do solo (esquerda) e armazenamentos totais por camada de solo por área de solo (direita). Os diagramas mostram a média (cícrulo) e a mediana (linha) bem como o primeiro e o terceiro quartis (n = 10 poços).

7.7 Efeitos de eCO_2 nos sub-bosques da floresta



As principais respostas de vegetação ao aumento de CO_2 nas Câmaras de Topo Aberto localizadas pelo dos anéis do AmazonFACE (ver sesção 8.7) podem ser divididas em "acima do solo" ou "abaixo do solo". As respostas subterrâneas mostram um aumento no comprimento das raízes e da área dentro das OTCs sob eCO_2, seguida por um fortalecimento da mineralização bioquímica do fósforo (P) na serrapilheira [90]. Similarmente, as comunidades de fungos e basctérias do solo se deslocaram em resposta à eCO_2 (93). As respostas sobre o solo foram expressas como um aumento nas taxas de assimilação (Asat), nas taxas de transporte máximo de elétrons (Jmax), no rendimento quântico aparente (Φ) na eficiência de uso da água (WUE), sem qualquer resposta significativa na condutância estomática ou transpiração (Fig. 15). Um aumento na área de folhas verdes e na base de diâmetro em árvores sob eCO_2 também foi observado [54].

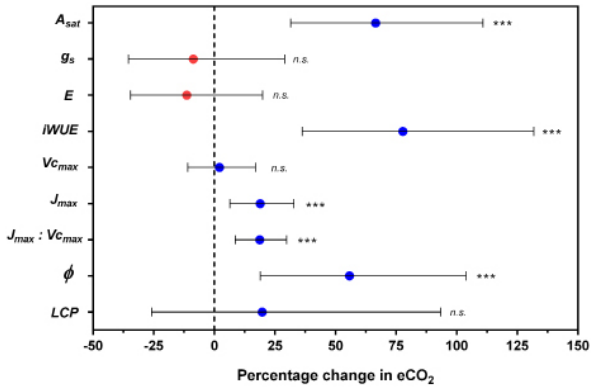


Figura 15. Resposta média a eCO_2 (n = 8, ±95% CI) de sub-bosques nas câmaras de topo aberto do AmazonFACE.

Assimilação líquida de CO_2 em saturação de luz (Asat, µmol m−2 s−1), condutância estomática (gs, mol m−2 s−1), transpiração (E, mmol m−2 s−1), eficiência do uso da água intrínseca (iWUE, µmol mol−1), taxa máxima aparente da carboxilação de RuBisCO (Vcmax, µmol m−2 s−1), axa máxima aparente de transporte de elétrons para a regeneração de RuBP sob saturação de luz (Jmax, µmol m−2 s−1), proporção Jmax: Vcmax, rendimento quântico aparente (Φ, µmol m−2 s−1) e ponto de compensação de luz (LCP, µmol m−2 s−1). A linha pontilhada representa que não houve mudança; o cículo preto (●), aumento, e o cículo vazado (○), queda sob eCO_2. Os asteriscos indicam efeito de tratamento significativo (***p ≤ 0,001) e n.s. = insignificante, n = 8 OTCs (4 – aCO_2 e 4 – eCO_2).

Em um experimento realizado com mudas de ingá em vasos sob eCO_2, com ou sem adição de P no solo, os principais resultados são que as plantas investiram principalmente em carcaterísticas relacionadas à captação de luz e em folhas mais resistentes, indicando que a disponibilidade de P pode ser fator determinante no armazenamento de carbono de espécies tropicais [94]. Ademais, as plantas alocaram mais biomassa para raízes finas e nídulos sob eCO_2, ao invés de aumentarem a formação de fosfatase por raiz [95].

7.8 Modelagem de ecossistemas

Uma prática envolvendo catorze diferentes DGVMs mostrou que a consideração do ciclo do fósforo limita o ganho de biomassa impulsionada pela eCO_2 em média de aproximadamente 50% [20] (Fig. 16). Entretanto, em poucos modelos empregados, o ganho de biomassa devido à eCO_2 foi, de fato, nulo ou quase nulo, por conta da limitação de fósforo. Tal intercomparação enfatiza a ampla variação de métodos para representar o ciclo do fósforo e a necessidade de mais dados coletados em campo a respeito do ciclo de P para melhorar sua representação nos modelos. Outra prática de modelagem estimou que a vegetação tropical em solos pouco férteis, como o do AmazonFACE, devem investir até 29% de sua NPP para a aquisição de P sob eCO_2 [96], o que poderia implicar me mudanças maiores no ciclo de carbono e, possivelmente, no de água. Esses estudos também indicam variáveis-chave e processos que devem ser medidos – como estequiometria tecidual e a atividade da fosfatase no solo – para reduzir as dúvidas sobre o ciclo de P e dos efeitos de interação com eCO_2.

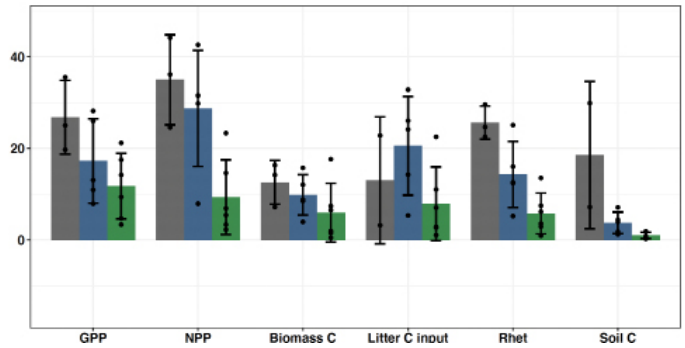
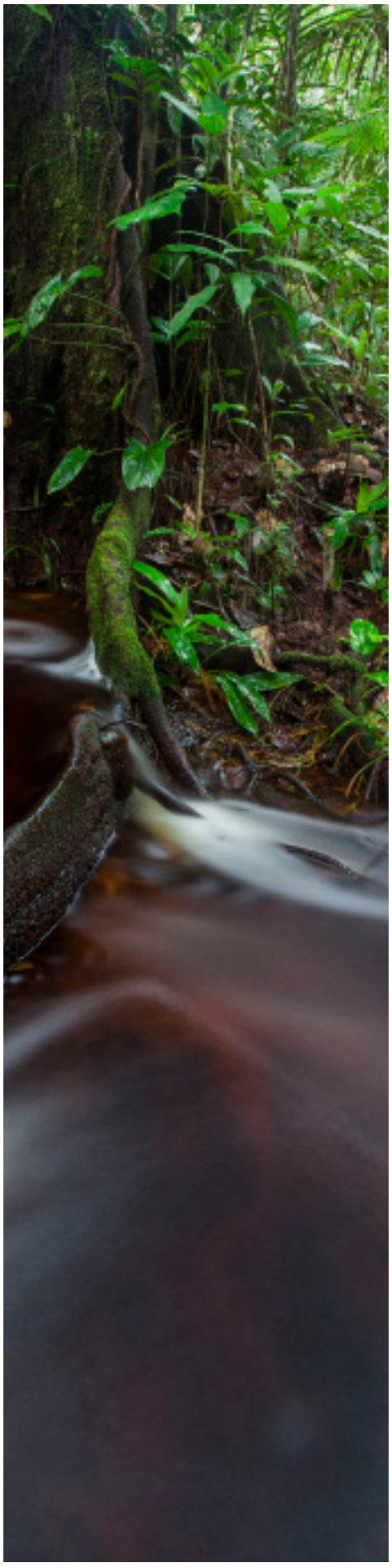


Figura 16. A resposta modelada de 15 anos de eCO_2 em produtividade (CPP e NPP), biomassa de C, serapilheira, respiração heterotrófica e C do solo para um modelo de vegetação global dinâmico considerando os ciclos de C, CN e CNP na grade do AmazonFACE. As respostas a eCO_2 se diferenciam entre a execução de modelo elevado e ambiente, mostrado como média e linhas pretas por grupo modelo, com resultados individuais de modelo como pontos.

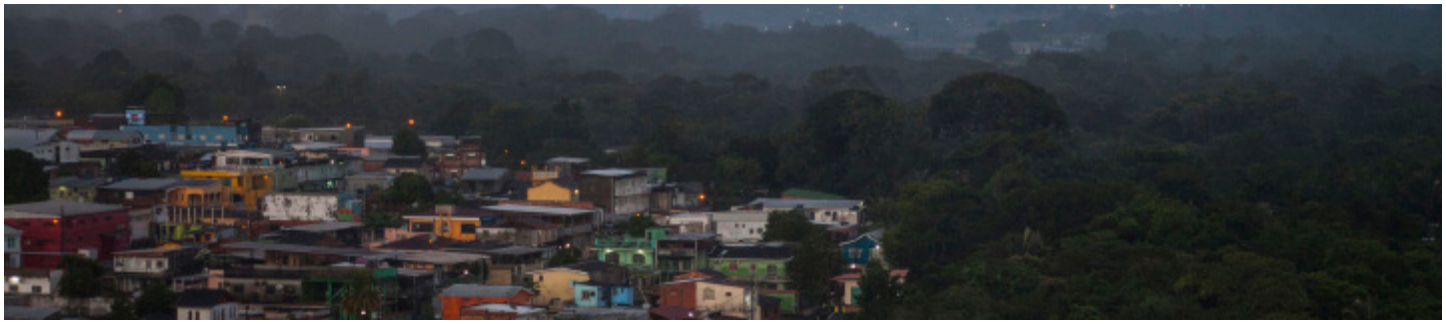
A consideração de uma diversidade funcional maior dentro de um modelo de vegetação leva ao aprimoramento da representação da biomassa total da floresta Amazônica e aumenta sua resiliência às secas [97]. Esses resultados indicam que a diversidade funcional encontrada no campo experimental do AmazonFACE provavelmente exerce função importante nas respostas do ecossistema a eCO_2.

Em outro estudo, uma prática de modelo aoplaco de biosfera-atmosfera mostrou que o efeito fisiológico de eCO_2 leva à redução da condutância estomática, da transpiração, e, por último, causa uma redução de 12% na precipitação na extensão da bacia. Esse indicador equivale à redução da precipitação encontrada em um cenário em que 100% da floresta é substituída - por pasto (9%) [32]. Os mecanismos por trás da redução em grande escala da precipitação devido à CO_2 ocorrem devido às mudanças no balanço de calor da camada limite planetária, indicando que é extremamente importante medir a transpiração (e outras variáveis relacionadas à água) nas parcelas do AmazonFACE para compreender as mudanças em larga escala que o CO_2 pode causar no ciclo hidrológico regional.



7.9 Impactos socioeconômicos do ponto de não-retorno da Amazônia

Um artigo do AmazonFACE publicado em 2018 apresenta os custos estimados do então chamado dieback ou ponto de não-retorno da floresta. Foi demonstrado que não agir ou agir tardiamente a respeito do ponto de não-retorno poderia resultar em impactos sociais maiores que devem acarretar migração para grandes cidades amazônicas por meio de uma cadeia causal de mudanças climáticas e degradação florestal, levando a baixos níveis de água nos rios, afetando transporte, segurança alimentar e saúde. O presente valor líquido dos danos socioeconômicos depois de mais de 30 anos depois do ponto de não-retorno é estimado entre USD$ 957 bilhões e $3.589 bilhões (comparado ao Produto Interno Bruto da Amazônia Brasileira, de USD$ 150 bilhões por ano), decorrente, primeiramente, de mudanças no fornecimento de serviços ecossistêmicos. Os custos de agir agora seriam de um a duas ordens de magnitude menores em danos econômicos. Entretanto, enquanto as alternativas de mitigação do ponto de não-retorno, como a repressão de desmatamento, são economicamente viáveis (USD $64 bilhões), sua eficácia em aumentar a resiliência florestal que previna o ponto de não-retorno ainda é incerta. Concomitantemente, uma série de 20 medidas de adaptação propostas no estudo também são viáveis (USD $122 bilhões) e poderia beneficiar e até evitar de chegar ao ponto de não-retorno.



7.10 Serviços ecossistêmicos e adaptação a mudanças climáticas

Entre as 423 espécies de árvore identificadas nos anéis do AmazonFACE, aproximadamente 60% reportaram atividade humana na literatura, em sua maior parte, para materiais crus – como uso medicinal e comida. Na realidade, populações humanas da Amazônia reconhecem a quantidade de benefícios da natureza, mas comida (incluindo árvores frutíferas, jardinagem e o cultivo de hortas para subsistência e venda), alimentos silvestres (extrativismo), manutenção do habitat e da biodiversidade e fluxo de água são os mais citados em termos de relevância para a alimentação (Fig. 18). Em termos de alimentos e alimentos silvestres, 26% são classificados como serviços ecossistêmicos de provisão de alimentos, e as frutas são o principal uso (Fig. 17.c.). O consumo de matéria-prima (43%) e o uso medicinal (31%) também são benefícios encontrados na literatura para as espécies de árvores dos anéis, e 13% das 220 espécies de árvores têm usos variados, tanto como matéria-prima, uso medicinal e como fornecimento ecossistêmcio de alimentos (Figs. 17.a. e 17.b.). Do total, 24% são espécies listadas como hiperdominantes [98].

Das espécies anteriormente mencionadas e identificadas por uso humano, oito estão mais vulneráveis e propensas à extinção, segundo a Lista Vermelha da IUCN: Tabernaemontana muricata (ameaçada), Couratari guianensis, C. tauari, Mezilaurus itauba and Sorocea guilleminiana (vulneráveis), and Lecythis retusa, Minquartia guianensis and Pouteria platyphylla (quase ameaçada). Os resultados apresentados destacam a importância do avanço de compreensão científica acerca da trajetória da floresta Amazônica em meio às mudanças climáticas, mitigando a incerteza nesse campo para oferecer informações para prospectivas políticas de desenvolvimento para a região.

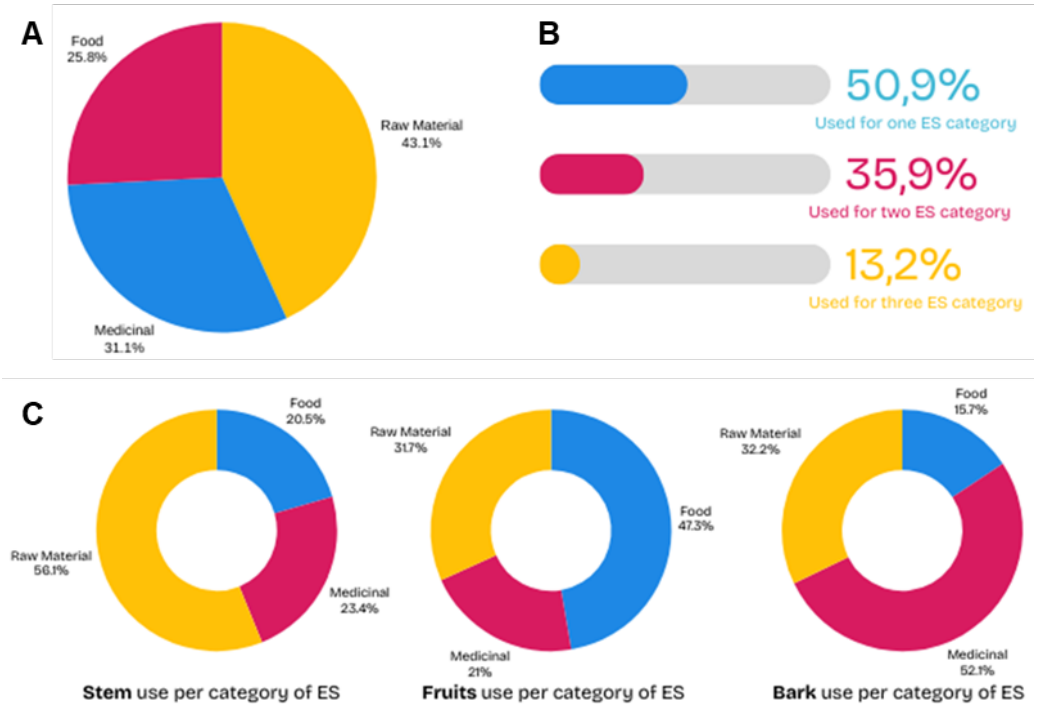


Figura 17. Espécies de árvores nos anéis do AmazonFACE categorizadas por categorias de Serviços Ecossistêmicos (ES). a. O percentual registrado de uso encontrado pela categoria ES; b. O percentual de espécies utilizadas, simultaneamente, para uma, duas ou três categorias de ES; c. O percentual de uso das partes das três vegetações mais comuns citadas por categoria de ES. Retirado de: B. O. Tristão MSc. Tese.

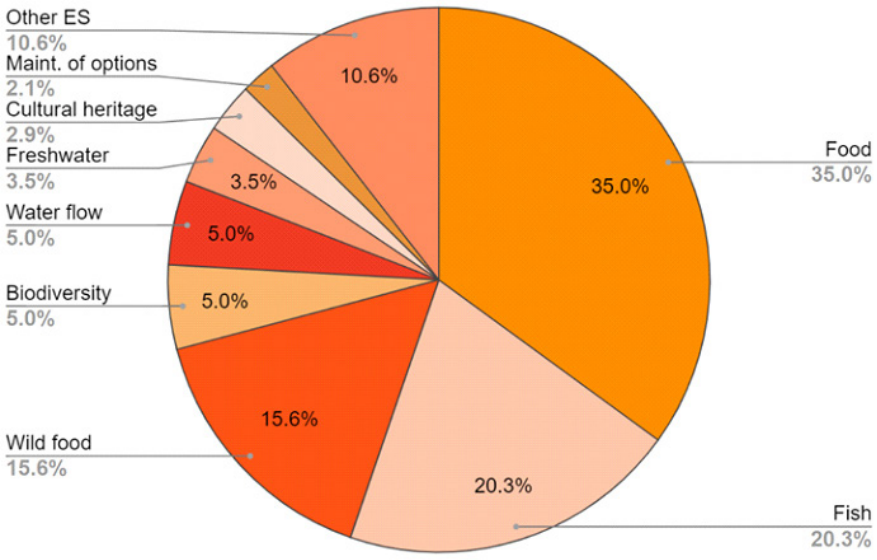


Figura 18. A percepção das populações ribeirinhas da Amazônia sobre os serviços ecossistêmicos (ES) com a porcentagem de citação para cada SE associado a comida. Retirado de: A. L. C. Cris MSc. Tese.

As temperaturas na região do experimento têm aumentadao (Fig. 19), e resultados preliminares mostram que habitantes locais não estão só percebendo as mudanças, como frequentemente precisando se adaptar a elas. Os resultados de pesquisas contínuas ligadas à Área de Pesquisa Socioambiental expõem que o

aumento das temperaturas afeta, por exemplo, as práticas de agricultura, com relatórios demonstrando que as comunidades ribeirinhas estão mudando a frequência de trabalho no campo. Ademais, com as mudanças nas dinâmicas do ciclo de água e a ocorrência de eventos extremos, algumas comunidades se adaptam por meio da mudança de localidade de suas casas – ainda que perto de rios –, com os ciclos do rio também alterando o acesso dessas populações a transporte e, portanto, a incursões a Manaus e outros centros urbanos e a outras pessoas de suas redes de contato.

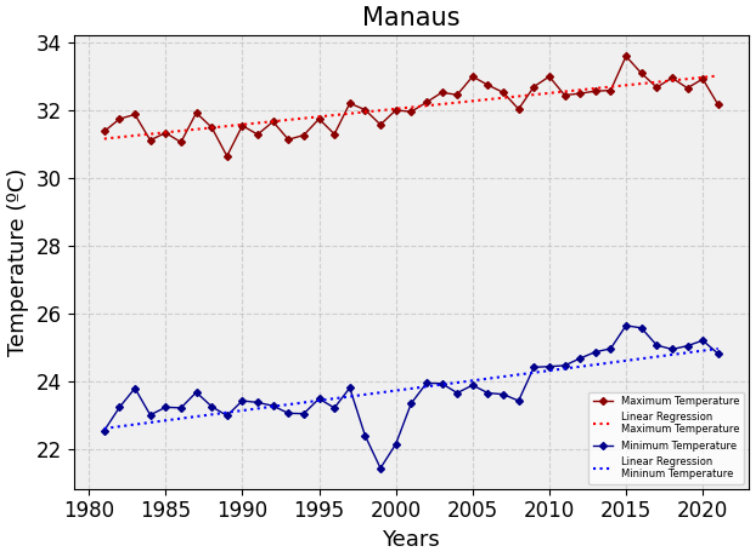


Figura 19. Média Anual Máxima (vermelho) e Mínima (azul) de temperaturas (°C) da municipalidade de Manaus entre 1981-2021.



8. Campo experimental do Amazon-

8.1 Área de estudo e infraestrutura de apoio

O experimento é localizado na Amazônia Central, na Estação de Pesquisa de Cuieiras (Zona Franca 2, ou ZF2), fronteiriça ao Norte pela estrada da ZF2 e situada a aproximadamente 80 km ao norte de Manaus. O sítio do FACE tem acesso via rodovia pavimentada BR-174 e pela não pavimentada ZF2 (34 km). A área é administrada pelo INPA e tem longa tradição de pesquisa em ecologia de floresta tropical, manejo florestal e interações biosfera-atmosfera. Projeto de longo prazo na reserva de Cuieiras começaram em 1979, e as atividades de Experimentos de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA) começaram nos anos de 1990, resultando em uma ampla literatura científica sobre o local. Desde 1999, há monitoramento quase constante da troca de CO_2 entre floresta-atmosfera, vapor de água, calor sensível e latente, transferência de momento e outras variáveis meteorológicas das torres de fluxo instaladas no campo [79,99]. Também há conhecimento velioso sobre a composição de solo do território [100] e das características de efluxo de CO_2 no solo [101], de tendências a longo prazo das dinâmicas e estrutura florestais [102-105], fisiologia básica das folhas [106], balanço hídrico [107] e limitações de nutrientes [45].

A vegetação é madura, dossel fechado e é uma floresta de terra firme ou non flooded. O tipo de floresta, formalmente classificado como Lowland Dense Ombrophylous Forest e os solos encontrados no planalto florestal ao longo da ZF2 (Ferralsol/Oxisol) representam ~32% das florestas da bacia Amazônica (~60% da Amazônia brasileira). Variações locais no tipo de solo, topografia e drenagem criaram padrões distintos na composição de vegetação florestal. Nos planaltos, solos argilosos secos favorecem florestas de 30 m de altura e alta biomassa, com árvores emergentes em mais de 45 m de altura: a típica floresta de terra firme. Nos declives, onde a camada de solo arenoso se aprofunda ao longo da base do vale, a biomassa florestal é mais baixa e a altura da copa é de cerca de 20 a 35 m, com poucas árvores emergentes. Nos vales, os solos arenosos são pouco drenados e nornalmente permanecem alagados durante as estações chuvosas, justificando menor biomassa e árvores menores, de altura entre 20 a 35 m com pouquíssimas árvores emergentes. A temperatura média do ar é 26°C e a média anual de pluviosidade é de cerca de 2.400 mm, com uma estação de seca em julho, agosto e setembro, quando a precipitação mensal não passa de 100 mm [99,104,111,112].

A proximidade a Manaus (cidado com 1.8 milhões de habitantes e com um amplo parque industrial, um aeroporto internacional e instituições de pesquisa) tornou a ZF2 uma opção atrativa para sediar o experimento, quando considerou-se o fornecimento e o transporte de CO_2 necessário para sua realização (ver Seção 5.3). A proximidade do INPA também é uma vantagem para o gerenciamento científico e técnico do experimento. Há uma antiga estação de pesquisa (acampamento) a 500 m de distância da área do AmazonFACE, na ZF2, km 34, que pode hospedar pequenos grupos de cientistas e estudantes por curtos períodos. Ademais, há planos anteriores para a construção de um novo prédio, que pode hospedar os técnicos, pesquisadores e estudantes do AmazonFACE de forma permanente e que serve como uma sede para treinamentos e eventos no território experimental.

Um laboratório de campo avançado com 36 m2 para análise, testagem e armazenamento primário de amostras está instalado na adjacência da área experimental do AmazonFACE. Banheiros, conexão de internet via satélite e eletricidade de 360 kVA de mútiplos geradores movidos a diesel[2] estão disponíveis exclusivamente para o uso do AmazonFACE. A via de acesso da ZF2 foi extensivamente melhorada em 2022 e 2023, com o acréscimo de solo vermelho na sua superfície por todo o trajeto até o experimento, promovendo condições seguras para o trânsito de caminhões de CO_2 de 15 toneladas durante todas as estações, e até mesmo de veículos de duas rodas. Pequenos serviços de reparo são necessários a cada dois anos para manter uma trafegabilidade alta qualidade.



