



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

SIMONE NAZARÉ RODRIGUES DA SILVA

IMPACTO DAS QUEIMADAS EM ÁREA DE FLORESTA NO SUL DA
AMAZÔNIA: UMA REFLEXÃO ENSAÍSTICA SOBRE A
PRECIFICAÇÃO DE CARBONO

BELÉM-PA
OUTUBRO/2023

SIMONE NAZARÉ RODRIGUES DA SILVA

IMPACTO DAS QUEIMADAS EM ÁREA DE FLORESTA NO SUL DA
AMAZÔNIA: UMA REFLEXÃO ENSAÍSTICA SOBRE A
PRECIFICAÇÃO DE CARBONO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária e Museu Paraense Emílio Goeldi, como parte das exigências para a obtenção de grau Doutora em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia

Linha de pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Socioambientais

Orientadora: Maria Isabel Vitorino
Universidade Federal do Pará

BELÉM-PA
OUTUBRO/2023

SIMONE NAZARÉ RODRIGUES DA SILVA


IMPACTO DAS QUEIMADAS EM ÁREA DE FLORESTA NO SUL DA
AMAZÔNIA: UMA REFLEXÃO ENSAÍSTICA SOBRE A
PRECIFICAÇÃO DE CARBONO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária e Museu Paraense Emílio Goeldi, como parte das exigências para a obtenção de grau Doutora em Ciências Ambientais.

Data de aprovação: 16/10/2023

Conceito: Excelente

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 MARIA ISABEL VITORINO
Data: 05/03/2024 14:12:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Maria Isabel Vitorino - Orientadora

Doutora em Meteorologia

Universidade Federal do Pará

Cleo Quaresma Dias

Junior: 72952229287

Assinado de forma digital por Cleo Quaresma


Dias Junior: 72952229287

Dados: 2024.03.05 13:57:12 -0300'

Prof. Cleo Quaresma Dias Junior - Avaliador Interno

Doutor em Clima e Ambiente


Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Documento assinado digitalmente
 NIRVIA RAVENA DE SOUSA
Data: 05/03/2024 21:01:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Nirvea Ravena - Avaliadora Externa

Doutora em Ciências Políticas

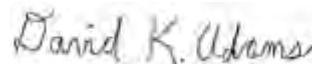
Universidade Federal do Pará

Documento assinado digitalmente
 MARCIA APARECIDA DA SILVA PIMENTEL
Data: 05/03/2024 15:03:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marcia Aparecida Pimentel da Silva

Doutora em Geografia

Universidade Federal do Pará



Prof. David Kenton Adams - Avaliador Interno

Doutor em Ciências Atmosféricas

Universidad Autónoma de México

À Mãe Terra e as pessoas que perderam a
vida de forma violenta, defendendo a
Amazônia e os povos indígenas, dedico.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof. Dr.^a Isabel Vitorino, que nos inspira com fé, sabedoria e força, transformando a vida de muitos alunos. Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais com competência coopera para o desenvolvimento da ciência do país. À banca examinadora da 1^a e 2^a qualificação, aos Professores(as), Márcia Pimentel, Ima Veira, Mário Jardim, Cleo Quaresma, David Adams, Demerval Moreira e Rafael Palácios, pelas contribuições valiosas. À banca avaliadora desta tese, Dra. Márcia Pimentel, Dra. Nírvia Ravena, Dr. Cléo Quaresma e Dr. David Adams que contribuíram cientificamente com este documento. Aos meus colegas de pós-graduação (doutorado 2019) que trabalharam para finalizarem suas pesquisas. À toda a minha família e amigos que torcem e entendem que esta pesquisa é muito importante para o nosso povo amazônida.

Aos meus filhos Vinícius e Fernanda que presenciam a vários anos a trajetória acadêmica de uma mãe que luta por ideais social e científico. Quero agradecê-los aqui pela compreensão dos inúmeros 'nãos' para curtir momentos de lazer em família, ao longo desta pesquisa. Meus filhos, vocês estarão em mim sempre, mesmo quando já não estiver mais aqui nesta forma materializada. À minha doce e valiosa companhia, Glauber Cirino, com o dom de sempre acreditar no melhor que cada um tem, fonte pura de amor e muita alegria em minha vida. Obrigada pela dedicação e ajudas com a pesada e poderosa programação de rotinas MATLAB e pela sabedoria usada para me incentivar nos momentos difíceis de inquietações, limitações técnicas e emocionais. Esse incentivo jamais será esquecido! Obrigada meu amor!