[2] A linha de energia mais próxima no local ZF2 está localizada a 34 km a leste, ao longo da rodovia pavimentada BR-174. Estimativas iniciais indicam que os custos para estender um cabo elétrico da BR-174 ao longo de toda a estrada não pavimentada

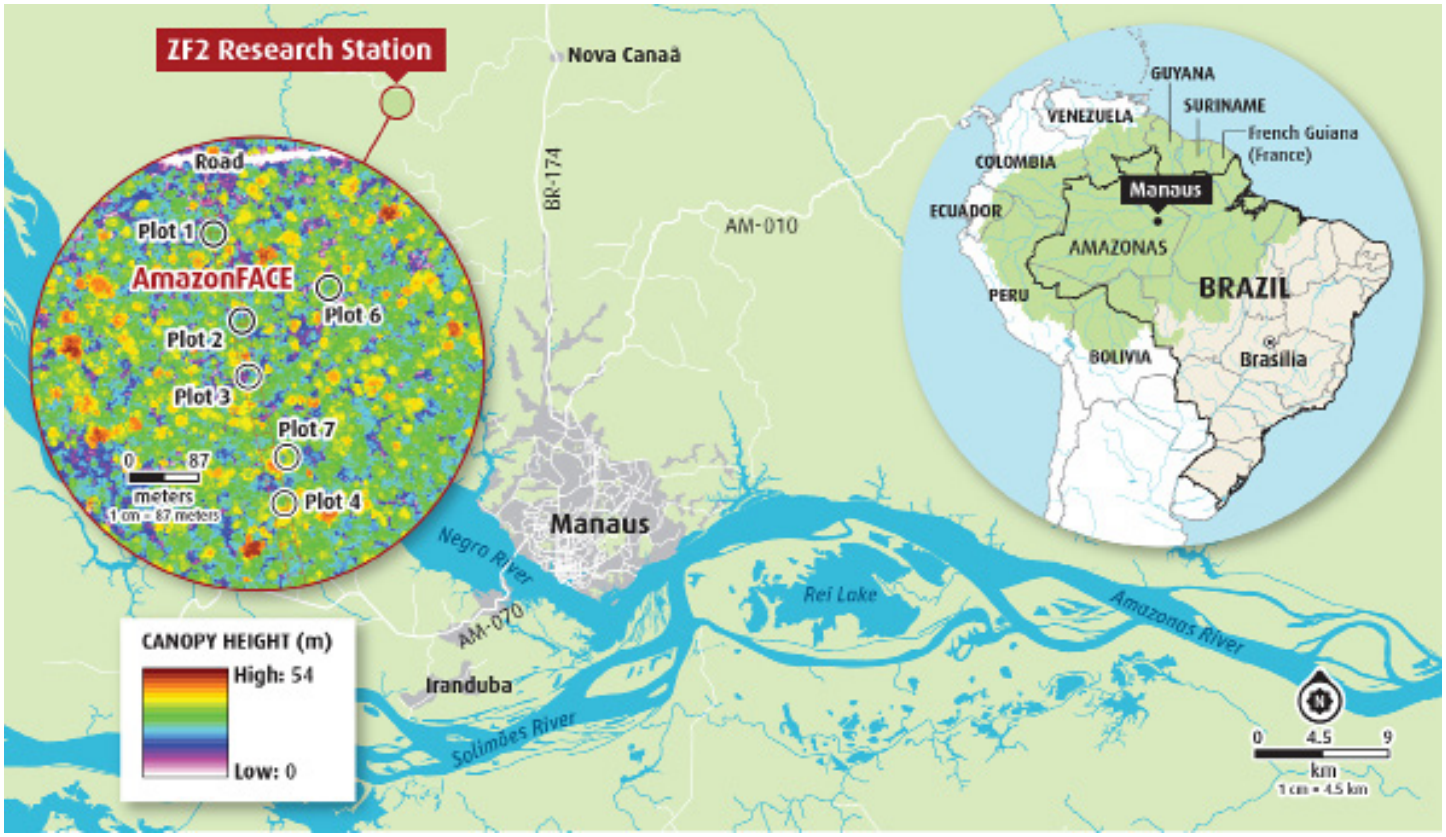


Figura 20. A localização exata das áreas experimentais do AmazonFACE estão apontadadas no mapa acima.

A localização exata dos anéis experimentais do AmazonFACE são mostradas no mapa anterior. Parte desses anéis têm o benefício do longo estudo iniciado em 1996 pelo Projeto Jacarandá [113]. Esse projeto inclui duas trilhas de amostragem, com 0,02 × 2,5 km cada (um total de 5 ha) de anéis permanentes nas diresções Norte-Sul (NS) e Leste-Oeste (LO). Quatro anéis do AmazonFACE (1, 2, 3 e 4) estão localizados no planalto florestal inicial da trilha NS. Portanto, um número de árvores dentro desses quatro anéis foram monitorados desde os anos 90 (1996, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, e anualmente a partir de 2015).

No recenseamento, todas as árvores com DAP≥2cm identificadas no início do experimento em 2016 são medidas novamente para calcular o desenvolvimento anual – e aquelas que morreram são identificadas como "mortas" na planilha. Em 2023, foi realizada nova pesquisa nos anéis para identificar novos indivíduos dentro dos anéis com DAP ≥ 2cm, por exemplo. Um sobgrupo de árvores foi equipado com bandas de dendômetro manuais, medidas mensalmente para estimar a variação sazonal nas taxas de crescimento [103]. Muitos outros projetos foram realizados nessas parcelas do transecto, incluindo um estudo sobre a respiração do ecossistema e uma comparação com dados de covariância de vórtices medidos em torres, além de uma caracterização das propriedades do solo e da dinâmica do ciclo do carbono no solo em locais de platô (Latossolo) e de baixio (Espodossolo) [100, 102]. Também foi realizado um estudo comparativo pan-Amazônico da estrutura da floresta e das dinâmicas do ciclo de carbono sobre o solo [102], um estudo sobre a taxa de crescimento das árvores e de estrutura etária de radiocarbono [115], além de uma variedade de sínteses, relatórios técnicos e teses e dissertações de mestrado e doutorado do INPA. Esses trabalhos anteriores são excelente base para o experimento AmazonFACE.

8.2 Tecnologia FACE



O enriquecimento de CO_2 ao Ar Livre (FACE, sigla em inglês) é uma tecnologia que permite a elevação da concentração atmosférica de CO_2 em áreas amplas com mínimos distúrbios para o ecossistema natural [116,117]. Isso é possível por meio da liberação de CO_2 em zona contra o vento do anel, permitindo que o CO_2 seja carregado por toda a sua extensão diluído no ar ambiente. Os algoritmos de respostas e previsões com controle computadorizado mantêm a meta de concentração de CO_2 ao decorrer do volume do anel.

A primeira aplicação bem sucedida da tecnologia FACE em uma floresta alta aconteceu em 1994 pelo Laboratório Nacional de Brookhaven (BNL), na Duke Forest, na Universidade Duke, na Carolina do Norte, EUA. Esse studo inicial foi expandido para um experimento integralmente replicado que operou de 1996 a 2010 [118]. Foram construídas instalações adicionais de FACE em florestas temperadas usando esse design em Oak Ridge, Tennessee, EUA [119], e Rhinelander, Wisconsin, EUA [120]. O BNL atualizou o design da instalação para uso em florestas de eucalipto em Nova Gales do Sul, Na Austrália, com o EucFACE [121] e em floresta de carvalho madura no Reino Unido (BIFoR FACE) [122]. A tecnologia FACE usada na Amazônia é baseada nos designs bem-sucedidos usados na Universidade Duke e nas instalações do EucFACE e BIFoR FACE, adequada para as condições únicas encontradas na floresta Amazônica. Desafios específicos para estabelecer um experimento FACE nessa localidade incluem o distanciamento de infraestrutura como rodovias pavimentadas, rede elétrica e fontes industriais de dióxido de carbono líquido, e uniformemente elevar a concentração de CO_2 a até 35 m de altura, além da densa cobertura florestal. .

8.3 Guindastes e torres

Os seis aneis experimentais são equipados com guindastes de torre que viabilizam a construção da estrutura do anel e fornecem aos cientistas acesso à cobertura florestal durante o experimento. Dependendo da distância entre dois anéis, uma unidade atende a ambos. Um total de quatro unidades de guindastes Liebherr® 85 EC-B foram instaladas na área experimental. Uma unidade atende ao anel 1 e outra unidade fornece acesso concomitante aos anéis 2 e 3. Os anéis 4 e 7 são providos por um terceiro guincho, e a quarta unidade é próxima ao anel 6[3]. O braço do guindaste tem cerca de 50 m de comprimento e estão a uma altura de cerca de 45 m, cobrindo uma área de aproximadamente 1 ha de floresta, tanto dentro como fora dos anéis FACE. Cestos que carregam até três pessoas são usados na ponta do braço, e os guindastes podem ser operados da cabine na torre ou por meio de controle remoto – dentro do cesto ou mesmo em solo. Esses guindastes são, atualmente, os únicos utilizados para pesquisa de cobertura florestal em toda a floresta Amazônica, e as operações e procedimentos de segurança obedecem estritamente à regulamentação brasileira de trabalho em altura.

Uma torre modular de 37 m de altura, com cabo de subida (andaime) está localizada no centro de cada anel, permitindo que os sensores requeridos e instrumentos sejam devidamente colocados entre e sobre a cobertura florestal. Também fornecem aos pesquisadores acesso próximo de algumas árvores sob o dossel.



[3] A linha de energia mais próxima no local ZF2 está localizada a 34 km a leste, ao longo da rodovia pavimentada BR-174. Estimativas iniciais indicam que os custos para estender um cabo elétrico da BR-174 ao longo de toda a estrada não pavimentada

8.4 Design do experimento

O design do experimento AmazonFACE consiste em três áreas de CO_2 elevado (eCO_2) e três áreas de CO_2 ambiente. Cada área tem aproximadamente 30 m de diâmetro, mas sua forma precisa depende da localização dos troncos e das copas das árvores. Todas as áreas, independentemente se receberão eCO_2 ou não, possuem um anel de 16 torres construído em suas bordas externas. Assim, os anéis-ambiente configuram controle da infraestrutura. As torres medem 35 m de altura, mas são extensíveis em até 40 m, dado o possível crescimento das árvores. CO_2 líquido será armazenado em grandes tanques isolados, à pressão de aproximadamente 25 bar, e vaporizado por meio de vaporizadores passivos de ar ambiente, depois distrubuído para as áreas de tratamento através de uma rede de tubulação. Nas áreas de eCO_2, o CO_2 será então misturado ao ar ambiente antes de ser liberado por meio de tubos verticais que contêm múltiplos buracos em sua extensão, e que se extendem da superfície do solo à copa das árvores (dois canos por torre, 32 por anel).

O sistema de controle mantém o enriquecimento de CO_2 relativo às concentrações dos ambientes das áreas por meio de algoritmos feedbacks e feedforward baseados nas medidas de nível de CO_2, velocidade e direção do vento [117]. O fluxo de CO_2 para cada câmara de gás e o número de furos e suas localizações podem ser adaptados para manter os níveis esperados de CO_2. Os aumentos esperados em concentração de CO_2 em relação ao ambiente no centro de cada anel é de 200 ppm, com ocorrência de aspersão do nascer ao pôr-do-sol.

Em cada área, os 5 metros mais próximos às torres forma as zonas de buffer nos quais não são realizadas medições fisiológicas, e somente árvores com troncos firmados nos 20 metros centrais do experimento são consideradas para o monitoriamento de produtividade. Os guindastes (ver seção 7.3) facilitam o acesso às copas em todas a árvores dentro do anel, permitindo que sejam feitas as medições ecofisiológicas nas folhas, bem como o sensoriamento remoto das dinâmicas e processos das copas (por exemplo, a temperatura das folhas e a fluorescência de clorofila por indução solar, veja Áreas de Pesquisa). Além do monitoramento ecofisiológico, as medidas principais feitas dentro dos aneis incluem:

1) todos os componentes de NPP (copa, caule e raízes finas) e seu conteúdo nutricional;

2) nutrientes do solo e dinâmicas de carbono, incluindo N, P e cátions, a respiração do solo e as mudanças nos processos microbianos, de raízes e micorrízicos;

3) ciclo da água, incluindo hidratação do solo, fluxo de seiva, características hidráulicas e ecofisiológicas (veja também Áreas de Pesquisa e Tabela do

O AmazonFACE não instalará a infraestrutura das áreas de controle, mas realizará o monitoramento das árvores específicas dentro dos anéis, para maximizar o número de espécies estudadas sob condições de CO_2 ambiente e CO_2 elevado. Essa abordagem contrasta com os experimentos FACE anteriores, mas está de acordo com a vasta biodiversidade de árvores do local. Os guindastes que permitem acesso às árvores dentro dos anéis são necessariamente equipados com extensores horizontais de até 50 m, o que torna possível o acesso às copas de diversas árvores no amplo platô, incluindo aquelas um pouco mais distantes da fumigação de CO_2, em especial para os guindastes que operam dentro das áreas. Assim, esses guindastes fornecem um acesso às copas de forma única em termos de pesquisas em florestas tropicais, e auxiliará os pesquisadores a lidarem com questões relacionadas à vasta biodiversidade e ao potencial de resposta de espécies específicas ou grupos funcionais específicos ao CO_2 elevado. No geral, o design experimental do AmazonFACE foi desenvolvido para garantir que sua instalação poderá determinar como os ciclos de carbono, de água e de nutrientes responderão ao eCO_2 em uma floresta tropical biodiversa e em diferentes escalas, desde a microbiana, passando pelas árvores, até todo o ecossistema.

8.5 Medidas meteorológicas



Variáveis meteorológicas são medidas continuamente para todos três níveis: abaixo, dentro e sobre a copa florestal. Acima da copa, cada anel terá sensores para precipitação e radiação global e difusa. Abaixo, no solo, haverá sensores medindo os fluxos de calor, a umidade, a permissividade elétrica relativa e a temperatura do solo. Dentro da floresta, as torres meteorológicas serão equipadas com perfis de temperatura atmosférica, umidade relativa, velocidade e direção do vento, radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e radiação infravermelho.

Para complementar as medidas meteorológicas, foi instalado um sistema atmosférico integrado de perfis de CO_2 e H2O com seis níveis diferentes ao longo da copa. Ainda, como parte do sistema de controle FACE, foi implantado na cabine de controle de cada anel um sistema de amostragem multiporta, para medir [CO_2] ao longo do espaço tridimensional do anel. Todas essas medições meteorológicas são gerenciadas com registradores de dados robustos e imediatamente transferidas para a base de dados do AmazonFACE.

8.6 Demanda e provisão de CO_2



A estimativa atual da necessidade de CO_2 para cada parte enriquecida com CO_2 no AmazonFACE, sob um tratamento de CO_2 de +200 ppm acima da ambiente, com tratamento apenas durante o dia e velocidade média do vento acima do dossel de 1,25 m s-1, é de aproximadamente 3,0 toneladas métricas por dia, ou cerca de 1100 Mg (= toneladas métricas) por ano. Essas quantidades são baseadas em taxas reais de uso de CO_2 em três experimentos FACE com dimensões de parcelas semelhantes às planejadas para este estudo. Tomando 1100 Mg por anel por ano como valor de referência, a necessidade de CO_2 para o experimento completo de longo prazo (três parcelas FACE com CO_2 elevado) alcançaria 3300 Mg por ano. Estimativas mais precisas serão obtidas durante a fase de testes com um par de anéis de controle/tratamento até meados de 2024.

Atualmente, há dois fornecedores de CO_2 em Manaus – CarboMan e Carboxi – que produzem CO_2 a partir da queima de gás natural. Embora essa seja a forma mais fácil de adquirir CO_2 para a fase de testes, o preço em abril de 2024 estava na ordem de USD $1500 por Mg de CO_2. No entanto, os dois fornecedores não têm, no momento, capacidade para fornecer a quantidade de CO_2 necessária para o experimento completo de longo prazo, mas poderiam expandir sua produção para atender às demandas do AmazonFACE. Outros fornecedores se ofereceram para iniciar suas atividades em Manaus para atender ao experimento, ou até trazer CO_2 líquido do Nordeste ou Sudeste do Brasil a preços competitivos. O caminho mais provável, conforme recomendado por especialistas no mercado de CO_2 no Brasil, é que múltiplos (dois ou três) contratos sejam firmados com fornecedores de CO_2 para evitar qualquer escassez, caso algum fornecedor enfrente problemas em sua unidade de produção.

Seis bancos de vaporizadores de 650 m3 h-1 foram dimensionados para o experimento completo, e seis tanques de armazenamento de 25 Mg de CO_2 pertencentes ao AmazonFACE foram instalados na estrada ZF2, em frente ao local do experimento.

8.7 Câmaras de topo aberto



Um experimento com o objetivo de expor áreas do sub-bosque da floresta a eCO_2 por meio de Câmaras de Topo Aberto (OTCs) na área do AmazonFACE foi iniciado em 2018 e está em operação desde então. O desenho experimental consiste em doze pequenas áreas circulares cercadas por trincheiras para conter raízes externas à mini parcela, ou anel. As OTCs estão presentes em oito dessas áreas, enquanto as outras quatro servem como controles sem infraestrutura ("lacuna"). As câmaras têm formato octogonal com diâmetro de 2,40 m e altura de 3,0 m. São feitas de alumínio e têm paredes de policarbonato transparente que permitem a entrada de luz (Fig. 21). A operação consiste em manter o $[CO_2]$ nas OTCs de tratamento (ou seja, com eCO_2) aproximadamente 200 ppmv acima do $[CO_2]$ das OTCs de controle (ou seja, 200 ppmv acima do $[CO_2]$ ambiente) entre 6 h e 18 h. Este experimento com OTCs está localizado ao lado da área onde as parcelas do AmazonFACE estão situadas (Fig. 22). É o primeiro experimento in situ que expõe a vegetação do sub-bosque da floresta amazônica à eCO_2, e representa um importante estudo científico considerando que o sub-bosque é responsável por uma fração considerável da produtividade primária líquida da floresta, da área foliar e da evapotranspiração [123,124].

O foco do experimento com OTCs é analisar e entender as relações de carbono, nutrientes e água sob eCO_2 nas plantas (mudas de árvores, cipós juvenis e ervas), que ocorrem naturalmente dentro das câmaras. Além disso, outro experimento ocorreu dentro das OTCs, usando mudas em vasos, com o objetivo de entender como a baixa disponibilidade de fósforo (P) no solo afeta a assimilação de carbono pelas plantas sob condições ambientais e eCO_2. Seis vasos com sementes de Inga edulis foram alocados em cada OTC, três com solo natural (-P) e três com solo fertilizado com fósforo (+P).

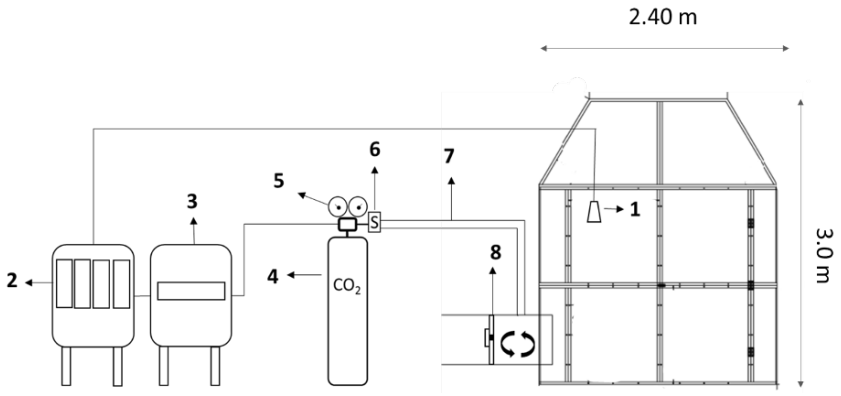


Figura 21. Estrutura de design da Câmara de Topo Aberto do AmazonFACE, o esquema de operação e seus componentes. Um coletor de entrada de amostras de ar (1) para analisar as concentrações de CO_2 em analisadores de gás infravermelho (2). (3) Um datalogger armazena dados e o software de operação para aspersão de CO_2. (4) Cilindro de CO_2 pressurizado e (5) manômetros para controlar a pressão de saída do CO_2. A liberação de CO_2 é controlada por válvulas solenoides (6), canalizada por um tubo de borracha (7) e misturada com o ar ambiente por meio de um ventilador (8) antes de entrar na OTC com eCO_2.

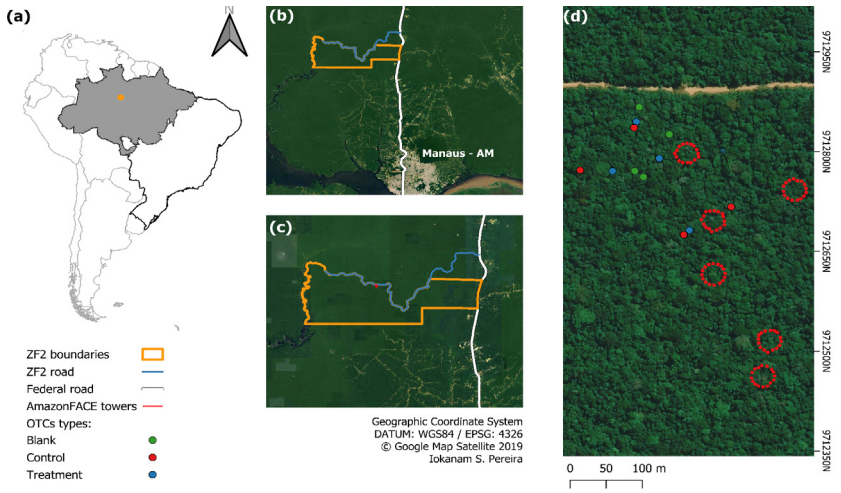


Figura 22. Contexto geográfico em grande e pequena escala do experimento com câmaras de topo aberto, localizado na área experimental do AmazonFACE. O sistema de OTCs projetado em 2018 foi capaz de manter o [CO_2] acima do ponto de ajuste, com os principais problemas sendo falhas de engenharia devido às condições adversas encontradas no ambiente da floresta tropical e problemas com o fornecimento de CO_2, comprometendo 20% do tempo de operação das OTCs entre 2018 e 2023 [125]. Alguns dos resultados publicados obtidos com as OTCs são apresentados na seção 7.5.

Quando este Plano Científico foi escrito, havia estudos em andamento para avaliar os fluxos de água dentro das OTCs, com ênfase na condutância estomática e na estimativa integrada sub-bosque-dossel da transpiração sob eCO_2 ocorrendo naturalmente dentro das OTCs. Com o início do experimento AmazonFACE, no qual o sub-bosque também será exposto ao eCO_2, as OTCs podem ser usadas como uma plataforma de testes para experimentos manipulativos de pequena escala, por exemplo, com cipós plantados e/ou outros grupos funcionais, e potencialmente incluindo a adição de nutrientes ao solo. Embora cientificamente inovador e logisticamente mais simples, o experimento com OTCs pode não responder às perguntas que pretendemos abordar no experimento completo em escala de ecossistema FACE.

9. Áreas de Pesquisa

9.1 Área de Pesquisa 1: Carbono



Contexto

As diversas respostas dos ecossistemas florestais (ou de qualquer ecossistema terrestre) ao CO_2 elevado (eCO_2) começam com a absorção de CO_2 pelas folhas a partir da atmosfera. Todas as respostas subsequentes, como o aumento do crescimento das árvores, ajustes na área foliar, mudanças nos ciclos de nutrientes e água ou alterações nas populações microbianas do solo e sua atividade são respostas secundárias ou terciárias a uma resposta da troca gasosa ao nível foliar. A teoria prevê que é provável que a fotossíntese a nível foliar no AmazonFACE seja intensificada sob eCO_2, e essa resposta crítica deve ser documentada e quantificada. No entanto, essa resposta fundamental ao nível foliar pode ou não escalar para uma maior absorção anual de CO_2 por todo o dossel da floresta, dependendo de ajustes na área foliar, nas respostas foliares ao longo do dossel e das estações e da disponibilidade de recursos como nutrientes e água.

Portanto, a principal questão que deve ser abordada é o destino do C aumentado que é absorvido da atmosfera, ou seja, como é alocado para diferentes órgãos e processos das plantas, e o quão rápido e em que quantidade retorna à atmosfera. Há muito tempo se reconhece que "o efeito inicial do eCO_2 será aumentar a produtividade primária líquida (NPP, sigla em inglês para a quantidade total de C fixado na biomassa e disponível para consumo) na maioria das comunidades de plantas. "(...) uma questão crítica é até que ponto o aumento da NPP levará a um aumento substancial da biomassa das plantas. Alternativamente, o aumento da NPP poderia simplesmente aumentar a taxa de renovação de folhas ou raízes sem alterar a biomassa das plantas." [37]. Essa análise centrada nas plantas será ampliada para o nível do ecossistema, reconhecendo que o aumento da alocação para reservatórios de rápida renovação (folhas e raízes finas) e o aumento nas próprias taxas de renovação podem levar a um aumento no fluxo de C para o solo e no potencial de captação em reservatórios de C de vida mais longa.

Perguntas de Pesquisa

1) Quanto de C adicional é absorvido pela floresta (através da fotossíntese) em resposta ao eCO_2? A resposta é mantida ao longo do experimento?

2) Como a alocação de C para diferentes compartimentos e fluxos do ecossistema muda? Qual é o destino de qualquer C adicional alocado?

3) Se houver transferência adicional de C para a camada de serapilheira e solo, depositada por meio da produção de detritos de folhas e raízes e exsudação de raízes, alguma parte desse carbono se acumula em matéria orgânica de solo de longa duração ou ele é integralmente respirado de volta para a atmosfera?

Os processos do ciclo do carbono são alterados pelo ambiente relativo a nutrientes e água, e as análises descritas aqui devem estar intimamente conectadas às Áreas de Pesquisa de Nutrientes e Água.

Objetivos e Tarefas

Objetivo 1.1. Determinar as respostas de produtividade primária bruta do estágio florestal à eCO_2

A Produtividade Primária Bruta (GPP) descreve a integração no espaço e no tempo da absorção de CO_2 da atmosfera pelo dossel florestal. A GPP em escala relativa ao dossel completo não pode ser medida diretamente, mas podem ser adotadas abordagens independentes para estimá-la.