Aos grandes e atuais pensadores que deixam registros eternos: histórico, político, social, filosófico e cultural. Sem eles, não seria possível atingir o grande exercício do ato de se fazer pesquisas interdisciplinares. Uma messe desafiadora que deixa em mim enorme satisfação em poder servir as sociedades com esta pesquisa e de alguma forma fortalecer o entendimento e a defesa dos ambientes naturais, da Amazônia e do mundo. Sigo honrada e enriquecida.

Meus sinceros agradecimentos ao sistema público de ensino que proporciona acesso à Educação para os brasileiros na esfera municipal, estadual e federal. Através deste sistema, estou aqui hoje. Agradecimentos especiais à CAPES, pela bolsa de estudos, sem a qual não seria possível desenvolver esta pesquisa. Agradeço à Fundação Nacional de Ciência e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), bem como à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT), Universidade Estadual da Califórnia, San Marcos (CSUSM), Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), pelo apoio financeiro concedido aos projetos técnicos que custearam as manutenções do sítio experimental do estudo. Ao financiamento adicional fornecido pelo CNPq/Universal e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Pará (FAPESPA), processos 422894/2021-4 e 2022/45107. À PROPESP/UFPA, pelos apoios financeiros aos discentes. Agradecimentos especiais à DS Bridges da Dimensions Sciences - Força Tarefa Amazônia, por disponibilizar apoio social e financeiro à pesquisa de inúmeros estudantes em situação de vulnerabilidade.

Agradecimento especialíssimo ao saudoso Professor Dr. José de Souza Nogueira (*in memoriam*) que trabalhou com muita dedicação junto com outros colaboradores para gerar e obter os dados micrometeorológicos da torre de medição utilizada nesta pesquisa. Ao Prof. George L. Vourlitis, pela incondicional contribuição científica e parceria. A todos que contribuíram direta e indiretamente com esta pesquisa. Se esqueci de alguém, perdoem-me.

“A floresta está viva. Só vai morrer se os brancos insistirem em destruí-la. Se conseguirem, os rios vão desaparecer debaixo da terra, o chão vai se desfazer, as árvores vão murchar e as pedras vão rachar no calor. A terra ressecada ficará vazia e silenciosa...Então morreremos, um atrás do outro, tanto os brancos quanto nós. Todos os xamãs vão acabar morrendo. Quando não houver mais nenhum deles vivo para sustentar o céu, ele vai desabar” (Davi Kopenawa, Xamã e porta-voz dos Yanomami).