Tarefa 1.1.1. Medir a fotossíntese ao nível foliar

A assimilação fotossintética de carbono e a condutância estomática de múltiplos indivíduos e em diferentes estratos do dossel serão medidas, e os dados analisados em relação a luz, temperatura, umidade, conteúdo de nutrientes (coordenado com a Área de Pesquisa 2), conteúdo de carboidratos nas folhas e metabólitos secundários, estrutura foliar, fenologia e estação do ano. Pesquisas anteriores e orientações do Objetivo 4.1 ajudarão a determinar a estratégia de amostragem ideal. As medições devem focar nas taxas de assimilação líquida de carbono nas concentrações de CO_2 prevalentes com levantamentos sazonais de curvas de resposta A-Ci e de luz. Medições simultâneas de condutância estomática apoiarão a estimativa da eficiência instantânea de uso da água ao nível foliar, afetando a disponibilidade real de CO_2 para os cloroplastos e no apoio aos objetivos da Área de Pesquisa 3 (Água).

Tarefa 1.1.2. Escalar as medições ao nível foliar

Avaliações baseadas em folhas sobre a absorção de CO_2 podem ser usadas em modelo para escalar a GPP do dossel florestal, utilizando um modelo de escala que leve em conta a interceptação vertical da luz a temperatura das folhas e do dossel, e pressupostos de otimização. A distribuição espacial de fatores climáticos (radiações de ondas longas, NIR e de ondas curtas, temperatura da superfície e do ar, umidade e vento) será monitorada continuamente ao longo da extensão do dossel usando estações meteorológicas automáticas. Diversas metodologias podem ser consideradas para a análise de turbulência, incluindo métodos de balanço, de variância e abordagens de "renovação de superfície".

Tarefa 1.1.3. Calcular a GPP como NPP + respiração autotrófica

Combinar medições de NPP (Objetivo 1.2) com medições escalonadas de efluxo de CO_2 do caule (tronco e galhos) (após contabilizar o CO_2 do solo no fluxo de seiva), respiração das folhas no escuro e taxas de respiração das raízes (Tarefa 1.2.4). A escala para a GPP anual exigirá a integração da estrutura das árvores e do estágio florestal, variação entre árvores individuais e controles ambientais sobre as taxas de respiração.

Tarefa 1.1.4. Análise espectral do dossel

Um sistema de fluorescência induzida por clorofila pelo sol (SIF), FluoreSens10 (Campbell Scientific), será instalado em uma torre acima dos anéis 1 e 2 antes do início dos tratamentos de CO_2 e mantido por dois anos de fumigação de CO_2. O sistema inclui um espectrômetro de alta resolução cobrindo as bandas de absorção de oxigênio O2A e O2B na atmosfera. Com a calibração adequada, esse sistema pode fornecer monitoramento contínuo da GPP. O sistema também inclui um segundo espectrômetro cobrindo comprimentos de onda de 350-1000 nm, a partir do qual podem ser obtidos índices da dinâmica sazonal da estrutura da copa (por exemplo, NDVI), da fisiologia do dossel (por exemplo, índices de reflectância fotoquímica, PRI), e através de regressão por mínimos quadrados parciais, estimativas da atividade fotossintética (Vcmax, Jmax), bioquímica do dossel (por exemplo, N, C, δ15N e conteúdo de fibras), e morfologia foliar (massa foliar por área, LMA). Sensores de linha de PAR voltados para cima e para baixo também farão parte da instalação.

Objetivo 1.2. Determinar NPP e a alocação de GPP para respiração autotrófica e a produção de piscinas de biomassa vegetal de diferentes taxas de turnover

O Objetivo 1.2 medirá a NPP e abordará o destino do aumento de carbono (C) absorvido da atmosfera, ou seja, quanto do carbono é alocado para diferentes órgãos das plantas (folhas, tronco, raízes finas), seus processos, e quão rapidamente e em que quantidade o carbono é devolvido à atmosfera. A NPP é estimada pela integração

das medições da produção anual de madeira, folhas, material reprodutivo e raízes finas, além de alguns componentes menores adicionais (exsudação de raízes, emissões voláteis do dossel, casca caída e perdas para herbívoros). Também serão determinadas as taxas de renovação de folhas e raízes finas.

Tarefa 1.2.1. Produção de madeira do tronco

Pesquisas anuais irão medir a circunferência das árvores com diâmetro à altura do peito (DAP) > 5 cm. As pesquisas serão realizadas em maio, no final da estação chuvosa, quando as árvores estão totalmente hidratadas e o diâmetro deve ser mais estável. Um subconjunto de árvores será equipado com dendrômetros automáticos que fornecerão dados de hora em hora, a partir dos quais as dinâmicas sazonais de crescimento das árvores poderão ser determinadas. Árvores com DAP de 2-5 cm serão medidas anualmente em três subpartes de 1,5 × 1,5 m, relevante para o Objetivo 4.2 na Área de Pesquisa 4. O aumento anual de diâmetro de cada árvore é convertido em aumento de matéria seca (DMI) por meio de equações alométricas combinadas com a densidade da madeira específica da espécie.

Equações alométricas genéricas de Chave et al. (2005) [85], baseadas no diâmetro ou em diâmetro e altura, quando os dados de altura da árvore forem possíveis, são usadas atualmente com equações suplementares derivadas localmente para árvores com DAP de 2-10 cm. O uso destas ou de qualquer outra equação alométrica publicada implica em muitas incertezas, incluindo diferenças entre espécies, consideração de copas quebradas e mudanças em resposta ao eCO_2. Pesquisas colaborativas utilizando escaneamento a laser terrestre (TLS) dos anéis devem fornecer estimativas confiáveis da altura das árvores e da estrutura do dossel. Uma equação alométrica específica para o local e para a árvore será desenvolvida a partir da determinação do volume da árvore por TLS. O crescimento da madeira será analisado em relação à filogenia, tamanho da árvore, posição no dossel ou características aéreas, em coordenação com a Área de Pesquisa de Biodiversidade.

Tarefa 1.2.2. Produção de folhas

A queda de serapilheira foliar será coletada mensalmente em armadilhas de serapilheira. A produção de massa de serapilheira pode ser relacionada à produção de massa foliar por meio da análise da renovação foliar e mudança na Massa Foliar por Área (LMA) durante a senescência. O Índice de Área Foliar (LAI) pode ser estimado por meio da integração dos dados de massa de serapilheira e LMA com fotos hemisféricas. Uma resposta da NPP ao eCO_2 pode então ser separada em um componente funcional (fotossíntese por unidade de área foliar) e um componente estrutural (LAI e a distribuição da área foliar no dossel). Uma pesquisa TLS do local fornecerá informações sobre a estrutura do dossel. Tecidos reprodutivos (flores e frutos) e galhos coletados nas armadilhas serão separados da serapilheira foliar e quantificados. As estações meteorológicas automáticas distribuídas com sensores de radiação espectral também apoiarão a quantificação da distribuição da área foliar e lenhosa. A serapilheira de galhos também será medida. As mudanças no LAI e na distribuição da área foliar serão relacionadas às mudanças na distribuição radiativa do dossel (PAR, PAR refletido, NIR e NIR refletido em várias alturas), bem como às mudanças nos perfis de temperatura e umidade relativa. Essas mudanças, por sua vez, serão relacionadas à mudança na distribuição vertical da fotossíntese e à condutância estomática.

Tarefa 1.2.3. Dinâmica de raízes finas

A produção, mortalidade e estoque de raízes finas e o cálculo da renovação serão medidos através de minirrizotrons e pela coleta sequencial de amostras de solo e de núcleos de crescimento. Os tubos de minirrizotrons devem ser instalados em um ângulo de 60 graus a partir da horizontal, e a uma profundidade de aproximadamente 1,2 m. A biomassa de raízes finas na camada de serapilheira e nas amostras de solo permitirá a análise dos estoques de carbono e apoiará a escalonamento dos dados de minirrizotron. Os núcleos de crescimento (também na camada de serapilheira) podem fornecer raízes finas de idade conhecida para estimar a alocação de carbono e a análise de nutrientes (Tarefa 2.1.1), além de outra estimativa de produção de raízes finas quando combinada com estimativas de renovação dos minirrizotrons.

Tarefa 1.2.4. Respiração autotrófica

As taxas de respiração de troncos, galhos, folhas e raízes devem ser medidas com frequência e com dados auxiliares suficientes para apoiar a integração dos processos em um valor anual para toda a parcela. Câmaras de tronco para medir o efluxo de CO_2 devem ser instaladas nos troncos e galhos de um subconjunto de árvores com diferentes densidades de madeira, taxas de crescimento ou outras características, conforme orientado pelas análises na Área de Pesquisa de Biodiversidade. As taxas de respiração escura das folhas podem ser medidas com cubetas em folhas mantidas no escuro antes da medição no final do dia. A respiração das raízes deve ser medida em cubetas em raízes finas escavadas, além da separação dos componentes do efluxo de CO_2 do solo (Tarefa 1.3.4).

Objetivo 1.3. Determinar fluxos de C dentro e fora do solo e as mudanças nos compartimentos de matéria orgânica do solo (SOM)

Embora a alocação de carbono para tecidos de rápida renovação (folhas e raízes finas) ao invés de madeira possa não levar ao aumento do armazenamento de carbono na biomassa das árvores, esses tecidos de rápida renovação aumentam o fluxo de carbono para o solo, com o potencial de captação em compartimentos de carbono de longa duração. A entrada de detritos no sistema do solo será quantificada nas Tarefas 1.3.2 e 1.3.3. Aumentos nos estoques de carbono do solo são muito difíceis de documentar devido ao tamanho e à heterogeneidade espacial do compartimento, por isso são necessárias medições cuidadosamente controladas e integração com modelos.

Tarefa 1.3.1. Velocidade de transporte de carbono

A velocidade com que as moléculas de carbono se movem desde a absorção inicial da atmosfera pelas folhas até as raízes e sua subsequente liberação destas para hifas micorrízicas, comunidades microbianas da rizosfera e exsudação, será medida rastreando a assinatura de 13C. Isso pode ser feito capturando o pulso de 13C induzido pela fumigação de CO_2 empobrecido em 13C no início da exposição ao CO_2. Dependendo das taxas de renovação dos compartimentos correspondentes, pode-se levar de dias (como com os açúcares foliares) a anos (por exemplo, SOM) até que sejam uniformemente rotulados com a assinatura alterada de 13C. O grau de mudança permite estimar o quanto o compartimento foi abastecido com C recentemente fixado, sendo fonte valiosa de dados para parametrizar os processos de renovação em modelos de solo e vegetação.

Tarefa 1.3.2. Fluxo de C para exsudação, micorrizas e comunidades microbianas do solo

Medições de colonização micorrízica, produção de hifas e exsudação de compostos orgânicos de baixo peso molecular no solo e comunidades microbianas da rizosfera são especialmente importantes, pois são fluxos de C relevantes e podem ser modulados em resposta às demandas nutricionais das plantas. A quantificação das taxas de exsudação por unidade de comprimento de raiz pode ser combinada com a medição do comprimento total das raízes pelos minirrizotrons para gerar taxas em escala de ecossistema que podem ser incluídas na quantificação da NPP. A quantificação micorrízica, com base na porcentagem de comprimento de raiz colonizada, pode ser escalada de forma semelhante, e alíquotas de raízes serão arquivadas para identificação de espécies (ver também Área de Pesquisa 4). As hifas micorrízicas podem ser quantificadas a partir de imagens de minirrizotron e em sacos de crescimento.

O compartimento de C das comunidades microbianas do solo é um importante sumidouro de C, mas também é responsável por grandes fluxos de C heterotrófico (até 75% do total do efluxo de CO_2 do solo) do solo para a atmosfera, podendo liberar grandes quantidades de C de SOM mais antigo e de longa duração (por exemplo, via priming) induzido por maiores entradas de exsudatos. O C da biomassa microbiana (assim como N e P) será determinado pela utilização do método de extração por fumigação de clorofórmio (ver Área de Pesquisa 2). Os parâmetros fisiológicos microbianos adicionais (como crescimento e respiração) serão determinados por incubação em pequena escala em laboratório.

Tarefa 1.3.3. Decomposição da matéria orgânica vegetal

As taxas de decomposição de diferentes componentes das plantas (folhas, madeira,

raízes) serão medidas pela re-coleta sequencial da respectiva serapilheira colocada em sacos de malha na superfície do solo (folhas e detritos lenhosos) ou no solo (serapilheira de raízes). Será avaliado o efeito da concentração inicial de nutrientes da serapilheira, que pode ser afetado pelo eCO_2, nas taxas de decomposição (ver também Área de Pesquisa 2).

Tarefa 1.3.4. Efluxo de CO_2 do solo

O efluxo de CO_2 do solo será medido em campanhas mensais, incluindo dados auxiliares sobre temperatura e umidade do solo. O efluxo de CO_2 representa uma combinação de respiração autotrófica (ou seja, respiração de raízes/micorrizas) e respiração heterotrófica (microbiana). O efluxo de CO_2 será separado em componentes autotróficos e heterotróficos usando colares de solo sem raízes, suplementado com medição direta da respiração das raízes (Tarefa 1.2.4). A importância relativa das emissões de compostos orgânicos voláteis (COVs) será avaliada.

Tarefa 1.3.5. Reservatórios de carbono orgânico no solo

Monitorar as mudanças nos reservatórios de matéria orgânica do solo, incluindo frações de matéria orgânica particulada e associada a minerais e seus respectivos conteúdos de C e N, permitirá:

i. estimar as taxas de renovação de C no solo e a captação de C a longo
ii. fornecer insumos críticos para modelos de C do solo, particularmente aqueles que consideram a associação mineral como um processo crítico de estabilização do carbono no solo (126,127).

O registro documental das mudanças no armazenamento de C requer monitoramento cuidadoso e concomitante da densidade aparente. A estratégia de amostragem do solo (como frequência, número de subamostras, profundidade) será feita em coordenação estreita com a Área de Pesquisa 2 - Nutrientes.

Tarefa 1.3.6. Balanço de carbono

Desenvolver um balanço de C em nível de ecossistema, incluindo frações de alocação entre os componentes da biomassa vegetal e CUE (NPP/GPP) e para compartimentos do solo, e comparar com projeções de modelos (por exemplo, Jiang et al. (2020) [28] no EucFACE). Métodos para monitorar continuamente a troca de carbono em massa(NEE, GPP, Reco) dos anéis experimentais serão desenvolvidos e testados.

Integração de dados e modelos

A NPP e seus componentes fornecem dados importantes de referência para modelos de ecossistema, e é essencial que os insumos críticos para os modelos utilizados no AmazonFACE sejam medidos e coordenados com a estratégia de pesquisa em modelagem. Os efeitos do CO_2 na produtividade primária e na alocação de carbono serão combinados com estimativas independentes de mortalidade de árvores para avaliar modelos de terra baseados em processos e gerar previsões de longo prazo e em maior escala sobre a captação de carbono pela vegetação (ver "Seção de Estratégia de Modelagem").

Os modelos precisarão considerar se as observações demonstram a regulação negativa dos parâmetros da capacidade fotossintética (Vcmax, Jmax) ou dos parâmetros de condutância estomática ao CO_2 elevado (128-133), ou seja, aclimatação ao CO_2, e se há aclimatação térmica desses parâmetros sob temperaturas possivelmente mais altas no dossel experimentadas sob eCO_2.

A aclimatação térmica e o potencial de aclimatação serão avaliados contrastando a resposta modelada (treinada em u:^[.;,l,n CRX CCXXXm "ano médio" com dados) com ano(s) com extremos de calor, caso extremos de calor ocorram durante o experimento. Dadas as condições experimentadas durante o monitoramento de linha de base, é quase certo que extremos de calor serão encontrados durante o período de fumigação com CO_2. A hipótese é que a supressão da fotorrespiração no eCO_2 leva a respostas maiores de CO_2 em regiões mais quentes [30,134].



9.2 Área de Pesquisa 2: Nutrientes



Contexto

A Área de Pesquisa 2 tem como objetivo determinar como as respostas da floresta ao CO_2 elevado são controladas pelas relações entre os ciclos de carbono e nutrientes. A incorporação de nitrogênio (N) em modelos de sistemas terrestres reduziu as previsões das taxas futuras de absorção de carbono terrestre devido ao CO_2 elevado em até 50%. A produtividade das florestas tropicais, particularmente a da Amazônia, demonstrou ser mais fortemente limitada pela disponibilidade de fósforo (P) do que as florestas temperadas [20,45]. Os ciclos biogeoquímicos de N e P são fundamentalmente diferentes: no caso do N, frequentemente há entradas substanciais na atmosfera em ecossistemas terrestres através da deposição de N e fixação biológica de N, mas também há perdas substanciais de N em forma gasosa e aquosa.

Portanto, sob eCO_2, os estoques totais de N do ecossistema podem aumentar se as taxas de entrada de N aumentarem ou se as perdas de N diminuírem, o que pode aliviar parcialmente a limitação potencial de N. Em contraste, no caso do P, a principal fonte de entrada é o intemperismo de rochas, com essas entradas reduzidas a zero em muitos solos tropicais antigos [135], de modo que baixos níveis de entrada de poeira, incluindo do Saara, representam a principal fonte de P em muitos solos da floresta amazônica [136]. Além disso, não há perdas gasosas de P, e as perdas aquosas são geralmente limitadas devido à rápida reciclagem e baixa mobilidade do fosfato no solo. Isso sugere que a baixa disponibilidade de P pode ser crítica para limitar as respostas dos ecossistemas tropicais ao CO_2 elevado.

A falta de entradas e saídas substanciais de P significa que os estoques totais do ecossistema não devem mudar e, portanto, respostas sustentadas de crescimento florestal em relação ao P só serão possíveis se as árvores conseguirem:

i. usar o P de maneira mais eficiente; ou
ii. obter maior acesso a estoques de P no solo que não estavam disponíveis sob CO_2 ambiente.

Embora essas previsões venham de modelos teóricos baseados em P [20,96], tais evidências in situ em florestas tropicais são escassas [137]. Os principais estoques de P no solo que poderiam se tornar acessíveis para as plantas podem incluir:

i. P inorgânico atualmente ligado a superfícies minerais nos solos (por exemplo, associado a óxidos de ferro e alumínio, que são abundantes nos latossolos centrais da Amazônia); ou
ii. compartimentos de P orgânico na camada de serapilheira e na matriz do solo. A baixa disponibilidade potencial de P ligado a minerais sugere que os compartimentos de P orgânico podem oferecer o maior potencial para acesso aprimorado sob eCO_2, embora sua acessibilidade para as plantas também varie muito.

Nesse contexto, a biomassa microbiana pode ser um compartimento orgânico de P particularmente importante, já que pode conter mais P em sua biomassa do que todas as árvores em uma floresta [138]. Além disso, as raízes das plantas são colonizadas por micorrizas arbusculares simbióticas, que podem aumentar a absorção de nutrientes por poros menores no solo inacessíveis às raízes, e as comunidades microbianas associadas na rizosfera podem acelerar a mineralização da matéria orgânica (por exemplo, via efeito de priming ou exploração de nutrientes) e aumentar a disponibilidade de nutrientes. Portanto, o resultado das interações entre plantas e microrganismos do solo para o P sob eCO_2 pode ser especialmente importante [137,139].

Em resumo, existem diferenças fundamentais entre os ciclos de N e P, e esta Área de Pesquisa visa realizar uma avaliação detalhada dos efeitos do eCO_2 no ciclo de nutrientes no AmazonFACE e identificar se a disponibilidade de N, P ou outros elementos limita o potencial geral de absorção e captação de carbono da floresta e a resposta ao eCO_2.

Perguntas de Pesquisa

1) Quanto as árvores da floresta tropical aumentam a absorção de nutrientes, particularmente de N e P, sob CO_2 elevado?
2) Até que ponto as árvores da floresta tropical podem usar nutrientes de maneira mais eficiente sob CO_2 elevado?
3) Como o CO_2 elevado influencia o ciclo de nutrientes e o balanço de nutrientes no ecossistema?

Objetivos e Tarefas

Objetivo 2.1. Determinar a influência do eCO_2 na absorção de nutrientes pelas plantas

Tarefa 2.1.1. Concentrações de nutrientes em tecidos vegetais

Todos os componentes da NPP (em consonância com a Área de Pesquisa 1; madeira do tronco, folhas, raízes finas, serapilheira) serão analisados quanto aos principais nutrientes e mudanças na química dos tecidos. Para as folhas, em particular, a idade da amostra será considerada para determinar a retranslocação de nutrientes como indicador de uma possível limitação de nutrientes, comparando folhas verdes e folhas recentemente senescentes. Além disso, as concentrações de nutrientes nas folhas são críticas para quantificar a eficiência do uso de nutrientes na fotossíntese (idealmente específica de espécies), utilizando folhas usadas em campanhas fotossintéticas das Áreas de Pesquisa 1 e 4. Combinado com medições de NPP, a absorção de nutrientes pelas plantas e mudanças na alocação de nutrientes entre os tecidos serão quantificadas. Os cálculos da absorção total de nutrientes e da absorção de nutrientes por unidade de biomassa produzida são cruciais para avaliar se o eCO_2 altera as taxas de absorção de nutrientes pelas árvores e/ou a eficiência de uso de nutrientes pelas plantas, com este último também considerando a mudança na alocação.

Tarefa 2.1.2. Adaptações de aquisição de nutrientes no nível das raízes e rizosfera

As plantas podem ajustar sua morfologia radicular, exsudação, excreção de enzimas e associações microbianas (por exemplo, simbiose com fungos micorrízicos e/ou bactérias fixadoras de N2) para facilitar a absorção de nutrientes e responder à disponibilidade de nutrientes inorgânicos e orgânicos no solo (compartimentos de P). Em campanhas de amostragem coordenadas (com a Área de Pesquisa 1) realizadas a cada estação chuvosa e seca, os estoques de biomassa de raízes (nos 30 cm superiores do solo), morfologia de raízes finas, atividade de fosfatase

radicular, taxas de colonização micorrízica e concentrações de C e nutrientes nas raízes serão analisados. Pequenas alíquotas de raízes serão arquivadas para potencial identificação de plantas e fungos micorrízicos (ver também Área de Pesquisa 4).

Além disso, a produtividade de raízes finas será monitorada usando núcleos de crescimento (em intervalos de três meses) e analisada para parâmetros semelhantes aos descritos para os estoques de raízes. Em campanhas especiais, exsudatos radiculares serão coletados (linha de base, depois uma vez a cada dois anos) para quantificação e caracterização química e isotópica de compostos liberados na rizosfera. Em sinergia com a Área de Pesquisa 1, pode ser usado para aproximar os custos de C para as plantas na absorção de nutrientes, em que possíveis aumentos podem estar associados ao agravamento das limitações de nutrientes das plantas sob eCO_2.

Objetivo 2.2. Determinar os efeitos do eCO_2 no ciclo de nutrientes do solo

Tarefa 2.2.1. Estoque e fluxos de nutrientes no solo

Se a absorção de nutrientes pelas plantas ou a eficiência de uso de nutrientes mudar sob eCO_2, é essencial determinar os mecanismos subjacentes. O excesso de C poderia aumentar a demanda de nutrientes das plantas e intensificar o ciclo de nutrientes entre plantas e solo. As taxas de deposição de nutrientes serão analisadas para contabilizar entradas externas e, devido à crescente importância do ciclo de P orgânico, as taxas de liberação de nutrientes da decomposição da serapilheira sob **e**CO_2 serão monitoradas. Além disso, medições detalhadas dos estoques e fluxos de N e P totais e disponíveis no solo são essenciais, pois estão fortemente ligados à quantificação de mudanças no ciclo de C (por exemplo, estoques de C no solo e respiração do solo, Área de Pesquisa 1). Os compartimentos de N e P orgânico e mineral no solo (P disponível e frações de Hedley) serão medidos nos 30 cm superiores a cada estação chuvosa e seca para estimar mudanças líquidas ao longo do tempo. Embora as respostas do P ao eCO_2 sejam o foco principal, outros cátions importantes (K, Ca, Mg, Mn) também serão determinados. Além disso, os nutrientes disponíveis para as plantas serão analisados usando resinas de ânions e cátions.

Tarefa 2.2.2. Biomassa microbiana do solo e comunidade mediadora da ciclagem de carbono e nutrientes no solo

As comunidades microbianas do solo têm papéis cruciais nos ecossistemas para a liberação de CO_2 e outros gases de efeito estufa, na depolimerização de compostos orgânicos grandes e complexos e na mineralização de nutrientes. Elas também são estoque de nutrientes e são cruciais para controlar a captação de carbono no solo (ver também Área de Pesquisa 1). Análises regulares serão realizadas sobre a biomassa microbiana e a estequiometria C:N:P como índice para possíveis limitações de nutrientes sob eCO_2, e investigar seu papel como fonte ou reservatório de P orgânico/inorgânico, ou seja, se estão atuando como concorrentes pela disponibilidade de P para as plantas. Incubações em laboratório em pequena escala avaliarão parâmetros fisiológicos da comunidade microbiana, como taxas de crescimento e respiração com base em fosfolipídios microbianos e taxa de renovação de DNA, permitindo estimar as taxas de renovação da comunidade/biomassa microbiana.

Esses dados serão vinculados à composição da comunidade microbiana do solo (integrada com a Área de Pesquisa 4). Mudanças nas comunidades fúngicas e bacterianas serão investigadas usando sequenciamento de DNA direcionado ou metabarcoding não direcionado, e amostras extensas de solo serão arquivadas congeladas. Além disso, esta Área de Pesquisa fará uso de fósforo e lipídios neutros microbianos como um método quantitativo de identificação da comunidade de fungos (micorrízicos arbusculares) e dinâmicas bacterianas (em conexão com as Áreas de Pesquisa 1 e 4).