RESUMO

Florestas tropicais são importantes reguladoras climáticas globais. Elas estocam quantidades notáveis de carbono em sua biomassa viva e mantêm uma delicada relação biosfera-atmosfera. A ciclagem de carbono na Amazônia tem sido muito estudada devido às alterações promovidas nas concentrações de CO₂ num nível global, no solo, na água e principalmente na atmosfera. Esta pesquisa visa contribuir identificando perturbações de ordem antrópica (queima de biomassa florestal) e suas influências na troca líquida de CO₂ em área de floresta semidecídua, localizada no sul da bacia Amazônica. Medidas micrometeorológicas em situ, localizadas a 50 km NE de Sinop-MT, foram utilizadas para estimar o potencial de absorção de CO₂ sob condições poluídas (AOD \gg 0.10) e não poluídas (AOD \leq 0.10). Limitações, incertezas, fragilidades e ótimos fisiológicos determinados e usados como subsídios-chave para abordagens concernentes à precificação de carbono no Brasil. Dados remotos orbitais pelo sensor MODIS (AOD_m) e à superfície pelo sistema AERONET 2.0 (AOD_a) são usados para uma visão regional dos impactos das queimadas sobre o fluxo de radiação solar. Uma longa série de medidas AOD_a, entre 1999-2017, é usada na determinação de um modelo de irradiância solar de céu-claro. Reduções e aumentos no %NEE para determinadas cargas de poluição (AOD), irradiância relativa f e ângulo solar zenital (SZA) foram observados. Os resultados mostraram uma diminuição de 40 % em f consistente com expressivo aumento das cargas de poluição (AOD_a) de 0,10 para 5,0 à 500 nm. Foi observado também um aumento médio de 35-70 % no fluxo NEE para níveis de poluição AOD_a acima de 1,25. Este resultado foi atribuído ao aumento de 40-60 % na fração difusa da radiação solar ($PAR(D)_f$) em relação à fração direta (SW_i), devido ao impacto dos Aerossóis Orgânicos emitidos durante a queima de biomassa (BBOA). Foi observado também redução e aumento estatisticamente significativo sobre variáveis biofísicas, tais como temperatura do dossel foliar (LC_T) e Déficit de Pressão do Vapor (VPD), respectivamente. Um aumento médio de ~ 3.0 °C e redução de 10-15 % na LC_T e T_{air} foi encontrado sob condições de céu densamente esfumado (AOD_a \gg 0.10). Estes resultados são úteis na obtenção de novos coeficientes de calibração e novas parametrizações físicas de processos pobremente representados nos sistemas numéricos vigentes, como as respostas fotossintéticas de florestas semidecíduais à ciclagem de carbono regional na Amazônia. Estes achados, norteiam também políticas públicas de preservação do ecótono Cerrado-Floresta Amazônica e outros ecossistemas pantropicais. Um texto ensaístico foi elaborado para destacar as fragilidades e inviabilidades de ações políticas destinadas à precificação do carbono e serviços ecossistêmicos, como o sequestro de CO₂. Para tal, analisa-se a lei 2.187/2009 (Política Nacional de Mudança do Clima) e o projeto de lei PL-528A/2021 (Regulação do Mercado Brasileiro de Redução de Emissões). Como resultado, refutam-se as leis supracitadas e discutem-se suas inviabilidades, apontando soluções factíveis para novas formas de exploração, na contramão desta lógica mercantil que negligencia as peculiaridades e resiliências dos ecossistemas Amazônicos. Tudo isso apoiada na ideia de exploração dos recursos naturais como meio único para o desenvolvimento e progresso econômico, ocultando assim a atual e crise ecológica em que vivemos.

Palavras-chave: Incêndios-Florestais. Floresta-Semidecídua. Ciclagem-Carbono. Ensaio. Mercado-Carbono.

ABSTRACT

Tropical forests are important global climate regulators. They store notable amounts of carbon in their living biomass and maintain a delicate biosphere-atmosphere relationship. Exogenous and endogenous factors need to be in perfect harmony for this relationship to work properly. Carbon cycling in the Amazon has been extensively studied due to changes in CO₂ concentrations globally, in soil, water, and mainly in the atmosphere. This research aims to contribute by identifying anthropogenic disturbances (burning of forest biomass) and their influence on the net exchange of CO₂ in a semi-deciduous forest area south of the Amazon basin. In situ micrometeorological measurements, located 50 km NE of Sinop-MT, are used to estimate the CO₂ absorption potential under polluted (AOD \gg 0.10) and unpolluted (AOD \leq 0.10). Limitations, uncertainties, weaknesses, and physiological optima are determined and used as key subsidies for approaches concerning carbon pricing in Brazil. Remote orbital data from the MODIS sensor (AOD_m) and surface data from the AERONET 2.0 system (AOD_a) given a regional view of the impacts of the fires on the flow of solar radiation. We have used a long series of AOD_a measurements between 1997 and 2017 in determining a clear-sky solar irradiance model. Here, we've observed reductions and increases in %*NEE* for given pollution loads (AOD), relative irradiance *f*, and solar zenith angle (*SZA*). The results show a 40 % in *f* consistent with a significant increase in pollution loads (AOD_a) from 0.10 to 5.0 nos at 500 nm. We also observed an average increase of 35-70 % in *NEE* flux for AOD_a pollution levels above 1.25. We've attributed these increases to the increase of 40-60 % in the diffuse fraction of solar radiation (*PAR(D)_f*) about the direct fraction (*SW_i*) due to the impact of Aerosols Organic emitted during biomass burning (BBOA). A statistically significant reduction and increase in biophysical variables was also observed, such as leaf canopy temperature (*LC_T*) and Vapor Pressure Deficit (*VPD*), respectively. An average increase of \sim 3.0 °C and 10-15 % reduction in *LC_T* and *T_{air}* was found under densely smoky sky conditions (AOD_a \gg 0.10). These results are useful in obtaining new calibration coefficients and new physical parameterizations of processes poorly represented in current numerical systems, such as the photosynthetic responses of semi-deciduous forests to regional carbon cycling in the Amazon. These findings also guide public policies for preserving the Cerrado-Amazon Forest ecotone and other pantropical ecosystems. We have prepared an essay highlighting the weaknesses and unfeasibility of political actions aimed at pricing carbon and ecosystem services, such as the sequestration of CO₂. To this end, law 2,187/2009 (National Climate Change Policy) and PL-528A/2021 (Regulation of the Brazilian Emissions Reduction Market) are analyzed. As a result, it indicates the failures of the law above and refutation. It discusses unfeasibility, pointing out feasible solutions for new forms of exploitation, contrary to this mercantile logic that neglects the peculiarities and resilience of Amazonian ecosystems, supported by the idea of exploiting natural resources as a means unique for economic development and progress, thus hiding the current ecological crisis in which we live.

Keywords: Wildfires. Semideciduous-Forest. Carbon-Cycle. Essays. Carbon-Pricing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 – (a) mostra a distribuição regional média de AOD em 550 nm extraído das plataformas Terra(Aqua) - MOD(MYD)04-3K entre 2000-2020 na área estudada; (b) mapa da América do Sul, destacando os limites políticos da região estudada (magenta); (c) mapa de localização da torre micrometeorológica no município de Cláudia, 50 km a nordeste de Sinop, Mato Grosso (ponto branco). As mudanças no uso e cobertura da terra também são mostradas por TerraBrasilis. 27
- Figura 2.2 – Irradiância solar incidente sob diferentes condições de céu em Alta Floresta (junho de 1997 a março de 2017): céu limpo (pontos C1 e curva C2, $AOD \leq 0,10$), céu poluído (pontos C3 e curva C4, $1,25 \leq AOD \leq 1,50$ pontos C5 e curva C6, $AOD > 1,50$). 31
- Figura 2.3 – Mostra as alterações mensais do NEE como uma função sza para condições de céu limpo ($f \approx 1,0$) das 07 às 17h (LT), entre junho de 2005 e julho de 2008. Os coeficientes das curvas ajustadas $NEE_0(sza)$ foram listados na Tabela H.2. A linha pontilhada preta é a curva média anual $NEE_0(sza)$ 35
- Figura 2.4 – NEE ciclo horário médio entre junho/2005 e julho/2008, durante as estações chuvosa (a) e seca (b) para a floresta semidecídua do município de Cláudia. Nenhum filtro é aplicado. O NEE é apresentado para quaisquer condições de céu durante o ano. Foi utilizado o box plot para representar a distribuição dos dados de fluxo de CO_2 . As barras verticais são os valores máximo e mínimo. Os limites inferior e superior das caixas representam, respectivamente, os percentis 25 e 75, enquanto as linhas horizontais azuis e vermelhas representam a mediana dos dados de fluxo de CO_2 37
- Figura 2.5 – Correlação 3D entre f e $PAR(D)_F$ com aumento de AOD_a para diferentes valores SZA (a) e irradiância f (b) em floresta semidecídua na região de Cláudia, município a 50 km a nordeste de Sinop-MT (2005-2008). As médias são apresentadas como pontos agrupados (bin), quantificados e determinados em termos de desvio padrão (STD) para cada bin mostrado em Tabela 2.3. 39
- Figura 2.6 – Correlação 3D entre f , PAR_i (a) e $PAR(D)$ (b) para diferentes valores SZA . As linhas azul, preta, magenta e vermelha são as curvas polinomiais ajustadas às faixas de variação analisadas do SZA , respectivamente iguais a $0-20^\circ$, $20-40^\circ$, $40-60^\circ$ e $0-60^\circ$, em floresta semidecídua no Município de Cláudia, 50 km a nordeste de Sinop-MT (2005-2008). 40
- Figura 2.7 – NEE em função da radiação, PAR_i para medições entre 08h e 17h LT (a). Na imagem (b) LUE é uma função da fração $PAR(D)_F$ ($R^2 = 0,21$, o valor de $p < 0,001$) para uma área de floresta semidecídua localizada no município de Cláudia-MT, 50 km ao norte de Sinop, entre junho de 2005 a julho de 2008. As linhas laranja e preta denotam, respectivamente, observações $PAR(D)_F \geq 0,60$ e observações $f \approx 1,0$ (condições de céu claro). As linhas verticais laranja e preta indicam os mínimos globais das curvas polinomiais. 43