Tarefa 2.2.3. Enzimas extracelulares do solo

Análises enzimáticas do solo fornecem atividades potenciais de enzimas que atuam nas extremidades das cadeias de polissacarídeos, quitina e P orgânico, sendo cada substrato específico responsável pela etapa limitante na decomposição de C, N e P. A produção de enzimas extracelulares no solo depende da disponibilidade de nutrientes

e segue os princípios de oferta e demanda de recursos ou substratos. As taxas de atividade enzimática extracelular nos 30 cm superiores do solo serão analisadas a cada estação chuvosa e seca e usarão a estequiometria das enzimas extracelulares (direcionadas a compostos contendo C, N e P) para avaliar as limitações de nutrientes das comunidades microbianas do solo em resposta ao eCO_2.

Objetivo 2.3. Determinar o papel da reciclagem de nutrientes da serapilheira sob eCO_2

Tarefa 2.3.1. Estoques de nutrientes na serapilheira

Estoques de serapilheira serão coletados duas vezes ao ano em áreas pré-determinadas para calcular a massa de serapilheira acumulada e serão analisados quanto ao conteúdo de C, N, P e macro e micronutrientes. Subamostras serão usadas para determinar a composição das raízes e para determinar meso ou microfauna e a composição das comunidades fúngicas/bacterianas (em concordância com a Área de Pesquisa 4).

Tarefa 2.3.2. Decomposição da serapilheira

A camada de serapilheira pode se tornar uma importante fonte de nutrientes minerais que não foram realocados antes da queda das folhas, particularmente se as plantas tiverem uma maior demanda de nutrientes sob condições de eCO_2. Um experimento de decomposição da serapilheira (ver também Tarefa 1.3.3) será realizado para rastrear a mobilização de nutrientes da camada de serapilheira, bem como seu destino (por exemplo, perda de massa da serapilheira, colonização por raízes, biomassa microbiana, formação de matéria orgânica do solo).

Objetivo 2.4. Calcular o balanço de nutrientes do povoamento florestal

Tarefa 2.4.1. Deposição de nutrientes e deposição interna de nutrientes da floresta

Entradas externas de nutrientes podem ser fontes cruciais para equilibrar a maior demanda de nutrientes das plantas sob eCO_2. Serão medidas as deposições úmida e seca e as taxas de precipitação.

Tarefa 2.4.2. Balanço de nutrientes do povoamento florestal

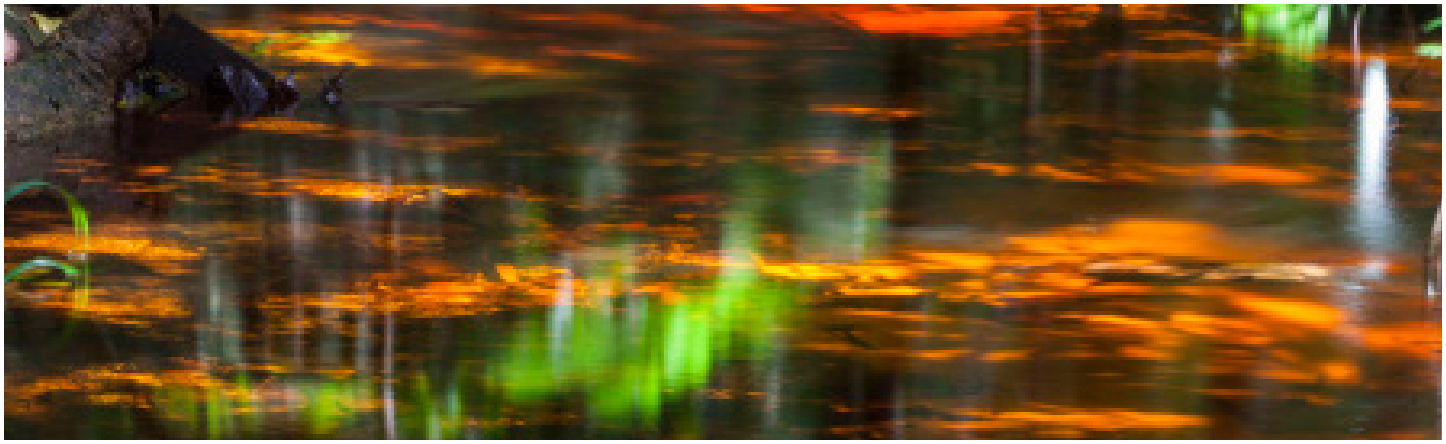
Por fim, os efeitos do eCO_2 no balanço total de nutrientes da floresta serão medidos calculando os estoques de nutrientes de todos os componentes do ecossistema derivados dos Objetivos anteriores (folhas, tronco, raízes, solo, micróbios do solo).

Integração de dados e modelos

Medições detalhadas de estoques de nutrientes, estequiometria e taxas de processos nas parcelas de CO_2 ambiente e elevado podem ajudar a desenvolver representações e parametrização de modelos de ciclo de C, N e P e interações entre os diferentes ciclos elementares e servir como dados de referência para a avaliação dos modelos. Modelos habilitados para nitrogênio e fósforo serão parametrizados com medições-chave feitas no local do AmazonFACE, como estoques de nutrientes e renovação de biomassa vegetal e microbiana do solo. Modelos explícitos para solo-microbiano serão de particular interesse para representar as interações planta-solo-microbiano e a troca de nutrientes [126]. As medições de enzimas do solo, morfologia radicular e caracterização da comunidade microbiana do solo sob eCO_2 serão inestimáveis para o desenvolvimento do modelo desses processos críticos [96].

O desenvolvimento de modelos a partir de processos críticos e experimentos ainda não contabilizados, como análises de sensibilidade e comparações entre modelos, refinará as medições sobre incertezas-chave. O feedback de nutrientes para eCO_2 no local do AmazonFACE, mediado por adaptações de plantas e comunidades microbianas do solo, fornecerá insumos e entendimento para processos anteriormente não quantificados em modelos.

9.3 Área de Pesquisa 3: Água



Contexto

Há uma vasta literatura sugerindo que a condutância estomática diminui sob eCO_2. No entanto, há evidências limitadas para florestas tropicais e árvores tropicais maduras [22,54,140]. A condutância estomática é uma otimização que maximiza a captura de carbono pela fotossíntese, ao mesmo tempo em que controla os danos ao sistema hidráulico da planta [141,142]. Quando uma planta é exposta a eCO_2, é razoável supor que a assimilação de carbono, em comparação com o CO_2 ambiente, ocorra com uma condutância estomática menor, potencialmente elevando a temperatura das folhas devido à menor refrigeração evaporativa. Se a aquisição de carbono for mantida, isso significaria que o potencial hídrico da folha, uma medida crucial do estresse hidráulico da planta, poderia ser mantido em níveis mais elevados (menos estressantes), como resultado da transpiração restrita. Consequentemente, as plantas seriam capazes de minimizar a depressão da transpiração ao meio-dia, muitas vezes observada, e manter maior segurança hidráulica, o que significa que seriam menos vulneráveis a eventos de seca episódicos. No entanto, se a área foliar aumentar [54,143] e/ou as plantas aumentarem a fotossíntese em resposta ao eCO_2, é possível que as demandas sobre o sistema hidráulico da planta se tornem maiores.

Nesse caso, na ausência de um maior investimento na absorção de água pelas raízes, as plantas podem operar com potenciais hídricos foliares mais baixos (mais estressantes) e buscar aumentar a condutividade hidráulica, o que potencialmente as tornaria mais vulneráveis à mortalidade induzida pela seca. Em florestas tropicais, onde há uma competição muito alta por recursos entre espécies, esse resultado pode ser mais provável, se outros recursos, como nutrientes, não forem limitantes. Ainda há poucas evidências de plasticidade nas respostas hidráulicas de plantas lenhosas [144] e, portanto, é possível que haja adaptação imperfeita ao eCO_2 no contexto de futuros eventos de seca. Outra consequência importante das mudanças na condutância estomática é o balanço energético das folhas. A menor condutância estomática restringe a refrigeração evaporativa e, como o processo fotossintético é baseado na atividade enzimática e na difusão de gases, a temperatura tem uma influência moduladora nas taxas de assimilação de carbono. Explorar as trocas associadas ao uso de água e carbono nas plantas é fundamental para avaliar se o aumento de CO_2 compensará os impactos negativos previstos para os futuros aumentos de eventos de seca e calor na Amazônia [32].

Diante disso, a área de pesquisa sobre o ciclo da água está organizada em torno de seis questões-chave.

Perguntas de Pesquisa

1) A eficiência do uso da água ao nível foliar aumenta sob eCO_2 e altera a transpiração?
2) Quais são os efeitos do eCO_2 no balanço hídrico do solo em uma floresta amazônica madura?
3) Um aumento no CO_2 pode alterar a vulnerabilidade à seca de uma floresta tropical?
4) Qual é o efeito do eCO_2 na temperatura das folhas

ou do dossel em condições normais e durante eventos de seca?

5) As plantas ajustarão sua anatomia lenhosa (relacionada à capacidade de transportar água) sob eCO_2?
6) A sensibilidade estomática ao déficit de pressão de vapor atmosférico mudará sob eCO_2?

Objetivos e Tarefas

Objetivo 3.1. Determinar se a perda de água através dos estômatos diminui sob eCO_2

Tarefa 3.1.1. Medir a eficiência do uso da água

Para avaliar se as plantas apresentarão maior eficiência no uso da água sob eCO_2, a condutância estomática ao nível foliar será medida em combinação com as taxas de assimilação de carbono (ver Objetivo 1.1). Sistemas portáteis de fotossíntese (por exemplo, Licor 6800) serão usados para coletar dados ecofisiológicos de folhas com a ajuda de guindastes de dossel. As medições pontuais serão realizadas, assim como curvas de resposta da condutância estomática ao déficit de pressão de vapor folha-ar ao nível foliar. A integração espacial e temporal do sinal condutância estomática será auxiliada pela avaliação da discriminação fotossintética contra $13CO_2$ (δ13C) via isótopos estáveis de carbono. Mudanças na temperatura das folhas resultantes de mudanças na condutância estomática também serão medidas.

Objetivo 3.2. Determinar os fluxos de água solo-planta-atmosfera

Tarefa 3.2.1. Medir a transpiração em escala de dossel

Para avaliar o impacto das mudanças na condutância estomática e na área foliar, o fluxo de água pelas árvores deve ser avaliado em escala comunitária. O fluxo de seiva no xilema será monitorado como uma medida integrada, que pode ser escalada para a transpiração total da árvore. Sensores de fluxo de seiva serão instalados em um subconjunto de árvores, com o objetivo de cobrir as maiores árvores (maiores contribuintes para o uso de água no nível da parcela) e uma variedade de árvores em classes de tamanho (necessário para modelagem e escalonamento do uso de água). Usando as relações entre o tamanho das árvores e o fluxo de água, será possível escalar o fluxo de seiva para calcular a transpiração de todo o dossel [145]. O fluxo de seiva será medido continuamente em intervalos de uma hora.

Objetivo 3.3. Avaliar como o armazenamento e a disponibilidade de água no solo mudam com a profundidade

Tarefa 3.3.1. Medir o conteúdo volumétrico de água no solo

Se as plantas mudarem seus hábitos de uso da água, isso provavelmente afetará a umidade disponível do solo em diferentes profundidades. Se a transpiração diminuir sob eCO_2, então as condições hídricas melhoradas provavelmente influenciarão as taxas de decomposição da matéria orgânica e a atividade da comunidade vegetal durante a estação seca. Isso será monitorado usando sensores de reflectometria no domínio do tempo instalados em nove profundidades a partir da superfície [5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75 e 100 cm] dentro de cada anel do AmazonFACE.

Tarefa 3.3.2: Medir o Potencial Hídrico do Solo

O potencial hídrico do solo é determinado conjuntamente pelo conteúdo volumétrico de água no solo e pela capacidade dessa água de ser retirada do solo, que por sua vez é determinada pela estrutura do solo. O potencial hídrico do solo pode ser calculado medindo curvas de retenção de água do solo ou por meio da co-localização de sensores de potencial hídrico do solo com sensores de conteúdo volumétrico de água para avaliar o potencial hídrico do solo. Além disso, o potencial hídrico do solo ao qual as árvores estão expostas pode ser avaliado medindo o potencial hídrico foliar antes do amanhecer, mensalmente (ver Tarefa 4.1).

Objetivo 3.4: Determinar se eCO_2 induz plasticidade nos traços hidráulicos das plantas

Tarefa 3.4.1: Medir o potencial hídrico das folhas

Para avaliar o status de estresse hídrico das plantas, medições mensais a bimestrais do potencial hídrico foliar serão realizadas nas árvores com sensores de fluxo de seiva instalados. Medir o potencial hídrico foliar antes do amanhecer indica o estresse imposto pela disponibilidade de água no solo, e os potenciais

hídricos ao meio-dia medem o estresse combinado do solo e da atmosfera. O potencial hídrico será amostrado em no mínimo três folhas por árvore.

Tarefa 3.4.2: Determinar mudanças na vulnerabilidade à embolia e na margem de segurança hidráulica

O potencial hídrico mínimo ao meio-dia será combinado com uma medição única de P50, o potencial hídrico no qual um ramo perde 50% de sua condutividade, para calcular a margem de segurança hidráulica. Esta é uma medida chave da vulnerabilidade de uma planta à embolia induzida pela seca. O P50 será calculado usando uma curva de vulnerabilidade, que será medida para todas as árvores estudadas uma vez no início do experimento em um ramo de ~1-2m de comprimento. Inicialmente, 1 medição provavelmente será suficiente, pois a plasticidade do P50 é provavelmente baixa e, dado o tamanho do ramo necessário, isso minimizará os danos às árvores.

Tarefa 3.4.3: Determinar se a condutância hidráulica máxima (Ksmax) muda com eCO_2

A condutância hidráulica provavelmente é mais plástica do que o P50; no entanto, em resposta ao eCO_2, ela pode aumentar se a demanda de água aumentar (como maior área foliar) ou diminuir se a demanda de água diminuir (menor condutância estomática). Monitorar isso é essencial para determinar se a capacidade de abastecimento de água está mudando, mas também para entender possíveis trocas entre a eficiência do transporte de água para toda a árvore e a segurança hidráulica do sistema de transporte de água. O Ksmax será medido em pequenas amostras de galhos distais (3-5 cm de comprimento), usando o sistema hidráulico descrito por Sperry et al. [188].

Integração de Dados e Modelos

Avaliação de feedback com os ciclos de carbono e nutrientes e com a atmosferaAs temperaturas das folhas podem aumentar com o fechamento dos estômatos e a redução das taxas de transpiração, associadas ao superaquecimento das folhas em alguns momentos e, assim, à redução da atividade fotossintética. A maior umidade do solo pode alterar a atividade microbiana e a absorção de nutrientes. Por outro lado, um aumento na área foliar pode compensar a redução nas taxas de transpiração. Em resumo, os efeitos em nível ecossistêmico da eCO_2 nos fluxos de água permanecem desconhecidos em grandes escalas espaciais, apesar do reconhecimento de que a Amazônia é a floresta tropical com maior dependência da reciclagem de chuva pela vegetação [49]. As medições serão usadas para integrar as respostas em nível foliar e de dossel e serão integradas à modelagem de vegetação para avaliar os impactos em maior escala do eCO_2 no balanço hídrico da Amazônia. A fusão de dados e modelos será usada para sintetizar dados de umidade do solo, precipitação e outros parâmetros, preenchendo lacunas de dados e garantindo consistência no monitoramento temporal e vertical da umidade do solo. Estabelecendo o balanço hídrico

Um modelo detalhado em escala de povoamento, parametrizado localmente para a estrutura do dossel e perfil vertical da densidade da área foliar, será empregado para escalar o fluxo de água da folha ao dossel a partir de medições. O Maespa será utilizado para derivar o balanço hídrico em escala de estágio, que será então usado para comparar com modelos de processo.

Efeitos do eCO_2 na hidráulica das plantas e resposta à seca Com base nas atividades anteriores de comparação de modelos de Fleischer [20], esta Área de Pesquisa aplicará a abordagem centrada em suposições sobre a representação dos processos relacionados à água no local do AmazonFACE para identificar as necessidades do lado da modelagem em relação aos processos relevantes e mudanças potenciais sob eCO_2. Usando um conjunto de modelos dinâmicos de vegetação hidráulica que incorporam estratégias de regulação da água pelas plantas, e as medições derivadas desta tarefa permitirão avaliar as sensibilidades específicas de cada espécie à disponibilidade de água via hidráulica das plantas e a ligação com o ciclo do carbono. Esses exercícios de modelagem também simularão respostas de longo prazo e avaliarão suposições do modelo, além de desenvolver ainda mais os modelos hidráulicos existentes.

9.4 Área de Pesquisa 4: Biodiversidade



Contexto

As florestas amazônicas estão entre os ecossistemas mais diversos do planeta, abrigando cerca de 15.000 espécies de árvores [146] cada uma das quais podendo responder de maneira diferente às mudanças climáticas e ao aumento da concentração de CO_2 atmosférico. As florestas tropicais também têm grande e pouco estudada diversidade de micorrizas, saprófitas e bactérias [147], que podem influenciar as respostas deste sistema às mudanças na concentração de CO_2. Mudanças no funcionamento das plantas e dos microrganismos impulsionadas pelo CO_2 adicional provavelmente terão consequências em toda a cadeia trófica [148–150], influenciando múltiplas interações ecológicas e, em última análise, a diversidade em nível de ecossistema. O AmazonFACE é o primeiro experimento FACE em um ecossistema tropical altamente diverso, permitindo-nos entender como diferentes espécies e suas estratégias podem responder ao CO_2 adicional. Esse entendimento de como sua vasta diversidade responde ao eCO_2 é fundamental para prever o futuro da Amazônia.

Espera-se que as espécies vegetais respondam de forma diferente à fertilização por CO_2, dependendo de sua estratégia de história de vida (pioneira ou tolerante à sombra), capacidade de fixar nitrogênio e forma de vida (lianas, árvores e palmeiras). Essas são hipóteses derivadas de teorias [151,152] e são reforçadas por tendências observadas em estudos de monitoramento de longo prazo [55,153,154] ou experimentos em estufas [155]. No entanto, embora as observações não controlem outros fatores, como perturbações locais e mudanças climáticas, experimentos em estufas não podem capturar a complexidade e as interações que são intrínsecas a sistemas tão diversos. O AmazonFACE nos permitirá, finalmente, testar essas previsões teóricas de longa data dentro de um ecossistema tão complexo.

Devido à alta diversidade dentro dos anéis do AmazonFACE, uma análise em nível de espécie provavelmente não será viável ou significativa. Um total de 394 espécies de árvores e 55 famílias botânicas foram identificadas entre os 1.305 caules (DAP ≥ 2cm) nos espaços do projeto. Dessas, metade dos caules (657) pertence a 49 espécies, enquanto a outra metade está distribuída em 345 espécies, das quais 190 são únicas.

Apesar de sua alta diversidade, o AmazonFACE não representará a diversidade taxonômica/filogenética de toda a Floresta Amazônica. Uma análise orientada para a diversidade funcional será conduzida nas diferentes áreas de pesquisa. Esta área de pesquisa visa vincular sistematicamente traços-chave das plantas com processos ecofisiológicos indicativos de desempenho vegetal. Essa abordagem funcional para interpretar as respostas da diversidade amazônica e sua interação com o aumento de CO_2 favorecerá a conexão com a modelagem e a ampliação dos resultados do experimento para escalas espaciais maiores, considerando que os modelos de vegetação, clima e sistemas terrestres trabalham com grupos funcionais de plantas e não com espécies.

É esperado que as mudanças no funcionamento da comunidade vegetal e sua ecofisiologia em resposta ao eCO_2 impactem outros níveis tróficos no ecossistema. Sabe-se que um aumento nas concentrações de CO_2 afeta diretamente as interações ecológicas [156,157]. Se e como as mudanças na biodiversidade e na força das interações bióticas podem resultar em mudanças nos processos do ecossistema ainda não está claro nesse cenário de elevação de CO_2. Já é aceito que as folhas das árvores sob eCO_2 podem reduzir a concentração de nitrogênio foliar (N), o que leva a um aumento na proporção C e impacta todas as interações entre consumidores e recursos ao longo da cadeia trófica. O AmazonFACE nos permitirá investigar o impacto do eCO_2 na biodiversidade em todo o ecossistema e na cadeia trófica [158].

Perguntas de Pesquisa

1. A resposta das plantas lenhosas tropicais à eCO_2 é previsível com base em seus traços funcionais?
2. As respostas das plantas lenhosas à eCO_2 são previstas pelas características ambientais locais? Se sim, essas são mais importantes do que os traços funcionais das plantas?
3. A eCO_2 altera a cascata trófica (herbívoros, predadores, patógenos e simbiontes) ao alterar a abundância de espécies-chave e a diversidade ao longo da cascata?
4. A eCO_2 pode afetar a interação entre plantas, micróbios e insetos, com consequências para os processos a nível de ecossistema?

Objetivos e Tarefas

Objetivo 4.1. Caracterizar o espaço funcional do AmazonFACE e a diversidade de plantas em grupos funcionais

Tarefa 4.1.1. Caracterizar as diferentes plantas amazônicas por seus traços funcionais

Isso nos permite ter uma compreensão mecanicista de como as plantas respondem ao aumento de CO_2. Os traços caracterizarão espécies e árvores em três domínios funcionais:

i. assimilação de carbono, alocação e crescimento da plan-

ii. aquisição e uso de nutrientes; e/ou relacionados a

iii. fluxos de água/eficiência de uso da água (Tabela 1).

Para 392 espécies, a equipe do AmazonFACE mediu a densidade da madeira, a área foliar específica, o conteúdo de clorofila e a espessura da folha; para 316 espécies, foram medidos a densidade estomática, o tamanho estomático e a densidade das nervuras das folhas. Traços hidráulicos foram medidos pela Área de Pesquisa 3 durante a fase de linha de base. Os traços abaixo do solo serão medidos a partir de amostras de solo anteriores (em colaboração com as Áreas de Pesquisa 1, 2 e 3). A identificação das espécies para traços radiculares é desejável por meio de códigos de barras de DNA. Isso permitirá uma melhor compreensão da coordenação entre as estratégias acima e abaixo do solo. Dada a dificuldade de caracterizar a diversidade, os traços em nível de espécie, em vez de individual, serão medidos. Traços para diferentes estágios de história de vida e posições no dossel para as espécies mais dominantes serão medidos.

Os traços serão usados para classificar ou ordenar a diversidade funcional das plantas do experimento em grupos ou em um continuum e ajudarão a fornecer uma compreensão mecanicista das respostas das Florestas Tropicais a eCO_2.

Tabela 1. Funções ecológicas e traços-chave associados para avaliar o desempenho ecológico das plantas sob eCO_2 durante o experimento AmazonFACE.

Processos do ecossistema	Função ecológica específica	Traço(s) chave	Indicador(es) de desempenho ecológico)	Referências principais
Assimilação e alocação de Carbono	Produtividade primária bruta (GPP)	Taxa máxima de carboxilação (V_{cmax})	Eficiência fotossintética	[65]
	Produtividade primária líquida (NPP)	Área foliar específica; conteúdo de N e P nas folhas.	NPP, espectro de economia foliar, turnover foliar, índice de área foliar, idade foliar	[44,77]
	Crescimento vegetal, NPP (armazenamento de carbono)	Densidade da madeira do troco; potencial tamanho. Alocação de carbono abaixo e acima do solo.	Taxa de crescimento, suporte mecânico, longevidade	[159,160]
	Reprodução	Massa/número de sementes Massa e tamanho das frutas	Sucesso reprodutivo	[161,162]
Aquisição e uso de Nutrientes	Uso de nutrientes	Conteúdo de nutrientes nos tecidos e processos de retranslocação, com início pelo nitrogênio (N) e fósforo (P).	Estequiometria do tecido, repiração escura e turnover de tecido	[44]
	Absorção de nutrientes	Morfologia das raízes; Associação micorrízica (quantidade e tipo); Enzimas e exsudação orgânica de ácido	Exploração de nutrientes e extração de nutrientes	[163,164]
Aquisição e uso de Nutrientes	Absorção de água	Morfologia de raízes incluindo profundida de raiz e comprimento específico de raiz	Produtividade de raiz/ perfil de turnover, eficiência de uso da água	[86,165]
	Transporte de água Transpiração	Condutância do xilema	Eficência do transporte de água, fluxo de seiva	[166]
	Uso da água Transpiração	Sensibilidade da condutância estomática à assimilação de carbono (g1)	Fluxo de seiva, condutância estomática, eficiência no uso da água	[50,167]
	Resiliência à seca	P50, ponto de perda de turgor (TLP) e margem de segurança hidráulica (MSH).	Resiliência à embolia	[168,169]

Tarefa 4.1.2. Avaliar a representatividade funcional das plantas do AmazonFACE no espaço de características da Amazônia

Os dados de características funcionais de bancos de dados existentes [152] serão usados, combinados com dados de composição de espécies da Rede de Diversidade de Árvores da Amazônia (Amazon Tree Diversity Network – ATDN), para fornecer uma caracterização funcional completa do espaço de traços em toda a Amazônia. Isso nos permitirá ter uma sólida avaliação da representatividade das plantas que ocorrem nas parcelas do AmazonFACE em relação à diversidade funcional de toda a floresta amazônica.