Figura 2.8 – (a) Variabilidade do NEE com f para vários intervalos de SZA . O $\%NEE$ em função da irradiância f para os mesmos intervalos SZA é mostrado em (b). O NEE é calculado a partir da Equação (2.11), corrigido com o $NEE_0(sza)$ calculado a partir das curvas de ajuste apresentadas na Tabela H.2. Esses gráficos incluem os efeitos dos aerossóis na área experimental de Cláudia-MT, entre 2005-2008	46
Figura 2.9 – Mudanças sazonais nas impressões digitais calculadas pelo sistema REddyProc em $\mu\text{mol m}^2\text{s}^{-1}$ durante os anos 2005-2008: (a) NEE ; (b) GPP ; and (c) R_{eco} Diurno. O eixo-x mostra a hora (24h), UTC -4.	47
Figura 2.10 – Correlação entre a irradiância relativa f com LC_T (a), T_{air} (b) e VPD (c), valores calculados para SZA entre 0 e 60. A temperatura do ar foi medida a 42 m do solo, na torre micrometeorológica localizada no município de Cláudia, a 50 km de Sinop-MT, utilizando a parametrização dada em (Tribuzy, 2005), entre 2003-2004.	50
Figura A.1 – (a) Série histórica do desmatamento raso na Amazônia Legal (1988-2021). Dados originados do projeto PRODES. Os dados foram coletados no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), ver link Tabela I.3.	87
Figura A.2 – (a) Série histórica de queimadas na Amazônia Legal entre 1998 e 2022. Dados originados do projeto PRODES (link na Tabela S5). (b) Longa série temporal de AOD (500 nm) para a Amazônia Legal (1999-2017). Medições remotas de superfície, gerenciadas pela rede AERONET/NASA (Tabela I.3).	87
Figura B.1 – (a) Boxplot do ciclo médio mensal de queimadas na Amazônia Legal (1998-2022), destacando recorrentes picos de incêndios entre agosto e novembro. (b) Boxplot do ciclo médio mensal de AOD a 500 nm, modulado pelas queimadas regionais na Amazônia (Tabela I.3).	88
Figura B.2 – Comportamento espacial da profundidade óptica de aerossóis (AOD) sobre o Estado de Mato Grosso (área intensa do arco de desmatamento). Na imagem acima está o comportamento do AOD durante a estação chuvosa (fevereiro a abril) para o período de dados de 2000 a 2020, obtido dos satélites AQUA e TERRA (Tabela I.3).	88
Figura C.1 – Mostra os focos de incêndio acumulados na Amazônia durante meses não-secos entre janeiro e junho (2005-2008): (b) 2005; (c) 2006; (d) 2007; (e) 2008. Satélite de Referência: MODIS, composição - Aqua + Terra. As cores representam anomalias térmicas dos incêndios florestais, na resolução de 1 km. Dados vetoriais (FIRMS V0061 NRT).	89
Figura C.2 – Mostra os focos de incêndio acumulados na Amazônia durante meses não-secos entre janeiro e junho (2005-2008): (b) 2005; (c) 2006; (d) 2007; (e) 2008. Satélite de Referência: MODIS, composição - Aqua + Terra. As cores representam anomalias térmicas dos incêndios florestais, na resolução de 1 km. Dados vetoriais (FIRMS V0061 NRT).	89
Figura D.1 – Comportamento médio horário mensal dos valores de radiação solar incidente medidos pelo piranômetro do sistema AERONET, em Alta Floresta-MT (1999-2017). O domínio das curvas utilizadas estão entre 07h e 17h (LT), ajustes polinomiais entre julho/2005 a junho/2008. Estimativas antes das 07h (LT) e após as 17h (LT) foram excluídas da base de dados.	90

Figura D.2–Mostra alterações do ciclo horário no $NEE_0(sza)$. Ajuste das curvas sob condições de céu claro ($f \sim 1.0$) para cada mês do ano entre jul/2005-jun/2008, 07-17h (LT).	90
Figura E.1 –Mostra (a) o ciclo horário da LC_{Ts} ; (b) ciclo horário da temperatura do ar; e (c) diferença encontrada entre LC_{Ts} e T_{air} , em ($^{\circ}C$).	91
Figura E.2 –Mostra (a) o ciclo horário da LC_{Ts} ; (b) ciclo horário da temperatura do ar; e (c) diferença encontrada entre LC_T e T_{air} , em ($^{\circ}C$).	91
Figura G.1 –Variabilidade do NEE para diversas faixas de SZA (graus) durante todo o ano (jan-dez/2005-2008), em Cláudia, Mato Grosso: 0-20 (ciano), 20-40 (preto), 40-60 (magenta) e 0-60 (vermelho).	93
Figura G.2–(a) Variabilidade do NEE para diversas faixas de SZA (graus) durante a temporada de incêndios florestais (julho-novembro/2005-2008), em Cláudia, Mato Grosso: 0-20 (ciano), 20-40 (preto), 40-60 (magenta) e 0-60 (vermelho). (b) Apresenta variação relativa $\%NEE$ para o mesmo período (julho-novembro/2005-2008).	93
Figura K.1 –Localização espacial das redes de monitoramento ambiental no Brasil. Dados georreferenciados/Plataforma - QGis.	97
Figura L.1 –Registro acumulado do desmatamento para o Estado do Mato Grosso - Dados: 2002-2022. Inpe/terrabrazilis.(F. G. Assis <i>et al.</i> , 2019)	98
Figura M.1–Artigo submetido à revista Biogeoscience - Preprint (2023).	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Lista de variáveis medidas e instrumentação utilizada na torre micrometeorológica (no município de Cláudia-MT) e na estação AERONET, em Alta Floresta-MT. Os <i>flags</i> [1], [2] e [3] indicam a instrumentação utilizada na torre de fluxo, sistema AERONET e plataformas espaciais AQUA (TERRA), respectivamente.	29
Tabela 2.2 – Lista de variáveis indiretas (calculadas), símbolos e unidades de medida de grandezas derivadas de acordo com a literatura citada.	37
Tabela 2.3 – Ajustes polinomiais (Figura 2.5), coeficientes e estatísticas para os períodos matutino e vespertino na torre micrometeorológica de Cláudia-MT (2005-2008). R^2 é o coeficiente de correlação, ΔSW_i é a quantidade de radiação de ondas curtas incidente e STD é o desvio padrão.	38
Tabela 2.4 – Ajustes polinomiais (Figura 2.6), coeficientes e estatísticas para os períodos matutino e vespertino na torre micrometeorológica de Cláudia-MT (2005-2008). $C_p(x_v, y_v)$ é o ponto crítico da curva de ajuste, onde a derivada é igual a zero.	41
Tabela 2.5 – Ajustes polinomiais (Figura 2.8), coeficientes e estatísticas para os períodos entre 07-17h (LT) na torre micrometeorológica a 50 km de Sinop-MT, no município de Cláudia, entre 2005-2008.	45
Tabela H.1 – Coeficientes das curvas ajustadas dos dados médios horários (mensais) dos valores de radiação solar incidente medidos pela AERONET em Alta Floresta-MT. Os valores horários analisados são entre 07h e 17h (LT) para o período de julho de 2005 a junho de 2008.	94
Tabela H.2 – Coeficientes das curvas $NEE_0(asz)$ ajustados mensalmente para condições de céu claro no município de Cláudia-MT entre jun/2005 e jul/2008.	94
Tabela I.1 – Ajustes polinomiais, coeficientes e estatísticas para os períodos matutino e vespertino entre (07-17h) na torre micrometeorológica a 50 km de Sinop-MT, no município de Cláudia-MT, entre 2005-2008.	95
Tabela I.2 – Lista o número de focos de incêndio registrados pelas plataformas espaciais AQUA-TERRA durante os meses chuvosos na área de estudo entre janeiro e junho de 2005-2008. Nota: 1 - longa temporada de incêndios; 2 - estação de incêndios curta ou equivalente à estação seca.	95
Tabela I.3 – Lista com hiperlinks e Identificadores de Objetos Digitais (DOI) para acessar todos os dados utilizados nas figuras e tabelas desta publicação.	95
Tabela J.1 – Localização georreferenciada das torres de medidas de gases e partículas no Brasil.	96