Tarefa 4.1.3. Criar grupos funcionais

A compreensão da diversidade funcional das árvores no AmazonFACE será usada para criar grupos funcionais que possam informar o desenvolvimento de modelos representando a diversidade dos sistemas tropicais. A integração entre os processos acima e abaixo do solo é desejável, mas desafiadora.

Objetivo 4.2. Integrar o desempenho ecofisiológico sob eCO_2 ao espaço funcional

Tarefa 4.2.1. Compreender o desempenho das árvores

As respostas das árvores ao eCO_2 no espaço funcional serão avaliadas, podendo fornecer indicações sobre o efeito do eCO_2 na composição e diversidade das florestas amazônicas. Como parâmetros de desempenho, as taxas de crescimento e recrutamento individuais serão monitoradas, inicialmente focando na biomassa lenhosa acima do solo das árvores adultas, mas potencialmente monitorando outros tecidos vegetais, como folhas e raízes, se possível, para rastrear dos tecidos até os indivíduos (junto à Área de Pesquisa 1). Embora não seja possível quantificar as mudanças na mortalidade das árvores adultas ao longo do experimento devido ao pequeno tamanho amostral, é possível avaliar seu risco de morte com base em mudanças na condição do dossel, margem de segurança hidráulica e carboidratos não estruturais.

Tarefa 4.2.2. Ambiente Local das Plantas

Qualquer resposta no desempenho deve ser avaliada no contexto da posição da planta no espaço multidimensional de traços e nas condições ambientais locais. As condições ambientais locais, que devem estar relacionadas à posição do indivíduo no dossel, devem ser consideradas ao investigar qualquer resposta. Os indivíduos, em vez das parcelas, devem ser considerados o principal nível de investigação, e as análises também podem considerar as taxas de crescimento das diferentes plantas.

Tarefa 4.2.3. Efeitos na Germinação e Crescimento de Plântulas

Mudanças nas taxas de germinação e crescimento de plântulas nas parcelas do AmazonFACE indicarão mudanças na composição florística e funcional, pelo menos nesta fase da história de vida. Pequenas subparcelas, sem qualquer perturbação, serão estabelecidas para monitorar a dinâmica das plântulas.

Tarefa 4.2.4. Resposta de Plantas, Além das Árvores, ao eCO_2

Quantificar o desempenho de lianas e palmeiras em conjunto com as Áreas de Pesquisa 1-3. Um foco particular será dado às lianas, cujo desempenho competitivo deve aumentar sob eCO_2. Assim, o crescimento e a fisiologia das lianas serão monitorados para verificar mudanças. Estudos sobre briófitas, ervas e samambaias são desejáveis tanto para epífitas quanto para flora do solo.

Objetivo 4.3. Avaliar os Impactos em Cascata na Cadeia Alimentar

Tarefa 4.3.1. Composição da Comunidade de Invertebrados

Embora os herbívoros possam responder diretamente às mudanças na qualidade química das plantas impulsionadas pelo eCO_2 (de baixo para cima), sabe-se que a população de muitos herbívoros também pode ser regulada por predadores invertebrados (de cima para baixo). Além disso, do ponto de vista da planta, outros grupos de invertebrados, como polinizadores e agentes de defesa biótica contra herbívoros, seriam indiretamente afetados pelas mudanças nas condições nutricionais das plantas devido ao aumento de CO_2. A diversidade, abundância e biomassa de invertebrados são informações desejáveis e podem ser avaliadas em colaboração com grupos de pesquisa externos.

Tarefa 4.3.2. Composição da Comunidade Microbiana do Solo

Integrado com a Área de Pesquisa 2, usar técnicas de sequenciamento de amplicon baseado em DNA ou metabarcoding não direcionado para explorar a diversidade de espécies de comunidades de bactérias e fungos nos solos e na camada de serapilheira. Comunidades das superfícies foliares também são desejáveis. Além disso, amostras de raízes serão analisadas visando a identificação de simbioses de bactérias-raízes (rizóbios) e simbioses de fungos-raízes (micorrizas e possivelmente endófitos septados escuros), em conjunto com as Áreas de Pesquisa 1 e 2.

Objetivo 4.4. Determinar a contribuição dos herbívoros para a NPP e fluxos de nutrientes

Tarefa 4.4.1. Medições de Herbivoria no Dossel e na Serapilheira

As taxas de herbivoria seriam acessadas por duas abordagens diferentes. A primeira, não é destrutiva: calcula-se a perda de área foliar usando imagens digitalizadas das folhas das amostras de serapilheira, conforme o protocolo sugerido por Metcalfe [171] (pode ser combinado com análises de decomposição da serapilheira por saprófitas fúngicas). Essa abordagem pode ser usada como um dado de monitoramento da herbivoria, já que os materiais da serapilheira são coletados mensalmente. A segunda abordagem envolveria amostras de galhos de algumas árvores individuais em cada parcela. Usando protocolo padronizado [172], as folhas de um galho de cada árvore do dossel individual serão coletadas, numeradas, prensadas, secas em forno e digitalizadas. Para ambos os métodos, a perda de área foliar será determinada com o uso do software ImageJ. A herbivoria será estimada em porcentagem como a razão entre as perdas de área foliar e a lâmina foliar total.

Tarefa 4.4.2. Estimar a Produção Foliar Removida pela Herbivoria

A perda por herbivoria será escalada para toda a parcela usando a massa seca total da serapilheira foliar (Mg ha-1 ano-1) e integrada aos cálculos de NPP (em conjunto com a Área de Pesquisa 1; produção foliar). Portanto, a produção total de biomassa foliar seria calculada como a massa seca total da serapilheira foliar dividida por 1-perda por herbivoria.

Tarefa 4.4.3. Estimar os Fluxos de Nutrientes Foliares Resultantes da Herbivoria

Usando a concentração de nutrientes das folhas (com a Área de Pesquisa 2; concentração de nutrientes a nível foliar), os fluxos de nutrientes serão calculados considerando a herbivoria. Os fluxos de nutrientes serão estimados multiplicando a biomassa seca pelas concentrações de C, N e P foliares vivos (g g-1). Os fluxos de nutrientes foliares serão então multiplicados pela herbivoria para calcular a média dos fluxos de nutrientes foliares removidos por herbívoros na parcela (Mg ha-1 ano-1).

Integração de Dados e Modelos

A integração com a modelagem deve visar representar a diversidade funcional do AmazonFACE em condições ambientes e sua resposta ao eCO_2, tanto a curto quanto a longo prazo. Nossa abordagem avaliará, respectivamente, o desempenho ecofisiológico dos diferentes grupos/entidades funcionais de plantas e eventuais mudanças de longo prazo na composição da comunidade que não poderão ser observadas ao longo do experimento, mas que podem ser capturadas em aplicações de modelagem. Um conjunto de modelos DGVMs [69,97,173,174] baseados em traços, bem como modelos específicos de assimilação de dados/locais [175–177], deve ser empregado para esse fim. O AmazonFACE fornecerá dados inestimáveis para parametrizar e avaliar esses modelos. Comparações entre múltiplos modelos e análises de modelos baseadas em suposições devem ser incentivadas [61].



9.5 Área de Pesquisa 5: Socioambiental



Contexto

CO_2 elevado e suas consequências devem causar impactos profundos em comunidades florestais áreas rurais e urbanas[4] [12], por meio, por exemplo, de mudanças nas propriedades e processos dos ecossistemas, na biodiversidade [178] e, por fim, nos serviços ecossistêmicos (ecosystem service - ES)[5] [179]. Mudanças no processo de NPP, por exemplo, são influenciadas por modificações na área foliar específica, raízes e arquitetura e tamanho do dossel [76]. Tais características, por sua vez, podem ser afetadas pelo eCO_2, influenciando a biomassa resultante e a produtividade alimentar associada (um ES). Em resumo, quaisquer implicações do eCO_2 para a provisão de serviços ecossistêmicos baseados na biodiversidade afetarão o bem-estar das pessoas que dependem desses serviços, impondo a necessidade de adaptação à realidade dessas mudanças ou de serem impactadas por elas.

A Área de Pesquisa 5 visa entender essa conexão "clima-floresta-pessoas", focando em como o conhecimento emergente do experimento AmazonFACE ajudará a coproduzir [180] nossos entendimentos e ações relacionadas às mudanças climáticas na Amazônia. Cerca de metade das mais de 400 espécies de árvores presentes nos anéis do experimento já têm registro de uso por humanos. Portanto, o experimento de campo do AmazonFACE permitirá uma compreensão mais ampla de como os efeitos do eCO_2 e das mudanças climáticas na floresta podem desestabilizar os sistemas socioecológicos da região por meio de mudanças na provisão de serviços ecossistêmicos. Combinado com o experimento, os resultados desta Área de Pesquisa também permitirão um vislumbre das tendências futuras, possibilitando o desenvolvimento de políticas de adaptação e mitigação de maneira mais bem informada.

Perguntas de Pesquisa

1) Como as mudanças na floresta causadas pelo eCO_2 impactam os sistemas socioecológicos na Amazônia?
2) Como as populações humanas da Amazônia podem se adaptar às mudanças na floresta causadas pelo aumento de CO_2 e mudanças climáticas, de acordo com os impactos verificados na pergunta 1?
3) Como o experimento AmazonFACE está impactando, coproduzindo e influenciando políticas?

[4] Apesar de cerca de 75% da população amazônica viver em áreas urbanas, a minoria dos moradores ribeirinhos e da área florestal, vivendo nas zonas rurais, fica potencialmente mais vulnerável a mudanças climáticas e a climas extremos.

[5] Coprodução significa que ambos, os aspectos científicos e as políticas associadas, e os entendimentos sociais mais amplos são mutuamente constituídos e não emergem separadamente (180).

Objetivos e Tarefas

Objetivo 5.1. Avaliar os impactos do eCO_2 e das mudanças climáticas na provisão e uso dos Serviços Ecossistêmicos (ESs)

A provisão, demanda e governança dos ESs[6] dependem de processos ecológicos, bem como da maneira como as pessoas percebem, valorizam e interagem com a natureza. Portanto, abordagens interdisciplinares e multi métodos são valiosas para obter entendimentos mais profundos dos impactos das mudanças climáticas. Os impactos do eCO_2 nos ESs serão avaliados usando as classes de Variáveis Essenciais de Serviços Ecossistêmicos (essential ecosystem service variable - EESV) [181] e indicadores que emergem das outras áreas de pesquisa, como NPP e biomassa de frutos (ES: provisão de alimentos e serviços culturais), NPP e sequestro de carbono (regulação climática), taxa de decomposição e microbiota do solo (fertilidade do solo) [76]. Esses resultados serão escalados para a bacia amazônica, integrando-os à área de pesquisa de modelagem e combinados com a esfera social dos ESs por meio de avaliações socioeconômicas, pesquisa etnográfica, além de pesquisas geográficas, econômicas e sociológicas sobre os impactos das mudanças climáticas, entre outros.

Tarefa 5.1.1. Mapear os impactos do eCO_2 na entrega de serviços ecossistêmicos

Através da ligação entre processos ecológicos/funções e ESs, em estreita colaboração com a Área de Pesquisa 4, Objetivo 4.2.

Tarefa 5.1.2. Identificar a demanda [7] por ESs demand

Incluindo a de "beneficiários difusos", como o armazenamento de C, e analisando o quão dependentes eles são desses ESs.

Tarefa 5.1.3. Analisar como as pessoas percebem as mudanças na ocorrência de ESs e como essas mudanças as afetam

Por meio de abordagens tanto de conhecimento acadêmico quanto de conhecimento local.

Tarefa 5.1.4. Analisar como as mudanças nos ESs podem afetar os sistemas socioambientais nos cenários futuros por meio da modelagem

Medido por dados de outras áreas de pesquisa e pela percepção das pessoas.

Objetivo 5.2. Investigar como as populações se adaptam às mudanças inter-relacionadas no clima e na floresta

A pesquisa sobre esse tema envolve a coleta de dados sobre as adaptações das pessoas, incluindo práticas já adotadas e implementadas ou em desenvolvimento, além de investigar quais adaptações estão sendo concebidas nesses contextos. A coleta de dados pode ser feita por métodos quantitativos e qualitativos usuais, mas também por meio de um maior engajamento com as comunidades locais, incluindo a coprodução de conhecimento e políticas com as partes interessadas locais.

Tarefa 5.2.1. Analisar estratégias de adaptação às mudanças climáticas

Estratégias que as pessoas já estão colocando em prática.

Tarefa 5.2.2. Investigar os motores de tais adaptações

Se pela autopercepção das mudanças climáticas (por exemplo, percepção das mudanças nos padrões de chuva e adaptação em conformidade) ou via instituições.

Tarefa 5.2.3. Classificar os tipos de estratégias

Se são baseadas na natureza, tecnológicas e/ou outras inovações.

Tarefa 5.2.4. Avaliar a eficácia/ sucesso de tais estratégias de adaptação

Objetivo 5.3. Investigar como o experimento FACE irá interagir e impactar políticas e governança, e promover engajamento e orientação de políticas

A pesquisa para alcançar este Objetivo envolverá o engajamento com a formulação de políticas e a análise de práticas onde decisões, cientistas e conhecimento interagem. Isso envolverá métodos qualitativos (entrevistas, análise de documentos e políticas, etnografia, grupos

[6] O conceito de serviços ecossistêmicos (ESs) serão usados sob a perspectiva ampla do conceito de "contribuição da natureza para as pessoas" (186).

[7] Ex.: Governos locais, comunidades, ONGs etc.

[8] Práticas sustentáveis de agricultura e práticas de gerenciamento alternativas, ou práticas de Povos Indígenas e Comunidades Locais (PICLs) que podem potencialmente ser entendidas como adaptações também são discutidas como formas de se adaptar às mudanças climáticas.

focais, pesquisas, entre outros) que possibilitem a análise de dados, incluindo documentos oficiais, observação participante, entrevistas e mídia. Eventos em Manaus e outros locais de interesse serão organizados para promover o engajamento, contatando partes interessadas e promovendo workshops, grupos focais e outras formas de diálogo entre cientistas do FACE, tomadores de decisão e atores sociais interessados no eCO_2.

Tarefa 5.3.1. Mapear e analisar políticas climáticas/ambientais

Que serão potencialmente impactadas pelo conhecimento emergente do AmazonFACE.

Tarefa 5.3.2. Mapear e analisar os agentes envolvidos em esquemas de política e governança relacionados ao bioma amazônico

Podem ser tomadores de decisão, especialistas, comunidades locais, ONGs etc.

Tarefa 5.3.3. Promover engajamento entre cientistas e partes interessadas envolvidas em política, tomada de decisão e governança do bioma amazônico

Tarefa 5.3.4. Preparar briefings de políticas e outros materiais para tomadores de decisão sobre mudanças climáticas, eCO_2, biodiversidade, serviços ecossistêmicos e outros fenômenos estudados pelo experimento

Esta é uma tarefa integrativa que envolverá contribuições e interação de todas as outras áreas de pesquisa.

Integração de dados e modelos

Os resultados da Área de Pesquisa Socioambiental, especialmente aqueles relacionados ao Objetivo 1, serão escalados tanto no espaço quanto no tempo com o suporte das projeções de modelagem previstas na Área de Pesquisa de Modelagem. Isso permitirá uma melhor compreensão de como os impactos em cascata do eCO_2 e das mudanças climáticas na floresta afetarão os ESs em grande escala, agora e no futuro. Tais projeções podem ser potencialmente usadas nas políticas e governança atuais da Amazônia em diferentes escalas, do local ao global. Será estudada a produção de conhecimento por meio da interface entre os modelos do AmazonFACE e os modelos existentes que levam em consideração variáveis socioeconômicas, como o Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST),[9] como forma de mapear, quantificar e atribuir valor aos ESs estudados.

[9] Disponível em: < https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>.



9.6 Área de Pesquisa 6: Modelagem



Contexto

Os modelos são as principais ferramentas para interpretar medições de ecossistemas, entender sua relação com variáveis ambientais e colocar essas observações em um contexto espacial e temporal mais amplo. Eles são especialmente úteis para diagnosticar comportamentos observados (por exemplo, via experimentos fatoriais) ou para projetar respostas a cenários futuros de aumento do dióxido de carbono atmosférico (eCO_2) e seus possíveis impactos no clima. Os resultados dos modelos desempenham um papel crucial na formulação de políticas governamentais, como foram usados, por exemplo, para calcular o balanço de carbono restante para atingir a meta de dois graus do Acordo de Paris [182]. A confiança em tais previsões depende de os modelos estarem bem fundamentados em observações de processos em nível local e em grande escala, além de respostas a manipulações experimentais. Modelos globais destacam a importância dos efeitos do eCO_2 nos ciclos de carbono, água e nutrientes dos trópicos e no feedback das regiões tropicais para o clima global [32].

Perguntas de Pesquisa

1. O que os modelos atuais (DGVMs e modelos de superfície terrestre) projetam para o futuro da Amazônia sob mudanças climáticas?
2. As suposições subjacentes feitas nos modelos são consistentes com os conhecimentos obtidos no AmazonFACE?
3. Quando restringidos pelo experimento, os modelos simulam uma super ou subestimativa dos impactos das mudanças climáticas e feedbacks (incluindo água) e balanço de carbono para objetivos políticos?
4. Que processos-chave foram identificados por discrepâncias entre modelo e observação e que
5. Que hipóteses de longa data o experimento FACE não foi capaz de testar? Quais medições/ experimentos adicionais são agora necessários?

Objetivos e principais tarefas

Um conjunto de modelos baseados em processos, como DGVMs padrão, DGVMs baseados em traços, modelos orientados por dados de local específico e modelos atmosfera-vegetação acoplados, serão aplicados para sintetizar e escalar os efeitos observados do eCO_2 na floresta amazônica relacionados à assimilação e alocação de carbono, aquisição de nutrientes, fluxos de água e respostas impulsionadas pela diversidade funcional.

Inspirado por esforços anteriores de FACE [65], desenvolveu-se um programa dedicado para acompanhar os esforços de observação no AmazonFACE com estudos e desenvolvimentos de modelagem específicos, com os seguintes objetivos:

i. síntese rápida dos resultados experimentais emergentes;

ii. análise aprofundada do comportamento do modelo com foco no desafio às suposições predominantes dos modelos (avaliação centrada em suposições);

iii. geração e teste de hipóteses alternativas (por exemplo, sobre processos subterrâneos, relações carbono-água) desenvolvidas por experimentalistas e modeladores para fornecer mais orientações para necessidades experimentais enquanto o experimento ainda está em andamento;

iv. desenvolvimento de uma estrutura para escalar medições-chave do nível de sítio ou folha-árvore-solo (como da escala foliar para estimativas de fotossíntese em escala de dossel; fluxos evaporativos da escala de árvore para a parcela);

v. aplicação de ferramentas de modelagem – baseadas em testes experimentais – para previsões em maior escala (por exemplo, fluxos de carbono e água em toda a bacia e outros).

Tarefas

Tarefa 6.1: Síntese e Escalonamento dos Dados de Medição para o Nível de Parcela

Será realizada nas áreas de pesquisa individuais, usando uma subseleção de modelos, como o modelo 3D detalhado em escala de dossel para traduzir a fotossíntese em nível foliar para estimativas em escala de dossel, ou abordagens de modelagem bayesiana para propagar incertezas no balanço de carbono, nutrientes e água de todo o ecossistema [28].

Tarefa 6.2: Realizar Conjuntos de Modelos para Analisar Suposições e Gerar Hipóteses

Modelos existentes serão executados para informar o trabalho experimental, avaliar hipóteses subjacentes (ou seja, integração modelo-dados) [64] e identificar lacunas de conhecimento. Aplicaremos e executaremos conjuntos de modelos de diferentes tipos (por exemplo, modelos de vegetação dinâmica, modelos baseados em traços, modelos de sistema terrestre) nas áreas de pesquisa individuais para ajudar a informar o trabalho experimental, como feito por Fleischer [20], onde já identificamos suposições alternativas de modelos e medições necessárias para a melhoria de modelos relacionados ao ciclo do fósforo. Da mesma forma, conjuntos de modelos serão executados em outras áreas de pesquisa para identificar medições-chave e garantir que todos os dados necessários sejam coletados no experimento, incluindo novos dados que possam ser identificados como necessários a partir de novas avaliações de modelos. Os resultados experimentais também serão usados para avaliar o desempenho do modelo em conjuntos de modelos existentes, como o CMIP6.

Tarefa 6.3: Recomendações para Melhorias em Modelos de Grande Escala

Serão elaboradas recomendações que estejam disponíveis para a comunidade de modelagem com o objetivo de garantir que o entendimento derivado experimentalmente esteja vinculado a padrões e observações mais amplas na Amazônia. Com base nos resultados da integração modelo-dados (Tarefa 2), serão identificados novos processos a serem implementados e a revisão de processos existentes. Também serão estabelecidos vínculos com outros programas de experimentos de campo na região (por exemplo, ATTO, AFEX, experimentos de seca) e os modelos serão aprimorados de forma colaborativa.

Tarefa 6.4: Fornecer Projeções de Modelos para o Desenvolvimento Futuro da Floresta Amazônica Usando o Conhecimento do AmazonFACE

Com base nisso, o objetivo é integrar novos conhecimentos e entendimentos do AmazonFACE em modelos acoplados aprimorados e em uma futura geração de grandes conjuntos de modelos, como CMIP, ISIMIP, e restringir melhor a resposta do CO_2 em simulações futuras.

10.Integração e síntese de Dados



O sucesso de um experimento FACE dependerá em grande parte de integração bem-sucedida. Experimentos de ecossistemas sempre envolvem inúmeras interações entre os ciclos de carbono, água e nutrientes, e essas interações afetam o estado e os processos do sistema – fundamentais para entender como o ecossistema funciona e como ele responderá a uma perturbação. O experimento FACE começa com a perturbação do ciclo do carbono pelo aumento da concentração de CO_2, mas sua resposta final será delineada por efeitos secundários nos nutrientes que retroalimentam a fotossíntese e o ciclo do carbono, ou na absorção e eficiência no uso da água do solo, o que pode conferir maior resiliência à seca.

A longo prazo, as respostas diferenciais das espécies podem alterar a competição e a diversidade biológica. Como interações complexas estão envolvidas, a integração entre múltiplos fluxos de dados é necessária para obter uma compreensão abrangente do funcionamento do ecossistema e de sua resposta ao aumento de CO_2. Por isso, enfatizamos a necessidade de integração em todas as tarefas de pesquisa neste plano científico. Por exemplo, a produtividade primária líquida (NPP), que é uma métrica fundamental do ecossistema e que se espera ser responsiva ao eCO_2, requer, no mínimo, a integração de fluxos de dados separados sobre produção foliar, produção de madeira e produção de raízes finas, conforme descrito na Área de Pesquisa 1. Espera-se que a NPP seja modificada pelo status de nutrientes.

Como descrito na Área de Pesquisa 2, a construção de um balanço de nutrientes requer a integração de alguns dos mesmos dados de biomassa usados para a NPP, além de concentrações de nutrientes em diferentes tecidos e suas entradas e saídas no ecossistema. É necessária uma coordenação bem alinhada entre os pesquisadores que medem a produção de diferentes tecidos vegetais e aqueles que medem suas concentrações de nutrientes. Investigações hidrológicas (Área de Pesquisa 3) incluem a quantificação da distribuição de raízes em relação às fontes de

água do solo, conforme medido pelas medições do ciclo do carbono e pela representação da distribuição de raízes em modelos (ver respostas ao pré-tratamento). A quantificação da produtividade primária bruta (Área de Pesquisa 1) requer a integração de dados detalhados sobre fotossíntese foliar, estrutura do dossel e variáveis meteorológicas, todas as quais fornecem insumos para um modelo.

Um tema comum em todos esses produtos de integração é a necessidade geral de que cada participante do projeto compreenda como suas medições individuais se encaixam no todo científico e se comprometa a seguir certas diretrizes sobre como sua pesquisa é conduzida. Essas diretrizes incluem o compartilhamento aberto e pontual de todos os dados dentro do projeto; aceitação de formatação padronizada dos dados; discussões frequentes para garantir que todas as medições críticas sejam feitas e que sejam realizadas na melhor escala temporal e espacial. Os líderes de equipe e os pesquisadores responsáveis por produzir produtos de integração deverão garantir que essas diretrizes sejam seguidas. Uma atividade especialmente importante será a comunicação e coordenação eficientes entre os empiristas e os modeladores. Os modeladores estão representando corretamente os dados de campo? Os empiristas reconhecem as necessidades críticas de dados dos modelos? Embora todos esses requisitos possam ser exigência para o pesquisador individual, eles também são o que torna a ciência do ecossistema especialmente gratificante.

Por fim, um elemento-chave para a devida integração e síntese necessárias em um esforço de pesquisa como o AmazonFACE é um banco de dados adequado, prontamente acessível à comunidade interna – e, após o tempo adequado, também à comunidade externa. O banco de dados do Programa AmazonFACE está atualmente em construção seguindo o princípio FAIR para dados científicos: localizável, acessível, interoperável e reutilizável. Mais detalhes sobre a Política de Dados do Programa e o banco de dados podem ser encontrados na Seção 15.



11.Comunicação e divulgação



A estratégia completa de comunicação do AmazonFACE é explicitada no Plano de Comunicação do Programa e é composto principalmente por três componentes, cada um com suas próprias especificidades, devido não apenas às diferenças nos obstáculos de comunicação, mas também aos seus diferentes objetivos. Toda ação de comunicação exige uma compreensão do público, da mídia e dos objetivos. O AmazonFACE também pode ser uma referência em termos de divulgação pública, dada não apenas sua associação com florestas em pé e tecnologia, mas também à ciência de ponta no campo das mudanças climáticas que ele representa.