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	15
1 INTRODUÇÃO GERAL	15
1.1 O contexto atual da ciclagem de carbono na Amazônia	15
1.1.1 Observação direta dos efeitos das queimadas no fluxo de CO ₂	16
1.1.2 A precificação do Carbono	18
1.1.2.1 <i>O contexto político nacional e global</i>	18
1.1.3 A importância de um texto ensaístico no contexto das questões levantadas	18
1.2 Justificativa e interdisciplinaridade da pesquisa	19
1.3 Objetivo	20
1.3.1 Objetivo Geral	20
1.3.2 Objetivos Específicos	20
1.4 Estrutura da Tese	21
CAPÍTULO 2	22
2 IMPACTO RADIATIVO DA POLUIÇÃO POR QUEIMADAS NA TROCA LÍQUIDA DE CO₂ EM ÁREA DE FLORESTA NO SUL DA AMAZÔNIA	22
2.1 Introdução	24
2.2 Material e Métodos	26
2.2.1 Descrição da área experimental	26
2.2.2 Instrumentação e Dados	26
2.2.2.1 <i>Medições de aerossol</i>	26
2.2.2.2 <i>Medidas Micrometeorológicas</i>	28
2.2.2.3 <i>Medidas de fluxo e concentração de CO₂</i>	29
2.2.3 Cálculo do NEE e dos efeitos radiativos dos aerossóis	29
2.2.3.1 <i>Método para determinar a troca líquida de CO₂ no ecossistema</i>	29
2.2.3.2 <i>Método para determinar a irradiância solar do céu claro</i>	30
2.2.3.3 <i>Determinação da irradiância relativa</i>	32
2.2.3.4 <i>Determinando o índice de claridade</i>	32
2.2.3.5 <i>Determinação da radiação PAR difusa</i>	33
2.2.3.6 <i>Determinando a eficiência de uso da luz</i>	34
2.2.3.7 <i>Determinação da temperatura do dossel foliar</i>	34
2.2.3.8 <i>Determinação do NEE de céu claro</i>	34
2.2.4 Procedimentos de análise dos dados	36
2.3 Resultados e Discussão	36
2.3.1 Ciclo diário médio da troca líquida de CO ₂	36
2.3.2 A influência dos aerossóis na radiação solar de ondas curtas	38
2.3.3 A influência dos aerossóis na radiação difusa	38
2.3.4 O efeito indireto dos aerossóis na eficiência de uso da luz pela floresta	41
2.3.5 A absorção líquida de CO ₂ devido aos aerossóis de queimadas	42
2.3.5.1 <i>Sazonalidade dos fatores biofísicos no NEE</i>	44
2.3.6 Insights sobre as incertezas da respiração do ecossistema	45

2.3.7	Efeitos do BBOA nas variáveis biofísicas e NEE	48
2.4	Conclusão	51
CAPÍTULO 3		62
3	REFLEXÕES ENSAÍSTICAS SOBRE A PRECIFICAÇÃO DO CARBONO NA AMAZÔNIA	62
3.1	Introdução	64
3.1.1	Apresentação geral	64
3.1.2	Dificuldades de medição na Amazônia Brasileira	64
3.1.2.1	<i>Entraves administrativos</i>	64
3.1.2.2	<i>Entraves científicos</i>	66
3.2	Instabilidade jurídica e comercialização do carbono no Brasil	67
3.2.1	A situação atual da precificação do carbono no Brasil	68
3.2.1.1	<i>Abordagens geopolíticas</i>	68
3.3	O pensamento desenvolvimentista sobre a Amazônia	71
3.3.1	O sequestro de CO ₂ como prática de crédito de carbono	71
3.3.2	Caminhos factíveis para a preservação dos biomas brasileiros	72
3.4	Conclusão	73
CAPÍTULO 4		79
4	CONCLUSÃO GERAL	79
4.1	Considerações Finais	79
4.2	Desafios futuros	80
REFERÊNCIAS		82
APÊNDICE A	. . . . .	87
APÊNDICE B	. . . . .	88
APÊNDICE C	. . . . .	89
APÊNDICE D	. . . . .	90
APÊNDICE E	. . . . .	91
APÊNDICE F	. . . . .	92
APÊNDICE G	. . . . .	93
APÊNDICE H	. . . . .	94
APÊNDICE I	. . . . .	95
APÊNDICE J	. . . . .	96
APÊNDICE K	. . . . .	97