Comunicação Interna (entre pares)

Esta comunicação visa superar os desafios de ter a comunidade de pesquisa baseada em locais além de Manaus, em outras partes do Brasil e do mundo. Além disso, envolve as reuniões virtuais e presenciais do Comitê Diretor Científico do AmazonFACE, bem como a produção e circulação de um boletim informativo para manter a comunidade interna ciente dos últimos desenvolvimentos. Tanto um portal de intranet quanto o portal de dados do AmazonFACE atendem ao propósito de troca de informações e dados internamente.

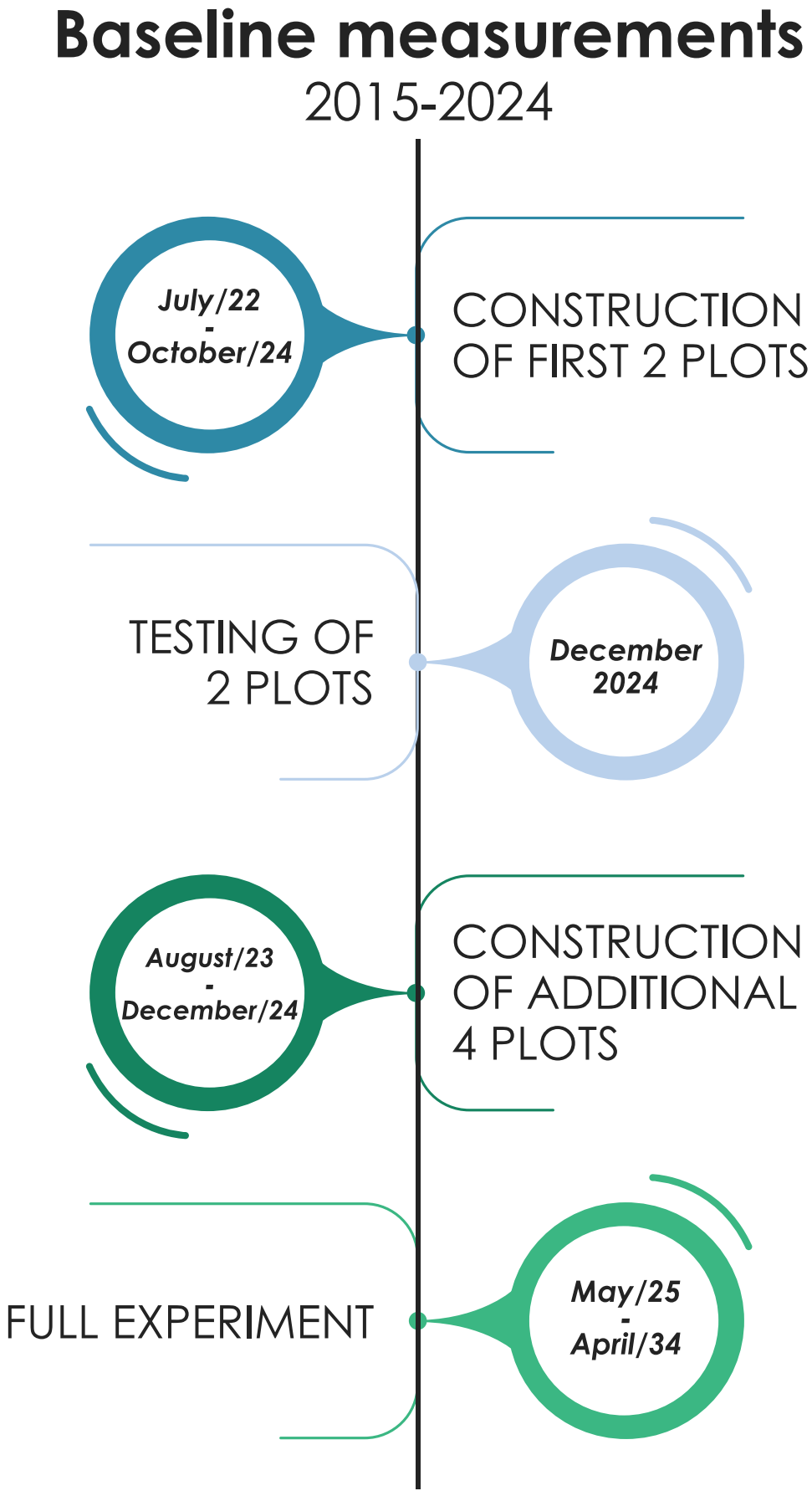
Comunicação com a Comunidade Externa (Científica e Não Científica)

Essa comunicação será feita eficientemente realizada por meio de um portal de página na web, canais de mídia social, workshops abertos, comunicados de imprensa, conferências de imprensa e a elaboração e disseminação de FAQs sobre o AmazonFACE, entendendo que um processo científico transparente e acessível pode ajudar as pessoas, especialmente as crianças, a ver a ciência de forma menos abstrata.

Interações com Tomadores de Decisão

A Área de Pesquisa 5 (Socioambiental) do AmazonFACE volta a atenção para comunicação e o uso dos resultados e descobertas do AmazonFACE pelos atores interessados, tal que políticas de impacto e governança climática e de conservação sejam baseadas em dados científicos de ponta (ver tarefas 5.3.3 e 5.3.5 da Área de Pesquisa 5).

12.Proposta de Cronograma



(Subject to changes due to climatic, logistic or financial conditions)

13.Impactos externos e controle



Impacto no meio ambiente e na população local

A área ao redor do local do Programa é floresta tropical e é importante destacar que, para as populações locais/tradicionais, a floresta, além dos aspectos utilitários que garantem sua sobrevivência, tem um significado simbólico. O local ZF-2 é regido pela Resolução RE nº 004/2017, que apresenta as regras e regulamentos gerais para visitação e uso das bases de pesquisa do INPA, sejam elas estações, reservas ou locais flutuantes. Com base nas informações disponíveis, não será necessário submeter o projeto ao processo de licenciamento ambiental. As seguintes comunidades tradicionais vivem nas proximidades do experimento do Programa (a sudoeste do local experimental, dentro da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Puranga-Conquista):

- Barreirinhas (14 famílias), a 14 km de distância;
- Boa Esperança (11 famílias), a 27 km de distância; e
- Nova Esperança (22 famílias), a 34 km de distância.

Do ponto de vista humano e cultural, é importante considerar essas populações como protagonistas e sujeitos na conservação da biodiversidade e reconhecer o peso e a força de sua ancestralidade.

Embora o Programa não exija a recomendação da OIT 169 de "consulta e diálogo prévios" como obrigatória, a equipe do AmazonFACE estabeleceu uma linha de comunicação com essas comunidades o mais cedo possível e antes do início das construções. Além disso, a equipe do Programa apresentou um esboço do projeto às comunidades locais e planejou vários projetos potenciais focados na comunidade (sujeitos a financiamento), para que elas possam entender o impacto das mudanças climáticas na sustentabilidade dos rios e dos recursos.

Licenças

A terra usada para o local experimental, conhecida como ZF2, pertence ao INPA, e a permissão para realizar a construção experimental e executar anos de experimentação foi concedida. As permissões pertinentes para estrangeiros que desejam realizar pesquisas na área

do AmazonFACE são devidamente solicitadas ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Impacto da construção

Recrutar o empreiteiro certo para implementar os planos de construção é crucial para o sucesso a curto e longo prazo do Programa. A equipe do projeto revisou vários empreiteiros potenciais para realizar o trabalho de construção e montar o par de anéis de demonstração e as obras de infraestrutura para todo o local. O empreiteiro escolhido demonstrou experiência comprovada em trabalhar em muitos projetos na Floresta Amazônica, mostrando um entendimento das sensibilidades para preservar a floresta, a flora e a fauna do local ao mínimo absoluto, além de limitar o impacto do processo de construção no ambiente local.

O empreiteiro foi criativo e inovador, com o apoio da equipe do AmazonFACE, ao utilizar métodos para transportar máquinas para o local, instalar torres, usar estruturas construídas para o projeto como bases de acampamento, limitando a necessidade de viajar de e para o local regularmente. O profissional entendeu e cumpriu a necessidade de limitar a perturbação do solo e da flora dentro do local ao instalar torres, tanques de armazenamento etc.

Melhoria da estrada

Por meio da restauração da estrada, o Programa melhorou significativamente a saúde e segurança ao percorrer os últimos 34 km até o local. Foi utilizada uma sinalização para demarcar o local e barreiras de controle com segurança foram instaladas para monitorar o acesso.

Saúde e segurança

A equipe do AmazonFACE implementou diversas medidas para garantir a segurança de trabalhadores, pesquisadores e visitantes no local. Isso incluiu a contratação de um consultor especializado que fez uma revisão da área, forneceu recomendações e treinou a equipe e os empreiteiros. Foram adquiridos equipamento que estão em operação para garantir a segurança no uso de máquinas, coleta de amostras por técnicos e manutenção de guindastes e torres durante o ciclo de vida do experimento. O principal laboratório de campo contém medicamentos, equipamentos de emergência, como um telefone via satélite, e um link star está sendo instalado para fornecer comunicações diárias e de emergência. Conforme a recomendação do consultor mencionado, campanhas de campo envolvendo mais de dez pessoas contam com a presença de um paramédico e uma ambulância.

Emissões de carbono

A pegada de carbono do AmazonFACE tem o potencial de causar uma percepção negativa do Programa, especialmente porque visa melhorar a compreensão do ambiente da Floresta Amazônica. Como resultado, a equipe do projeto encomendou um relatório independente sobre as emissões de carbono para incluir as fases de construção, experimentação e descomissionamento do experimento. Durante o ciclo de vida restante do experimento, a equipe do projeto revisará as opções e, sujeito a financiamento, implementará um plano local de compensação de carbono para o Programa ou um compromisso de equilibrar a pegada de carbono do Programa com ações positivas de carbono. Esses planos incluem, mas não se limitam, a reflorestamento e sepultamento geológico de carbono. Qualquer esquema escolhido precisará ser confiável e atender às necessidades do Programa.



14. Organização institucional e interações com outros projetos

Desde 2014, o AmazonFACE é um Programa de Pesquisa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) do Brasil, baseado e coordenado pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) e co-coordenado pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). O MCTI e o Escritório de Relações Exteriores, Commonwealth e Desenvolvimento do Reino Unido (Foreign Commonwealth and Development Office - FCDO) são atualmente os principais financiadores do AmazonFACE. Os recursos do FCDO são disponibilizados ao AmazonFACE por meio do Met Office do Reino Unido, que também é um importante parceiro científico do AmazonFACE. Desde que as regulamentações dos financiadores permitam, todos os recursos financeiros são gerenciados pela Fundação Arthur Bernardes (Funarbe). Isso não exclui de forma alguma o apoio de agências de financiamento de pesquisa, como FAPESP, FAPEAM, Capes ou CNPq.

Muitas outras instituições têm cientistas e estudantes participando do projeto, como a Universidade de São Paulo (USP), Universidade de Exeter, Universidade de Birmingham, Universidade Técnica de Munique (TUM), Universidade de Wageningen, a Universidade Federal do Amazonas (UFAM), entre outras. Novos pedidos de colaboração são examinados pelo Comitê Diretor Científico por meio de um formulário específico disponível no site do AmazonFACE, seguindo a lógica de que o AmazonFACE é uma infraestrutura comunitária registrada na Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa (Pnipe) do MCTI, aberta ao desenvolvimento de toda ciência relevante, mas também tentando evitar impactos significativos e conservar, tanto quanto possível, o ecossistema florestal para o experimento, que deve durar, pelo menos, 10 anos.

Sinergias com outros projetos científicos em andamento são incentivadas, especialmente com outros experimentos FACE florestais e com projetos relacionados às mudanças climáticas que ocorrem na Amazônia. Há pontos de interesse óbvios, tanto em termos técnicos quanto científicos, entre o AmazonFACE, o BiFOR-FACE no Reino Unido [122] e o EucFACE na Austrália [121]. Atualmente, há uma ideia de estabelecer um Centro Global de FACE Florestal, formalmente congregando os três experimentos em andamento e estabelecendo uma plataforma comum para o compartilhamento de informações técnicas, codificação de um único software de operação, promovendo o intercâmbio e treinamento de pesquisadores e estudantes, além de fomentar a co-participação em campanhas de campo, exercícios de modelagem e publicações.

Também existem complementaridades relevantes entre o AmazonFACE e o Experimento de Fertilização da Amazônia (AFEX) em relação às limitações da produtividade primária impostas pela falta de fósforo no solo na Amazônia Central [45] e como isso pode limitar a resposta da floresta ao eCO_2. Sinergias também existem com o Observatório de Torre Alta da Amazônia [183], por exemplo, no que diz respeito aos efeitos do eCO_2 nos fluxos de água e energia na camada limite foliar e como isso se expande para o dossel e para as camadas-limite planetárias, com impactos em cascata para a precipitação e balanço energético da região (184). Outro exemplo vem da interação entre o AmazonFACE e o experimento de exclusão de chuva, ESECAFLOR, no Pará [185], para ajudar a entender as interações entre o eCO_2 e a resiliência das árvores à seca na floresta amazônica, especialmente do ponto de vista da modelagem de ecossistemas.



15.Estrutura Organizacional



A estrutura de gestão do AmazonFACE é simplificada para priorizar o fluxo de informações, a operação do experimento e a resolução rápida de eventuais problemas. Essa estrutura organizacional é formalmente apresentada em um Decreto do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) do Brasil, disponível no portal web do Programa. O MCTI tem papel de supervisão, mais especificamente por meio de sua Coordenação-Geral de Ciências do Clima.

A coordenação do Programa é realizada principalmente pelo INPA, com a possibilidade de outras instituições co-coordenarem, como ocorre com a Unicamp, desde que haja acordos específicos firmados com o INPA. Tanto os setores de comunicação quanto de gestão de dados estão diretamente vinculados à coordenação do programa. Um escritório executivo, composto por três gerentes (administrativo, operacional e técnico), garante a execução adequada do Programa em termos financeiros e logísticos. Um Comitê Científico Diretor, a instância mais participativa na estrutura de gestão do AmazonFACE, é composto por aproximadamente 20 membros, do Brasil e de outros países participantes, buscando um equilíbrio de gênero e a inclusão de jovens cientistas.

As Áreas de Pesquisa detalhadas nesta seção do plano (Seção 9) estão inseridas dentro do Comitê Científico, com um ou dois membros atuando como líderes de Área de Pesquisa. Esses líderes, o presidente do Comitê e os coordenadores do Programa estão em constante contato com os gerentes do escritório executivo, para garantir que as decisões colegiadas tomadas nas reuniões do comitê sejam devidamente implementadas ou atendidas com ações práticas. Idealmente, o comitê realiza reuniões mensais online e pelo menos uma reunião presencial por ano. Mais detalhes sobre a estrutura organizacional do AmazonFACE podem ser encontrados no Decreto do MCTI.

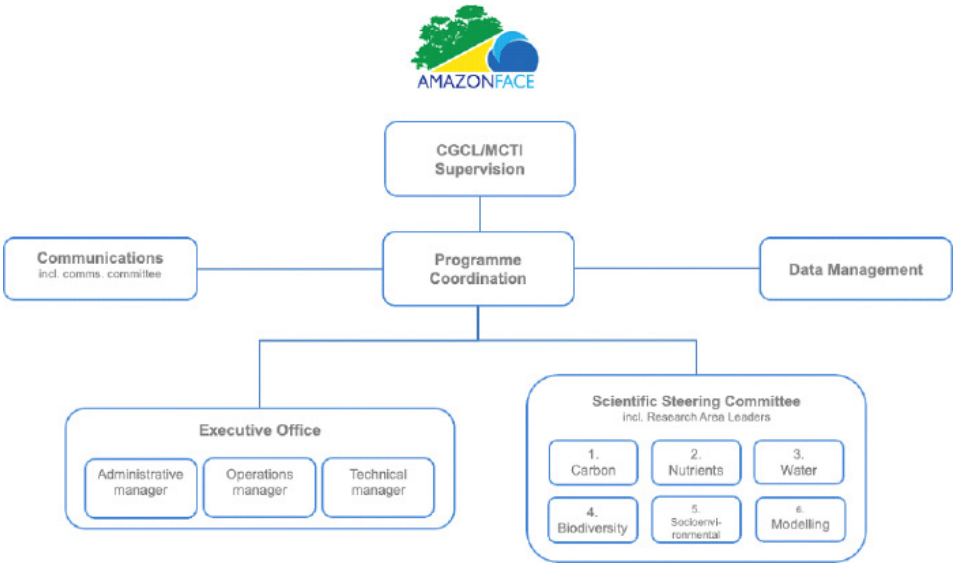


Figura 23. Representação esquemática da estrutura organizacional do AmazonFACE.

16.Código de Conduta e Política de Dados

O Comitê Científico do AmazonFACE aprovou a primeira versão do Código de Conduta (CoC, sigla em inglês para Code of Conduct) para o programa em janeiro de 2023. O CoC estabeleceu regras que definem as normas, responsabilidades e práticas adequadas para indivíduos e instituições dentro do programa AmazonFACE.

O documento se aplica a todos os membros, associados e colaboradores do AmazonFACE e a todos os espaços e instâncias onde as pesquisas e atividades do programa são realizadas. Ele estabelece o compromisso inegociável das pessoas com um ambiente seguro, respeitoso e acolhedor, com tolerância zero para assédio de qualquer tipo. O CoC detalha o comportamento profissional esperado e a conduta inaceitável, além de delinear procedimentos para relatar, investigar e resolver possíveis casos de má conduta. Diretrizes de autoria para garantir uma autoria justa, adequada e transparente das publicações científicas derivadas do AmazonFACE são estabelecidas no CoC, assim como as regras para propriedade intelectual e as diretrizes resultantes para compartilhamento de dados e materiais do programa. O CoC está sujeito a revisões periódicas e atualizações, e o Comitê Científico acolhe sugestões e feedback dos membros para sempre garantir as mais altas medidas de segurança social possíveis.

Em 2019, o Comitê Científico do AmazonFACE aprovou e publicou no site do AmazonFACE um documento de Política de Dados para o Programa. O documento está sujeito à revisão periódica das regulamentações do Programa relacionadas à disponibilidade e compartilhamento de dados, mas, quando este Plano Científico foi elaborado, a política prevê, entre outras questões, que os dados devem ser disponibilizados para a comunidade interna do Programa dentro de seis meses após a coleta, e para a comunidade externa 12 meses após a coleta. Esses dados serão disponibilizados por meio de um portal de dados acessível e abrangente – que está em desenvolvimento –, utilizando o princípio FAIR para dados científicos: encontráveis, acessíveis, interoperáveis e reutilizáveis. A Política de Dados atual também prevê recomendações específicas sobre coautoria de artigos derivados dos dados do AmazonFACE.

17. Referências

1. Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones MW, Andrew RM, Gregor L, Hauck J, et al. Global Carbon Budget 2022. Earth Syst Sci Data. 2022 Nov 11;14(11):4811–900.

2. Rae JWB, Zhang YG, Liu X, Foster GL, Stoll HM, Whiteford RDM. Atmospheric CO_2 over the Past 66 Million Years from Marine Archives. Annu Rev Earth Planet Sci. 2021 May 30;49(1):609–41.

3. Meinshausen M, Nicholls ZRJ, Lewis J, Gidden MJ, Vogel E, Freund M, et al. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. Geosci Model Dev. 2020 Aug 13;13(8):3571–605.

4. Walker AP, De Kauwe MG, Bastos A, Belmecheri S, Georgiou K, Keeling RF, et al. Integrating the evidence for a terrestrial carbon sink caused by increasing atmospheric CO_2. New Phytologist. 2021 Mar 21;229(5):2413–45.

5. Schimel D, Stephens BB, Fisher JB. Effect of increasing CO_2 on the terrestrial carbon cycle. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2015 Jan 13;112(2):436–41.

6. Hubau W, Lewis SL, Phillips OL, Affum-Baffoe K, Beeckman H, Cuní-Sanchez A, et al. Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. Nature. 2020 Mar 5;579(7797):80–7.

7. Marengo JA, Souza CM, Thonicke K, Burton C, Halladay K, Betts RA, et al. Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. Front Earth Sci (Lausanne). 2018 Dec 21;6.

8. Barichivich J, Gloor E, Peylin P, Brienen RJW, Schöngart J, Espinoza JC, et al. Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. Sci Adv. 2018 Sep 7;4(9).

9. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Cambridge University Press; 2023.

10. Meir P, Ian Woodward F. Amazonian rain forests and drought: response and vulnerability. New Phytologist. 2010 Aug 19;187(3):553–7.

11. Davidson EA, de Araújo AC, Artaxo P, Balch JK, Brown IF, C. Bustamante MM, et al. The Amazon basin in transition. Nature. 2012 Jan 19;481(7381):321–8.

12. Lapola DM, Pinho P, Quesada CA, Strassburg BBN, Rammig A, Kruijt B, et al. Limiting the high impacts of Amazon forest dieback with no-regrets science and policy action. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018 Nov 13;115(46):11671–9.

13. Cox PM, Betts RA, Collins M, Harris PP, Huntingford C, Jones CD. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. Theor Appl Climatol. 2004 Jun 27;78(1–3).

14. Lapola DM, Oyama MD, Nobre CA. Exploring the range of climate biome projections for tropical South America: The role of CO_2 fertilization and seasonality. Global Biogeochem Cycles. 2009 Sep 3;23(3).

15. Rammig A, Jupp T, Thonicke K, Tietjen B, Heinke J, Ostberg S, et al. Estimating the risk of Amazonian forest dieback. New Phytologist. 2010 Aug 19;187(3):694–706.

16. Cox PM, Pearson D, Booth BB, Friedlingstein P, Huntingford C, Jones CD, et al. Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability. Nature. 2013 Feb 6;494(7437):341–4.

17. Huntingford C, Zelazowski P, Galbraith D, Mercado LM, Sitch S, Fisher R, et al. Simulated resilience of tropical rainforests to CO_2-induced climate change. Nat Geosci. 2013 Apr 10;6(4):268–73.

18. Nobre CA, Sampaio G, Borma LS, Castilla-Rubio JC, Silva JS, Cardoso M. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2016 Sep 27;113(39):10759–68.

19. Zemp DC, Schleussner CF, Barbosa HMJ, Hirota M, Montade V, Sampaio G, et al. Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. Nat Commun. 2017 Mar 13;8(1):14681.

20. Fleischer K, Rammig A, De Kauwe MG, Walker AP, Domingues TF, Fuchslueger L, et al. Amazon forest response to CO_2 fertilization dependent on plant phosphorus acquisition. Nat Geosci. 2019 Sep 5;12(9):736–41.

21. Koch A, Hubau W, Lewis SL. Earth System Models Are Not Capturing Present-Day Tropical Forest Carbon Dynamics. Earths Future. 2021 May 20;9(5).

22. Aidar MPM, Martinez CA, Costa AC, Costa PMF, Dietrich SMC, Buckeridge MS. Effect of atmospheric CO_2 enrichment on the establishment of seedlings of Jatobá, Hymenaea Courbaril L. (Leguminosae, Caesalpinioideae). Biota Neotrop. 2002;2(1):1–10.

23. Körner C. Responses of Humid Tropical Trees to Rising CO_2. Annu Rev Ecol Evol Syst. 2009 Dec 1;40(1):61–79.

24. Cernusak LA, Winter K, Dalling JW, Holtum JAM, Jaramillo C, Körner C, et al. Tropical forest responses to increasing atmospheric CO_2: current knowledge and opportunities for future research. Functional Plant Biology. 2013;40(6):531.

25. da Silva Fortirer J, Grandis A, Pagliuso D, de Toledo Castanho C, Buckeridge MS. Meta-analysis of the responses of tree and herb to elevated CO_2 in Brazil. Sci Rep. 2023 Sep 22;13(1):15832.

26. Norby RJ, Zak DR. Ecological Lessons from Free-Air CO_2 Enrichment (FACE) Experiments. Annu Rev Ecol Evol Syst. 2011 Dec 1;42(1):181–203.

27. U.S. D of E. U.S. Department of Energy Free-Air CO_2 Enrichment Experiments: FACE Results, Lessons, and Legacy. 2020 Jun.

28. Jiang M, Medlyn BE, Drake JE, Duursma RA, Anderson IC, Barton CVM, et al. The fate of carbon in a mature forest under carbon dioxide enrichment. Nature. 2020 Apr 9;580(7802):227–31.

29. Malhi Y. The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation. Journal of Ecology. 2012 Jan 13;100(1):65–75.

30. Hickler T, Smith B, Prentice Ic, Mjöfors K, Miller P, Arneth A, et al. CO_2 fertilization in temperate FACE experiments not representative of boreal and tropical forests. Glob Chang Biol. 2008 Jul 26;14(7):1531–42.

31. Norby RJ, De Kauwe MG, Domingues TF, Duursma RA, Ellsworth DS, Goll DS, et al. Model–data synthesis for the next generation of forest free-air CO_2 enrichment (FACE) experiments. New Phytologist. 2016 Jan 6;209(1):17–28.

32. Sampaio G, Shimizu MH, Guimarães-Júnior CA, Alexandre F, Guatura M, Cardoso M, et al. CO_2; physiological effect can cause rainfall decrease as strong as large-scale deforestation in the Amazon. Biogeosciences. 2021 Apr 22;18(8):2511–25.

33. Ciais P, Tan J, Wang X, Roedenbeck C, Chevallier F, Piao SL, et al. Five decades of northern land carbon uptake revealed by the interhemispheric CO_2 gradient. Nature. 2019 Apr 3;568(7751):221–5.

34. Lenton TM, Held H, Kriegler E, Hall JW, Lucht W, Rahmstorf S, et al. Tipping elements in the Earth's climate system. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2008 Feb 12;105(6):1786–93.

35. Lovejoy TE, Nobre C. Amazon Tipping Point. Sci Adv. 2018 Feb 2;4(2).

36. Norby RJ, DeLucia EH, Gielen B, Calfapietra C, Giardina CP, King JS, et al. Forest response to elevated CO_2 is conserved across a broad range of productivity. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2005 Dec 13;102(50):18052–6.

37. Strain BR, Bazzaz FA. Terrestrial Plant Communities. In: Lemon ER, editor. CO_2 and Plants: The Response of Plants to Rising Levels of Atmospheric Carbon Dioxide. 1st ed. Washington DC: CRC Press; 1983. p. 177–222.

38. Iversen CM, Keller JK, Garten CT, Norby RJ. Soil carbon and nitrogen cycling and storage throughout the soil profile in a sweetgum plantation after 11 years of CO_2 -enrichment. Glob Chang Biol. 2012 May 2;18(5):1684–97.

39. Norby RJ, Warren JM, Iversen CM, Medlyn BE, McMurtrie RE. CO_2 enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2010 Nov 9;107(45):19368–73.

40. Vitousek PM. Litterfall, Nutrient Cycling, and Nutrient Limitation in Tropical Forests. Ecology. 1984 Feb;65(1):285–98.

41. Meir P, Grace J, Miranda AC. Leaf respiration in two tropical rainforests: Constraints on physiology by phosphorus, nitrogen and temperature. Funct Ecol. 2001;15(3):378–87.

42. Lloyd J, Bird MI, Veenendaal EM, Kruijt B. Should Phosphorus Availability Be Constraining Moist Tropical Forest Responses to Increasing CO_2 Concentrations? In: Global Biogeochemical Cycles in the Climate System. Elsevier; 2001. p. 95–114.

43. Reich PB, Oleksyn J, Wright IJ. Leaf phosphorus influences the photosynthesis–nitrogen relation: a cross-biome analysis of 314 species. Oecologia. 2009 May 11;160(2):207–12.

44. DOMINGUES TF, MEIR P, FELDPAUSCH TR, SAIZ G, VEENENDAAL EM, SCHRODT F, et al. Co-limitation of photosynthetic capacity by nitrogen and phosphorus in West Africa woodlands. Plant Cell Environ. 2010 Jun 13;33(6):959–80.

45. Cunha HFV, Andersen KM, Lugli LF, Santana FD, Aleixo IF, Moraes AM, et al. Direct evidence for phosphorus limitation on Amazon forest productivity. Nature. 2022 Aug 18;608(7923):558–62.

46. Yang X, Chen X, Yang X. Effect of organic matter on phosphorus adsorption and desorption in a black soil from Northeast China. Soil Tillage Res. 2019 Apr;187:85–91.

47. Wasaki J, Rothe A, Kania A, Neumann G, Römheld V, Shinano T, et al. Root Exudation, Phosphorus Acquisition, and Microbial Diversity in the Rhizosphere of White Lupine as Affected by Phosphorus Supply and Atmospheric Carbon Dioxide Concentration. J Environ Qual. 2005 Nov;34(6):2157–66.

48. Lovelock CE, Kyllo D, Popp M, Isopp H, Virgo A, Winter K. Symbiotic Vesicular-Arbuscular Mycorrhizae Influence Maximum Rates of Photosynthesis in Tropical Tree Seedlings Grown Under Elevated CO_2. Functional Plant Biology. 1997;24(2):185.

49. Kooperman GJ, Chen Y, Hoffman FM, Koven CD, Lindsay K, Pritchard MS, et al. Forest response to rising CO_2 drives zonally asymmetric rainfall change over tropical land. Nat Clim Chang. 2018 May 27;8(5):434–40.

50. De Kauwe MG, Medlyn BE, Zaehle S, Walker AP, Dietze MC, Hickler T, et al. Forest water use and water use efficiency at elevated CO_2: a model-data intercomparison at two contrasting temperate forest FACE sites. Glob Chang Biol. 2013 Jun 25;19(6):1759–79.

51. Hungate BA, Chapin III. FS, Zhong H, Holland EA, Field CB. Stimulation of grassland nitrogen cycling under carbon dioxide enrichment. Oecologia. 1997 Jan 7;109(1):149–53.

52. Long SP, Drake BG. Effect of the Long-Term Elevation of CO_2 Concentration in the Field on the Quantum Yield of Photosynthesis of the C3 Sedge, Scirpus olneyi. Plant Physiol. 1991 May 1;96(1):221–6.

53. WÜrth MKR, Winter K, KÖrner CH. In situ responses to elevated CO_2 in tropical forest understorey plants. Funct Ecol. 1998 Dec 28;12(6):886–95.

54. Damasceno AR, Garcia S, Aleixo IF, Menezes JCG, Pereira IS, De Kauwe MG, et al. In situ short-term responses of Amazonian understory plants to elevated CO_2. Plant Cell Environ. 2024 May 9;47(5):1865–76.

55. Phillips OL, Vásquez Martínez R, Arroyo L, Baker TR, Killeen T, Lewis SL, et al. Increasing dominance of large lianas in Amazonian forests. Nature. 2002 Aug;418(6899):770–4.

56. Schnitzer SA, Bongers F. Increasing liana abundance and biomass in tropical forests: emerging patterns and putative mechanisms. Ecol Lett. 2011 Apr;14(4):397–406.

57. Thomas RB, Richter DD, Ye H, Heine PR, Strain BR. Nitrogen dynamics and growth of seedlings of an N-fixing tree (Gliricidia sepium (Jacq.) Walp.) exposed to elevated atmospheric carbon dioxide. Oecologia. 1991 Nov;88(3):415–21.

58. Tissue DT, Megonigal JP, Thomas RB. Nitrogenase activity and N 2 fixation are stimulated by elevated CO_2 in a tropical N 2 -fixing tree. Oecologia. 1997 Jan 7;109(1):28–33.

59. Cernusak LA, Winter K, Martínez C, Correa E, Aranda J, Garcia M, et al. Responses of Legume Versus Nonlegume Tropical Tree Seedlings to Elevated CO_2 Concentration . Plant Physiol. 2011 Sep 3;157(1):372–85.

60. Winter K, Lovelock CE. Growth responses of seedlings of early and late successional tropical forest trees to elevated atmospheric CO_2. Flora. 1999 Apr;194(2):221–7.

61. Medlyn BE, De Kauwe MG, Duursma RA. New developments in the effort to model ecosystems under water stress. New Phytologist. 2016 Oct 25;212(1):5–7.

62. SITCH S, HUNTINGFORD C, GEDNEY N, LEVY PE, LOMAS M, PIAO SL, et al. Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). Glob Chang Biol. 2008 Sep 6;14(9):2015–39.

63. Nakhavali MA, Mercado LM, Hartley IP, Sitch S, Cunha F V., di Ponzio R, et al. Representation of the phosphorus cycle in the Joint UK Land Environment Simulator (vn5.5_JULES-CNP). Geosci Model Dev. 2022 Jul 7;15(13):5241–69.

64. Medlyn BE, Zaehle S, De Kauwe MG, Walker AP, Dietze MC, Hanson PJ, et al. Using ecosystem experiments to improve vegetation models. Nat Clim Chang. 2015 Jun 21;5(6):528–34.

65. Walker AP, Hanson PJ, De Kauwe MG, Medlyn BE, Zaehle S, Asao S, et al. Comprehensive ecosystem model-data synthesis using multiple data sets at two temperate forest free-air CO_2 enrichment experiments: Model performance at ambient CO_2 concentration. J Geophys Res Biogeosci. 2014 May 27;119(5):937–64.

66. De Kauwe MG, Medlyn BE, Zaehle S, Walker AP, Dietze MC, Wang Y, et al. Where does the carbon go? A model–data intercomparison of vegetation carbon allocation and turnover processes at two temperate forest freevair CO_2 enrichment sites. New Phytologist. 2014 Aug 21;203(3):883–99.

67. POULTER B, HATTERMANN F, HAWKINS E, ZAEHLE S, SITCH S, RESTREPO-COUPE N, et al. Robust dynamics of Amazon dieback to climate change with perturbed ecosystem model parameters. Glob Chang Biol. 2010 Sep;16(9):2476–95.

68. Galbraith D, Levy PE, Sitch S, Huntingford C, Cox P, Williams M, et al. Multiple mechanisms of Amazonian forest biomass losses in three dynamic global vegetation models under climate change. New Phytologist. 2010 Aug 19;187(3):647–65.

69. Sakschewski B, von Bloh W, Boit A, Rammig A, Kattge J, Poorter L, et al. Leaf and stem economics spectra drive diversity of functional plant traits in a dynamic global vegetation model. Glob Chang Biol. 2015 Jul 9;21(7):2711–25.

70. Chai Y, Martins G, Nobre C, von Randow C, Chen T, Dolman H. Constraining Amazonian land surface temperature sensitivity to precipitation and the probability of forest dieback. NPJ Clim Atmos Sci. 2021 Feb 11;4(1):6.

71. Parry IM, Ritchie PDL, Cox PM. Evidence of localised Amazon rainforest dieback in CMIP6 models. Earth System Dynamics. 2022 Nov 24;13(4):1667–75.

72. Cox PM, Betts RA, Jones CD, Spall SA, Totterdell IJ. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. Nature. 2000 Nov 9;408(6809):184–7.

73. Mercado LM, Patiño S, Domingues TF, Fyllas NM, Weedon GP, Sitch S, et al. Variations in Amazon forest productivity correlated with foliar nutrients and modelled rates of photosynthetic carbon supply. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2011 Nov 27;366(1582):3316–29.

74. Gimeno TE, Crous KY, Cooke J, O'Grady AP, Ósvaldsson A, Medlyn BE, et al. Conserved stomatal behaviour under elevated CO_2 and varying water availability in a mature woodland. Funct Ecol. 2016 May 27;30(5):700–9.

75. Holm JA, Medvigy DM, Smith B, Dukes JS, Beier C, Mishurov M, et al. Exploring the impacts of unprecedented climate extremes on forest ecosystems: hypotheses to guide modeling and experimental studies. Biogeosciences. 2023 Jun 14;20(11):2117–42.

76. de Bello F, Lavorel S, Díaz S, Harrington R, Cornelissen JHC, Bardgett RD, et al. Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits. Biodivers Conserv. 2010 Sep 10;19(10):2873–93.

77. Díaz S, Kattge J, Cornelissen JHC, Wright IJ, Lavorel S, Dray S, et al. The global spectrum of plant form and function. Nature. 2016 Jan 14;529(7585):167–71.

78. Potschin-Young M, Haines-Young R, Görg C, Heink U, Jax K, Schleyer C. Understanding the role of conceptual frameworks: Reading the ecosystem service cascade. Ecosyst Serv. 2018 Feb;29:428–40.

79. Keller M, Bustamante M, Gash J, Silva Dias P, editors. Amazonia and Global Change [Internet]. Washington, D. C.: American Geophysical Union; 2009. (Geophysical Monograph Series; vol. 186). Available from: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/GM186

80. Grossman D. Amazon rainforest to get a growth check. Science (1979). 2016 May 6;352(6286):635–6.

81. Mooney HA, Drake BG, Luxmoore RJ, Oechel WC, Pitelka LF. Predicting Ecosystem Responses to Elevated CO_2 Concentrations. Bioscience. 1991 Feb;41(2):96–104.

82. Tollefson J. Experiment aims to steep rainforest in carbon dioxide. Nature. 2013 Apr 23;496(7446):405–6.

83. Lapola DM, Norby RJ. Amazon-FACE: Assessing the effects of increased atmospheric CO_2 on the ecology and resilience of the Amazon forest - Science Plan and Implementation Strategy. 2014.

84. Hofhansl F, Andersen KM, Fleischer K, Fuchslueger L, Rammig A, Schaap KJ, et al. Amazon Forest Ecosystem Responses to Elevated Atmospheric CO_2 and Alterations in Nutrient Availability: Filling the Gaps with Model-Experiment Integration. Front Earth Sci (Lausanne). 2016 Feb 26;4.

85. Chave J, Andalo C, Brown S, Cairns MA, Chambers JQ, Eamus D, et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. Oecologia. 2005 Aug 22;145(1):87–99.

86. Cordeiro AL, Norby RJ, Andersen KM, Valverde-Barrantes O, Fuchslueger L, Oblitas E, et al. Fine-root dynamics vary with soil depth and precipitation in a low-nutrient tropical forest in the Central Amazonia. Plant-Environment Interactions. 2020 Jun 22;1(1):3–16.

87. MALHI Y, ARAGÃO LEOC, METCALFE DB, PAIVA R, QUESADA CA, ALMEIDA S, et al. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. Glob Chang Biol. 2009 May 7;15(5):1255–74.

88. Jackson RB, Canadell J, Ehleringer JR, Mooney HA, Sala OE, Schulze ED. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. Oecologia. 1996 Nov;108(3):389–411.

89. Schaap KJ, Fuchslueger L, Hoosbeek MR, Hofhansl F, Martins NP, Valverde-Barrantes OJ, et al. Litter inputs and phosphatase activity affect the temporal variability of organic phosphorus in a tropical forest soil in the Central Amazon. Plant Soil. 2021 Dec 18;469(1–2):423–41.

90. Martins N, Lugli LF, Valverde-Barrantes OJ, Takeshi B, Pires M, Menezes JG, et al. Initial responses of fine root dynamics of understory plants to elevated CO_2 in a Central Amazon rainforest. Copernicus Meetings. 2022;

91. Fuchslueger L, Schaap K, Valverde-Barrantes O, Oblitas E, Hofhansl F, Garcia S, et al. Seasonality of microbial organic matter decomposition affecting phosphorus availability in a Central Amazonian tropical lowland rainforest soil. EGU General Assembly Conference Abstracts. 2018 Apr;6327.

92. Schaap KJ, Fuchslueger L, Quesada CA, Hofhansl F, Valverde-Barrantes O, Camargo PB, et al. Seasonal fluctuations of extracellular enzyme activities are related to the biogeochemical cycling of C, N and P in a tropical terra-firme forest. Biogeochemistry. 2023 Mar 21;163(1):1–15.

93. Souza C, Fuchslueger L, Pires Martins N, Sales Pereira I, Viana Guedes A, Tanaka Portela BT, et al. Effects of elevated CO_2 on soil microbial communities in a tropical understory forest in the Central Amazon. EGU General Assembly 2024. 2024 Apr;

94. ALeixo IF. The role of elevated CO_2 and phosphorus addition in aboveground biomass and functional traits of Inga edulis Mart. seedlings in a Central Amazon understory. EGU General Assembly Conference Abstracts. 2022 May;

95. Lugli LF, Quesada CA. The effects of elevated CO_2 and phosphorus limitation shaping fine root functioning in Central Amazon forests. General Assembly Conference Abstracts. 2022 May;

96. Reichert T, Rammig A, Papastefanou P, Lugli LF, Darela Filho JP, Gregor K, et al. Modeling the carbon costs of plant phosphorus acquisition in Amazonian forests. Ecol Modell. 2023 Nov;485:110491.

97. Rius BF, Filho JPD, Fleischer K, Hofhansl F, Blanco CC, Rammig A, et al. Higher functional diversity improves modeling of Amazon forest carbon storage. Ecol Modell. 2023 Jul;481:110323.

98. ter Steege H, Pitman NCA, Sabatier D, Baraloto C, Salomão RP, Guevara JE, et al. Hyperdominance in the Amazonian Tree Flora. Science (1979). 2013 Oct 18;342(6156).

99. Araújo AC, Nobre AD, Kruijt B, Elbers JA, Dallarosa R, Stefani P, et al. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2002 Oct 27;107(D20).

100. Telles E de CC, de Camargo PB, Martinelli LA, Trumbore SE, da Costa ES, Santos J, et al. Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical forest soils of Amazonia. Global Biogeochem Cycles. 2003 Jun 2;17(2).

101. Doff sotta E, Meir P, Malhi Y, Donato nobre A, Hodnett M, Grace J. Soil CO_2 efflux in a tropical forest in the central Amazon. Glob Chang Biol. 2004 May 23;10(5):601–17.

102. Vieira S, de Camargo PB, Selhorst D, da Silva R, Hutyra L, Chambers JQ, et al. Forest structure and carbon dynamics in Amazonian tropical rain forests. Oecologia. 2004 Aug 17;140(3):468–79.

103. da Silva RP, dos Santos J, Tribuzy ES, Chambers JQ, Nakamura S, Higuchi N. Diameter increment and growth patterns for individual tree growing in Central Amazon, Brazil. For Ecol Manage. 2002 Aug;166(1–3):295–301.

104. Chambers JQ, Higuchi N, Teixeira LM, dos Santos J, Laurance SG, Trumbore SE. Response of tree biomass and wood litter to disturbance in a Central Amazon forest. Oecologia. 2004 Dec 7;141(4):596–611.

105. Chambers JQ, Negron-Juarez RI, Marra DM, Di Vittorio A, Tews J, Roberts D, et al. The steady-state mosaic of disturbance and succession across an old-growth Central Amazon forest landscape. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2013 Mar 5;110(10):3949–54.

106. Carswell FE, Meir P, Wandelli E V., Bonates LCM, Kruijt B, Barbosa EM, et al. Photosynthetic capacity in a central Amazonian rain forest. Tree Physiol. 2000 Feb 1;20(3):179–86.

107. Tomasella J, Hodnett MG, Cuartas LA, Nobre AD, Waterloo MJ, Oliveira SM. The water balance of an Amazonian micro-catchment: the effect of interannual variability of rainfall on hydrological behaviour. Hydrol Process. 2008 Jun 30;22(13):2133–47.

108. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de Vegetação do Brasil [Internet]. 1993 [cited 2024 Sep 3]. Available from: https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=66099

109. Quesada CA, Lloyd J, Schwarz M, Patiño S, Baker TR, Czimczik C, et al. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. Biogeosciences. 2010 May 17;7(5):1515–41.

110. Quesada CA, Lloyd J, Anderson LO, Fyllas NM, Schwarz M, Czimczik CI. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. Biogeosciences. 2011 Jun 1;8(6):1415–40.

111. Luizão RCC, Luizão FJ, Paiva RQ, Monteiro TF, Sousa LS, Kruijt B. Variation of carbon and nitrogen cycling processes along a topographic gradient in a central Amazonian forest. Glob Chang Biol. 2004 May 23;10(5):592–600.

112. Waterloo MJ, Oliveira SM, Drucker DP, Nobre AD, Cuartas LA, Hodnett MG, et al. Export of organic carbon in run-off from an Amazonian rainforest blackwater catchment. Hydrol Process. 2006 Aug 15;20(12):2581–97.

113. Higuchi N, Santos J dos, Sampaio P de TB, Marenco RA, Ferraz J, Sales PC, et al. Projeto Jacaranda, fase II: Pesquisas florestais na Amazônia Central. Coordenação de Pesquisas em Silvicultura Tropical, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. 2003;

114. Chambers JQ, Schimel JP, Nobre AD. Respiration from coarse wood litter in central Amazon forests. Biogeochemistry. 2001;52(2):115–31.

115. Vieira S, Trumbore S, Camargo PB, Selhorst D, Chambers JQ, Higuchi N, et al. Slow growth rates of Amazonian trees: Consequences for carbon cycling. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2005 Dec 20;102(51):18502–7.

116. Lewin KF, Hendrey GR, Kolber Z. Brookhaven national laboratory free-air carbon dioxide enrichment facility. CRC Crit Rev Plant Sci. 1992 Jan;11(2–3):135–41.

117. Lewin KF, Hendrey GR, Nagy J, LaMorte RL. Design and application of a free-air carbon dioxide enrichment facility. Agric For Meteorol. 1994 Sep;70(1–4):15–29.

118. Hendrey GR, Ellsworth DS, Lewin KF, Nagy JohN. A free-air enrichment system for exposing tall forest vegetation to elevated atmospheric CO_2. Glob Chang Biol. 1999 Mar 24;5(3):293–309.

119. Norby R, Kobayashi K, Kimball B. Rising CO_2 - future ecosystems. New Phytol. 2001 May;150(2):215–21.

120. Dickson RE, Lewin KF, Isebrands JG, Coleman MD, Heilman WE, Riemenschneider DE, et al. Forest atmosphere carbon transfer and storage (FACTS-II) the aspen Free-air CO_2 and O3 Enrichment (FACE) project: an overview. 2000.

121. Drake JE, Macdonald CA, Tjoelker MG, Crous KY, Gimeno TE, Singh BK, et al. Short-term carbon cycling responses of a mature eucalypt woodland to gradual stepwise enrichment of atmospheric CO_2 concentration. Glob Chang Biol. 2016 Jan 7;22(1):380–90.

122. Hart KM, Curioni G, Blaen P, Harper NJ, Miles P, Lewin KF, et al. Characteristics of free air carbon dioxide enrichment of a northern temperate mature forest. Glob Chang Biol. 2020 Feb 11;26(2):1023–37.

123. Hubau W, De Mil T, Van den Bulcke J, Phillips OL, Angoboy Ilondea B, Van Acker J, et al. The persistence of carbon in the African forest understory. Nat Plants. 2019 Jan 21;5(2):133–40.

124. Nunes MH, Camargo JLC, Vincent G, Calders K, Oliveira RS, Huete A, et al. Forest fragmentation impacts the seasonality of Amazonian evergreen canopies. Nat Commun. 2022 Feb 17;13(1):917.

125. Pereira I, Takeshi B, Guedes A, Souza C, Quesada CA, Lapola D. An open-top chamber system for exposing Amazon understory vegetation to elevated atmospheric CO_2. General Assembly Conference Abstracts. 2022 May;

126. Yu L, Ahrens B, Wutzler T, Schrumpf M, Zaehle S. Jena Soil Model (JSM v1.0; revision 1934): a microbial soil organic carbon model integrated with nitrogen and phosphorus processes. Geosci Model Dev. 2020 Feb 28;13(2):783–803.

127. Zhu D, Peng S, Ciais P, Zech R, Krinner G, Zimov S, et al. Simulating soil organic carbon in yedoma deposits during the Last Glacial Maximum in a land surface model. Geophys Res Lett. 2016 May 28;43(10):5133–42.

128. Ainsworth EA, Long SP. What have we learned from 15 years of free-air CO_2 enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO_2. New Phytologist. 2005 Feb 18;165(2):351–72.

129. AINSWORTH EA, ROGERS A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO_2]: mechanisms and environmental interactions. Plant Cell Environ. 2007 Mar 29;30(3):258–70.

130. Dusenge ME, Duarte AG, Way DA. Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO_2 and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. New Phytologist. 2019 Jan 8;221(1):32–49.

131. KATTGE J, KNORR W. Temperature acclimation in a biochemical model of photosynthesis: a reanalysis of data from 36 species. Plant Cell Environ. 2007 Sep 4;30(9):1176–90.

132. Leakey ADB, Ainsworth EA, Bernacchi CJ, Rogers A, Long SP, Ort DR. Elevated CO_2 effects on plant carbon, nitrogen, and water

relations: six important lessons from FACE. J Exp Bot. 2009 Jul;60(10):2859–76.

133. Smith NG, Dukes JS. Plant respiration and photosynthesis in global-scale models: incorporating acclimation to temperature and CO_2. Glob Chang Biol. 2013 Jan 7;19(1):45–63.

134. Baig S, Medlyn BE, Mercado LM, Zaehle S. Does the growth response of woody plants to elevated CO_2 increase with temperature? A model-oriented meta-analysis. Glob Chang Biol. 2015 Dec 22;21(12):4303–19.

135. Walker TW, Syers JK. The fate of phosphorus during pedogenesis. Geoderma. 1976 Jan;15(1):1–19.

136. Yu H, Chin M, Yuan T, Bian H, Remer LA, Prospero JM, et al. The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest: A first multiyear assessment based on data from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations. Geophys Res Lett. 2015 Mar 28;42(6):1984–91.

137. Jiang M, Crous KY, Carrillo Y, Macdonald CA, Anderson IC, Boer MM, et al. Microbial competition for phosphorus limits the CO_2 response of a mature forest. Nature. 2024 Jun 20;630(8017):660–5.

138. Turner TR, James EK, Poole PS. The plant microbiome. Genome Biol. 2013 Jun 25;14(6):209.

139. Ben Keane J, Hartley IP, Taylor CR, Leake JR, Hoosbeek MR, Miglietta F, et al. Grassland responses to elevated CO_2 determined by plant–microbe competition for phosphorus. Nat Geosci. 2023 Aug 10;16(8):704–9.

140. van der Sleen P, Groenendijk P, Vlam M, Anten NPR, Boom A, Bongers F, et al. No growth stimulation of tropical trees by 150 years of CO_2 fertilization but water-use efficiency increased. Nat Geosci. 2015 Jan 15;8(1):24–8.

141. Cowan IR, Farquhar GD. Stomatal function in relation to leaf metabolism and environment. Symp Soc Exp Biol. 1977;31:471–505.

142. Sperry JS, Love DM. What plant hydraulics can tell us about responses to climate-change droughts. New Phytologist. 2015 Jul 13;207(1):14–27.

143. Tor-ngern P, Oren R, Ward EJ, Palmroth S, McCarthy HR, Domec J. Increases in atmospheric CO_2 have little influence on transpiration of a temperate forest canopy. New Phytologist. 2015 Jan 27;205(2):518–25.

144. Rowland L, Ramírez-Valiente J, Hartley IP, Mencuccini M. How woody plants adjust above- and below-ground traits in response to sustained drought. New Phytologist. 2023 Aug 12;239(4):1173–89.