APÊNDICE L	.....	98
APÊNDICE M	.....	99

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 O contexto atual da ciclagem de carbono na Amazônia

O ciclo do carbono constitui átomos de carbono onipresentes em todo o planeta e é bastante dinâmico, ocorrendo em diversas escalas. O carbono é um elemento chave nos ciclos globais, os chamados ciclos biogeoquímicos, os quais envolvem a vida, a terra e a química (Ciais *et al.*, 2013; Canadell *et al.*, 2021; Regnier *et al.*, 2022). Devido à capacidade coligativa com outros elementos químicos, o carbono participa de fluxos muito dinâmicos presentes nas biosferas e organismos vivos, constituindo assim a base estrutural da vida na Terra. Os mecanismos físico-químicos subjacentes à regulação de fluxos e estoques de carbono no Sistema Terra-Atmosfera são complexos e, portanto, estudos mais abrangentes são necessários (Coppola *et al.*, 2022). As observações mais atuais revelam mecanismos altamente não lineares, especialmente na interface biosfera-atmosfera (Green; Byrne, 2004; Cole; Hararuk; Solomon, 2021). Devido à capacidade fotossintética das florestas tropicais sequestrarem quantidades substanciais de carbono anualmente, o funcionamento desses ecossistemas tem sido amplamente estudado no mundo inteiro (Malhi, 2012). Neste contexto, a ciclagem de carbono na amazônia é tópico central nos debates político e ambiental acerca das mudanças climáticas globais, conforme o Relatório de Avaliação da Amazônia (Amazon Assessment Report 2021), reportado pelo Painel Científico da Amazônia (Science Panel for the Amazon - SPA) e outros relatórios recentes (Pörtner *et al.*, 2021; Anshari *et al.*, 2021).

Na Amazônia, a contribuição das florestas para o ciclo global do carbono tem sido quantificada mais precisamente por estudos de longo período, através do monitoramento contínuo da troca de carbono na interface floresta-atmosfera. Os achados científicos, baseados em medidas de campo, dados observacionais por sensoriamento remoto e modelagem numérica, revelam resultados indubitáveis em relação à contribuição das florestas na regulação global dos fluxos e estoques de CO₂ atmosférico (Cramer *et al.*, 2004; Foley *et al.*, 2007; Brookhouse *et al.*, 2010; Anshari *et al.*, 2021). A biomassa viva estoca aproximadamente 200-300 Pg C quando comparado com um terço do que é retido na atmosfera (Avitabile *et al.*, 2016; Pan, 2011; Saatchi *et al.*, 2011). Em condições normais, os ecossistemas de floresta processam cerca de 60% da fotossíntese mundial, sequestrando cerca de 72 Pg C da componente atmosférica todos os anos (Beer *et al.*, 2010), mas também liberando quantidade semelhante de volta para a atmosfera por meio da respiração das próprias plantas e dos animais, incluindo microorganismos e fungos do ecossistema (Chambers *et al.*, 2004). Fica evidente, portanto, a importância das florestas Amazônicas como reguladoras do clima (Silva-Junior *et al.*, 2020; Boulton; Lenton; Boers, 2022); removendo os excessos de CO₂ atmosférico, lançados devido ao consumo de combustíveis fósseis (Schimel, 2004).

O particionamento preciso das quantidades de carbono alocado nos ecossistemas de floresta requer, porém, diversidade maior de experimentos ainda pouco explorados; experimentos focados nas peculiaridades de cada bioma, sob condições naturais e perturbadas. Sob condições perturbadas, as florestas podem atuar como fonte de CO₂ (Malhi; Grace, 2000; Achard *et al.*, 2004), ou podem agir, em condições equilibradas (normais), como sumidouro de carbono, basicamente devido às florestas remanescentes absorverem grande parte do CO₂ adicionado à atmosfera (Gatti *et al.*, 2014). Devido às características intrínsecas de cada ecossistema, pequena mudança proporcional na captação ou na liberação de CO₂ pode, portanto, resultar em grande fonte ou sumidouro líquido de