145. da Costa ACL, Rowland L, Oliveira RS, Oliveira AAR, Binks OJ, Salmon Y, et al. Stand dynamics modulate water cycling and mortality risk in droughted tropical forest. Glob Chang Biol. 2018 Jan;24(1):249–58.

146. ter Steege H, Pitman NCA, Killeen TJ, Laurance WF, Peres CA, Guevara JE, et al. Estimating the global conservation status of more than 15,000 Amazonian tree species. Sci Adv. 2015 Nov 6;1(10).

147. Crowther TW, van den Hoogen J, Wan J, Mayes MA, Keiser AD, Mo L, et al. The global soil community and its influence on biogeochemistry. Science (1979). 2019 Aug 23;365(6455).

148. Dirzo R, Young HS, Galetti M, Ceballos G, Isaac NJB, Collen B. Defaunation in the Anthropocene. Science (1979). 2014 Jul 25;345(6195):401–6.

149. Peguero G, Sardans J, Asensio D, Fernández-Martínez M, Gargallo-Garriga A, Grau O, et al. Nutrient scarcity strengthens soil fauna control over leaf litter decomposition in tropical rainforests. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 2019 Sep 11;286(1910):20191300.

150. Heleno RH, Ripple WJ, Traveset A. Scientists' warning on endangered food webs. Web Ecol. 2020 Apr 3;20(1):1–10.

151. Lloyd J, Farquhar GD. Effects of rising temperatures and [CO_2] on the physiology of tropical forest trees. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2008 May 27;363(1498):1811–7.

152. KATTGE J, DÍAZ S, LAVOREL S, PRENTICE IC, LEADLEY P, BÖNISCH G, et al. TRY – a global database of plant traits. Glob Chang Biol. 2011 Sep 21;17(9):2905–35.

153. Laurance WF, Oliveira AA, Laurance SG, Condit R, Nascimento HEM, Sanchez-Thorin AC, et al. Pervasive alteration of tree communities in undisturbed Amazonian forests. Nature. 2004 Mar;428(6979):171–5.

154. Esquivel-Muelbert A, Baker TR, Dexter KG, Lewis SL, Brienen RJW, Feldpausch TR, et al. Compositional response of Amazon forests to climate change. Glob Chang Biol. 2019 Jan 8;25(1):39–56.

155. GRANADOS J, KÖRNER C. In deep shade, elevated CO_2 increases the vigor of tropical climbing plants. Glob Chang Biol. 2002

Nov 30;8(11):1109–17.

156. Coviella CE, Trumble JT. Effects of Elevated Atmospheric Carbon Dioxide on Insect-Plant Interactions. Conservation Biology. 1999 Aug 24;13(4):700–12.

157. Tylianakis JM, Didham RK, Bascompte J, Wardle DA. Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. Ecol Lett. 2008 Dec 5;11(12):1351–63.

158. van Moorsel SJ, Thébault E, Radchuk V, Narwani A, Montoya JM, Dakos V, et al. Predicting effects of multiple interacting global change drivers across trophic levels. Glob Chang Biol. 2023 Mar 21;29(5):1223–38.

159. Chave J, Coomes D, Jansen S, Lewis SL, Swenson NG, Zanne AE. Towards a worldwide wood economics spectrum. Ecol Lett. 2009 Apr 10;12(4):351–66.

160. Menezes RSC, Sales AT, Primo DC, Albuquerque ERGM de, Jesus KN de, Pareyn FGC, et al. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. Geoderma. 2021 May;390:114943.

161. Moles AT. Being John Harper: Using evolutionary ideas to improve understanding of global patterns in plant traits. Journal of Ecology. 2018 Jan 13;106(1):1–18.

162. Venable DL. Size-Number Trade-Offs and the Variation of Seed Size with Plant Resource Status. Am Nat. 1992 Aug;140(2):287–304.

163. Carmona R, Muñoz R, Niell FX. Differential Nutrient Uptake by Saltmarsh Plants Is Modified by Increasing Salinity. Front Plant Sci. 2021 Jul 29;12.

164. Reichert T, Rammig A, Fuchslueger L, Lugli LF, Quesada CA, Fleischer K. Plant phosphorus-use and -acquisition strategies in Amazonia. New Phytologist. 2022 May 24;234(4):1126–43.

165. Weemstra M, Kiorapostolou N, van Ruijven J, Mommer L, de Vries J, Sterck F. The role of fine-root mass, specific root length and life span in tree performance: A whole-tree exploration. Funct Ecol. 2020 Mar 5;34(3):575–85.

166. Bittencourt PRL, Pereira L, Oliveira RS. On xylem hydraulic efficiencies, wood space-use and the safety–efficiency tradeoff. New Phytologist [Internet]. 2016 Sep 27;211(4):1152–5. Available from: https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.14044

167. MEDLYN BE, DUURSMA RA, EAMUS D, ELLSWORTH DS, PRENTICE IC, BARTON CVM, et al. Reconciling the optimal and empirical approaches to modelling stomatal conductance. Glob Chang Biol. 2011 Jun;17(6):2134–44.

168. Barros F de V., Bittencourt PRL, Brum M, Restrepo-Coupe N, Pereira L, Teodoro GS, et al. Hydraulic traits explain differential responses of Amazonian forests to the 2015 El Niño-induced drought. New Phytologist. 2019 Aug 21;223(3):1253–66.

169. Oliveira RS, Costa FRC, van Baalen E, de Jonge A, Bittencourt PR, Almanza Y, et al. Embolism resistance drives the distribution of Amazonian rainforest tree species along hydro-topographic gradients. New Phytologist. 2019 Feb 8;221(3):1457–65.

170. Aguirre-Gutiérrez J, Berenguer E, Oliveras Menor I, Bauman D, Corral-Rivas JJ, Nava-Miranda MG, et al. Functional susceptibility of tropical forests to climate change. Nat Ecol Evol. 2022 May 16;6(7):878–89.

171. Metcalfe DB, Asner GP, Martin RE, Silva Espejo JE, Huasco WH, Farfán Amézquita FF, et al. Herbivory makes major contributions to ecosystem carbon and nutrient cycling in tropical forests. Ecol Lett. 2014 Mar 26;17(3):324–32.

172. Mendes GM, Silveira FAO, Oliveira C, Dáttilo W, Guevara R, Ruiz-Guerra B, et al. How much leaf area do insects eat? A data set of insect herbivory sampled globally with a standardized protocol. Ecology. 2021 Apr 21;102(4).

173. Scheiter S, Langan L, Higgins SI. Next-generation dynamic global vegetation models: learning from community ecology. New Phytologist. 2013 May 15;198(3):957–69.

174. Joshi J, Stocker BD, Hofhansl F, Zhou S, Dieckmann U, Prentice IC. Towards a unified theory of plant photosynthesis and hydraulics. Nat Plants. 2022 Oct 27;8(11):1304–16.

175. Maréchaux I, Chave J. An individual-based forest model to jointly simulate carbon and tree diversity in Amazonia: description and applications. Ecol Monogr. 2017 Nov 29;87(4):632–64.

176. Fyllas NM, Gloor E, Mercado LM, Sitch S, Quesada CA, Domingues TF, et al. Analysing Amazonian forest productivity using a new individual and trait-based model (TFS v.1). Geosci Model Dev. 2014 Jul 3;7(4):1251–69.

177. Levine NM, Zhang K, Longo M, Baccini A, Phillips OL, Lewis SL, et al. Ecosystem heterogeneity determines the ecological resilience of the Amazon to climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2016 Jan 19;113(3):793–7.

178. Díaz S, Quétier F, Cáceres DM, Trainor SF, Pérez-Harguindeguy N, Bret-Harte MS, et al. Linking functional diversity and social actor strategies in a framework for interdisciplinary analysis of nature's benefits to society. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2011 Jan 18;108(3):895–902.

179. Potschin M, Haines-Young R, Fish R, Turner RK, editors. Routledge Handbook of Ecosystem Services. New York, NY : Routledge, 2016.: Routledge; 2016.

180. Jasanoff S, editor. States of Knowledge. Routledge; 2004.

181. Balvanera P, Brauman KA, Cord AF, Drakou EG, Geijzendorffer IR, Karp DS, et al. Essential ecosystem service variables for monitoring progress towards sustainability. Curr Opin Environ Sustain. 2022 Feb;54:101152.

182. Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones MW, Andrew RM, Bakker DCE, Hauck J, et al. Global Carbon Budget 2023. Earth Syst Sci Data. 2023 Dec 5;15(12):5301–69.

183. Andreae MO, Acevedo OC, Araùjo A, Artaxo P, Barbosa CGG, Barbosa HMJ, et al. The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols. Atmos Chem Phys. 2015 Sep 28;15(18):10723–76.

184. Langenbrunner B, Pritchard MS, Kooperman GJ, Randerson JT. Why Does Amazon Precipitation Decrease When Tropical Forests Respond to Increasing CO_2? Earths Future. 2019 Apr 26;7(4):450–68.

185. Rowland L, da Costa ACL, Oliveira RS, Bittencourt PRL, Giles AL, Coughlin I, et al. The response of carbon assimilation and storage to long-term drought in tropical trees is dependent on light availability. Funct Ecol. 2021 Jan 12;35(1):43–53.

186. Díaz S, Pascual U, Stenseke M, Martín-López B, Watson RT, Molnár Z, et al. Assessing nature's contributions to people. Science (1979). 2018 Jan 19;359(6373):270–2.

187 Sperry, J. S., Donnelly, J. R., & Tyree, M. T. (1988). A method for measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem. Plant, Cell & Environment, 11(1), 35-40. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1988.tb01774.x

188 M. R. Gale and D. F. Grigal. 1987. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. Canadian Journal of Forest Research. 17(8): 829-834. https://doi.org/10.1139/x87-131

18. Apêndice



Carbono			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 1.1.1	Assimilação líquida de C em [CO_2] prevalecente	Semestral (estação seca e chuvosa)	Medida em ponto-único, curvas de resposta de luz, curva de resposta de A-Ci.
Tarefa 1.1.4	Atividade fotossintética da planta (monitoramento GPP contínuo)	contínuo	Sistema de Fluorescência Solar Induzida (SIF)
Tarefa 1.1.4	Fluorescência foliar	semestral (estação seca e chuvosa)	Pulso de luz saturada em folha adaptadas ao escuro e ao claro.
Tarefa 1.2.4	Respiração foliar no escuro	semestral (estação seca e chuvosa)	Medição em ponto-único em folhas adaptadas para o escuro
Tarefa 1.2.2.	Produção Foliar	quinzenal	Folhas de coletor de serrapilheira
Tarefa 1.2.4	Efluxo de CO_2 em troncos e galhos	mensal	Efluxo de CO_2 através de câmaras de tronco instaladas em árvores com DAP > 20 cm, uso de analisador portátil de CO_2 gasoso
Tarefa 1.2.2, Task 4.2.1	Massa foliar seca por área (LMA)	mensal	Folhas de coletor de serrapilheira / metragem da área - secagem por forno - pesagem
Tarefa 1.2.3	Produtividade e turnover de raiz-fina	mensal	Medições com minirhizotron
Tarefa 1.2.4	Respiração de raízes	Uma vez a cada dois anos	Particionamento de fluxo de colar de respiração e respiração de raízes finas em raízes finas escavadas com cubetas
Tarefa 1.3.4	Efluxo de CO_2 no solo	mensal	Medições em câmara no solo, efluxo de CO_2 será separado em componentes autotróficos e heterotróficos usando colares de solo sem raiz
Tarefa 1.3.4	Compostos orgânicos voláteis do solo (VOCs)	Após um ano de eCO_2	Amostras de ar das câmaras do solo usando cartuchos absorventes
Tarefa 1.3.5	Frações de matéria orgânica do solo (SOM)	a cada 2 anos	Amostra (core) de solo – nos 30 cm superficiais, fracionamento do tamanho e densidade e análises elementais.
Tarefa 1.3.1	Velocidade do transporte de carbono	Durante período de testes pré tratamento	Amostras de $^{13}C – CO_2$ respirado, folhas, raízes, hifas micorrízicas, comunidades de rizosfera microbiana e exsudatos (Picarro and IRMS)

Carbono, Biodiversidade			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 1.1.1, Task 4.1.1	Parâmetros bioquímicos fotossintéticos (Vcmax, Jmax)	semestral (estação seca e chuvosa)	Curvas de resposta de assimilação de CO_2 sob saturação de luz (A-Ci)
Tarefa 1.1.1, Task 4.1.1	Parâmetros de curva de resposta a luz	anual	Curva de resposta a luz em [CO_2] prevalente
Tarefa 1.1.1, Task 4.1.1	Parâmetros de curva de resposta a temperatura	anual	Curva de resposta a temperatura em [CO_2] prevalente
Tarefa 1.1.1, Task 4.1.1	Carboidratos foliares	semestral (estação seca e chuvosa)	Amostras de folhas maduras de árvores onde houve medição de troca gasosa
Tarefa 1.2.2, Task 4.1.1	Área foliar	semestral (estação seca e chuvosa)	semestral (estação seca e chuvosa)
Tarefa 4.1.1	Compostos orgânicos voláteis de folhas verdes (VOCs)	anual	Amostras de ar de câmaras de folha de LiCor usando cartuchos absorventes
Tarefa 1.2.2, Tarefa 4.4.1, Tarefa 4.2.1, Tarefa 4.4.3	Longevidade foliar	mensal	Monitoramento demográfico no nível foliar
Tarefa 1.2.2, Tarefa 4.4.1, Tarefa 4.2.1, Tarefa 4.4.3	Índice de área foliar (LAI)	mensal	fotografia hemisférica
Tarefa 1.2.1, Tarefa 4.2.1, Tarefa 4.2.2	Produção de tronco em árvores com DAP < 5 cm	anual	Diâmetro de árvores com DAP > 5 cm em árvores dos subplots de 1.5 X 1.5 m por plot.

Carbono, Nutrientes, Biodiversidade			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 1.1.1, Tarefa 2.1.1, Tarefa 4.1.1	Nutrientes em folhas verdes e isótopos	semestral (estação seca e chuvosa)	Amostras de folhas maduras de árvores com medição de trocas gasosas e amostrar adicionais de folhas de diferentes idades.
Tarefa 1.3.2, Tarefa 2.2.2, Tarefa 4.3.2	Biomassa microbiana e nutrientes de solo	semestral (estação seca e chuvosa)	Amostra (core) de solo - nos 30 cm superficiais, CFE e C e análise de nutrientes de amostras aquosas.
Tarefa 1.3.2, Tarefa 2.2.2, Tarefa 2.3.1, Tarefa 2.3.2, Tarefa 4.3.1	Composição de comunidade de invertebrados	semestral (estação seca e chuvosa)	Estoque de serrapilheira, busca ativa manual, armadilha de barreira (5 - 7 dias por estação)

Carbono, Nutrientes			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 1.2.3, Tarefa 2.1.2	Produção de raízes finas	semestral (estação seca e chuvosa)	Núcleo de crescimento interno
Tarefa 1.2.3	Estoque de biomassa de raiz	anual	Raízes em núcleo de solo
Tarefa 1.3.2	Exsudatos de raiz	A cada 2 anos	Amostras de ≈ 5 árvores por plot. Identificação de composto de classe.
Tarefa 1.3.2	Colonização micorrízica em raiz	semestral (estação seca e chuvosa)	Núcleo de crescimento interno, coloração e microscopia
Tarefa 1.3.2, Task 2.2.2	Biomassa de hifas micorrízicas	A cada 2 anos	Núcleo de crescimento interno, amostras de solo. Biomarcadores lipídicos.
Tarefa 1.2.2, Tarefa 2.3.1	Massa de serrapilheira no solo	semestral (estação seca e chuvosa)	Massa total do estoque de serapilheira
Tarefa 1.2.2, Tarefa 2.2.1	Estoque de nutrientes na serrapilheira	semestral (estação seca e chuvosa)	Estoque de nutrientes em serrapilheira de solo com múltiplas análises laboratoriais incluindo análises elementais, UV/vis espectrometria e AAS.
Tarefa 1.2.3, Tarefa 2.3.2	Estoque de colonização de raiz de serrapilheira	semestral (estação seca e chuvosa)	Estoque de serrapilheira de solo, medição de biomassa de raiz em subamostras
Tarefa 1.3.3, Tarefa 2.3.2	Decomposição de Serrapilheira	Montagem no terceiro ano	Experimento de decomposição de serrapilheira – recoleta sequencial da respectiva serrapilheira colocada em bolsas de tela na superfície do solo (vestígios de folhas e madeira) ou no solo (serrapilheira radicular).
Tarefa 1.3.5, Tarefa 2.2.1	Pool de N e P orgânico e mineral de solo	semestral (estação seca e chuvosa)	Amostra (core) de solo - nos 30 cm superficiais, análises laboratoriais múltiplas incluindo análise elementar, UV/vis espectrometria e AAS
Tarefa 1.3.2, Tarefa 2.2.2, Tarefa 2.2.3	Parâmetros fisiológicos microbianos do solo	anual	Amostra (core) de solo para incubações laboratoriais de pequena escala – taxa do nível de crescimento de comunidades fúngicas e bacterianas, taxas de respiração e turnover.
Tarefa 1.3.2, Tarefa 2.2.3	Enzimas de solo	semestral (estação seca e chuvosa)	Amostra (core) de solo - nos 30 cm superficiais, analisado usando artigos de estequiometria de enzimas extracelulares (artigos de atividade de potencial fluorométrico, focando em compostos que contenham C, N e P)
Tarefa 1.3.5, Tarefa 2.2.1	Densidade do solo (Bulk density)	A cada 2 ou 3 anos	Amostras (core) de solo

Nutrientes			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 2.1.1	Nutrientes e isótopos (C,N) em tronco	Uma vez depois de 2 anos de eCO_2	Amostra de tronco de 5 a 10 árvores por plot. Múltiplas análises laboratoriais incluindo IRMS e análises elementais, UV/vis espectrometria e AAS
Tarefa 2.3.1	Conteúdo e isótopos (C, N) de nutrientes na serrapilheira	semestral (estação seca e úmida; amostras compostas por coletas quinzenais)	Coletor de serrapilheira, análises laboratoriais múltiplas.
Tarefa 2.1.2	Morfologia de raiz	semestral (estação seca e chuvosa)	Núcleo de crescimento interno e raízes no núcleo de solos. Scanner de raiz.
Tarefa 2.1.2	Nutrientes e isótopos de raíz	semestral (estação seca e chuvosa)	Núcleo de crescimento interno, raízes em núcleo de solo. Múltiplas análises laboratoriais incluindo IRMS e análises elemental, UV/vis espectrometria e AAS.
Tarefa 2.1.2	Fosfatase na raiz	semestral (estação seca e chuvosa)	Núcleo de crescimento interno. Ensaios de potencial de fluorometria em enzimas.
Tarefa 2.2.1	Disponibilidade de nutrientes no solo	semestral (estação seca e chuvosa)	Amostra (core) de solo - nos 30 cm superficiais, análises laboratoriais múltiplas incluindo UV/vis espectrometria e AAS
Tarefa 2.4.1	Deposição de nutrientes	mensal	Taxas de deposição chuvosa e precipitação sob dossel – funis instalados acima e abaixo do dossel das árvores para coletar precipitação. Deposição seca - método de acumulação de superfície, análise laboratorial.

Carbono, Biodiversidade, Socioambiental			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 1.2.1, Tarefa 4.2.1, Tarefa 4.2.2, Tarefa 5.1.1	Produção de tronco em árvores com DAP > 5 cm	anual	Diâmetro de árvores com DAP > 5 cm, dendrômetros automáticos, escaneamento de laser terrestre (TLS)
Tarefa 1.2.2, Tarefa 4.1.1, Tarefa 5.1.1	Massa de folhas verdes secas por área (LMA)/ Área foliar específica (SLA)	semestral (estação seca e chuvosa)	Amostras de folhas maduras de árvores onde houve medição de troca gasosa/ metragem da área - secagem por forno - pesagem
Tarefa 1.2.1, Tarefa 4.2.1, Tarefa 4.2.2, Tarefa 5.1.1	Produção de tronco em árvores com DAP > 20 cm	mensal	Diâmetro de árvores com DAP > 20 cm, dendrômetros automáticos, escaneamento de laser terrestre (TLS)
Tarefa 1.2.1, Tarefa 4.2.1, Tarefa 4.2.2, Tarefa 5.1.1	Mortalidade de árvores	anual	Inventário de árvores com DAP > 5 cm
Tarefa 1.2.1, Tarefa 4.2.4, Tarefa 5.1.1	Biomassa de liana	anual	Diâmetro de todas as lianas com DAP > 5 cm

Biodiversidade			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 4.1.1, Tarefa 4.2.1	Espessura de folha	semestral (estação seca e chuvosa)	Micrômetro
Tarefa 4.1.1	Índice de teor de clorofila	semestral (estação seca e chuvosa)	Metro de teor de clorofila
Tarefa 4.2.4	Índice de área foliar de liana (LAI)	anual	Fotos de drone
Tarefa 4.4.1, Tarefa 4.2.4	Valor de Huber de liana	anual	Análise de amostra de madeira

Água, Biodiversidade			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 1.1.1, Tarefa 3.1.1, Tarefa 4.1.1	eficiência de uso de água	semestral (estação seca e chuvosa)	Medida em ponto-único, curva de resposta à luz, curva de resposta a A-Ci, curva de resposta do déficit de pressão de vapor folha-ar (VPD).
Tarefa 3.4.1, Tarefa 4.1.1	Potencial de água foliar	semestral (estação seca e chuvosa)	Câmara de pressão
Tarefa 4.1.1	Anatomia estomática	uma vez após dois anos de eCO_2	Amostras de folhas maduras - preparação de lâmina histológica para medição de tamanho e densidade estomática
Tarefa 4.1.1	Densidade de veias foliares	uma vez após dois anos de eCO_2	Amostras de folhas maduras - preparação de lâmina histológica para medição de densidade de veia foliar
Tarefa 3.4.2, Tarefa 4.4.1, Tarefa 4.2.1	P50 e margem de segurança hidráulica	Uma vez após 2 anos de eCO_2	Curva de vulnerabilidade em galhos de ≈ 1 - 2 m de comprimento

Água			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 3.2.1, Tarefa 4.4.1, Tarefa 4.2.1	Fluxo de seiva de xilema	Contínuo	Sensor de fluxo de seiva instalado em 12 árvores com DAP > 20 cm por plot
Tarefa 3.4.3, Tarefa 4.4.1	Condutividade hidráulica máxima (Ksmax)	Uma vez após 1 ano de eCO_2	Método Sperry et al. (1988) em pequenos galhos de ≈ 3 - 5 cm de comprimento
Tarefa 3.3.1	Umidade e temperatura de solo	Contínuo	Perfil de umidade, condutividade elétrica e temperatura de solo em nove profundidades (5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75, e 100 cm)
Tarefa 3.3.2	Potencial hídrico do solo	única	Curva de retenção de água de solo

Nutrientes, Biodiversidade			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 2.1.2, Tarefa 4.1.1., Tarefa 4.2.1	Identificação de fungos micorrízicos	semestral (estação seca e chuvosa)	Núcleo de crescimento interno. Genômicas
Tarefa 2.1.2, Tarefa 4.1.1., Tarefa 4.2.1	Identidade de raiz de planta	única	Barcoding de raiz em amostra (core) de solo
Tarefa 2.2.2, 4.3.2	Composição de comunidade microbiana de solo	semestral (estação seca e chuvosa)	Núcleo de solo, genômica

Biodiversidade, Socioambiental			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 4.2.3, Tarefa 5.1.1	Inventário de palmeiras e epífitas	anual	Inventário de palmeiras e epífitas nos plots
Tarefa 5.1.1, Tarefa 4.2.1, Tarefa 4.2.2, Tarefa 4.2.3	Taxa de recrutamento	anual	Árvores de subplots de 1.5 x 1.5 m por plot

Biodiversidade, Nutrientes, Socioambiental			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 1.2.2, Tarefa 2.1.1, Tarefa 5.1.1	Produção e morfologia de frutas e sementes	quinzenal	Semestres e frutas de coletores de serrapilheira

Carbono, Água, Biodiversidade			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 1.1.1, Tarefa 3.1.1, Tarefa 4.1.1	Condutância estomática em [CO_2] prevalecente.	semestral (estação seca e chuvosa)	Medida ponto-único, curvas de resposta de luz, curva de resposta de A-Ci, curva de respostas de déficit de pressão de vapor de água folha-para-ar (VPD), medição por porômetro

Carbono, Água			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 1.1.2	Temperatura de folha e de dossel	contínuo	Radiômetros infravermelho na torre central

Carbono, Nutrientes, Socioambiental			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 1.2.1, Tarefa 2.1.1, Tarefa 4.2.1, Tarefa 4.2.2, Tarefa 5.1.1	Altura de árvores	semestral	Medida de fita métrica, laser escaner terrestre (TLS)

Carbono, Nutrientes, Biodiversidade, Socioambiental			
Número(s) da(s) tarefa(s)	**Medida**	**Frequência**	**Amostras necessárias e métodos de medição**
Tarefa 1.2.2, Tarefa 2.1.1, Tarefa 4.1.1, Tarefa 4.4.3, Tarefa 5.1.1	Fenologia das plantas	mensal	Monitoramento de demografia ao nível foliar

AMAZONFACE

ACESSE NOSSO SITE:

/amazonface /amazonfaceoficial /amazonface

Scientific coordinations:

Funding:

A Scientific programe: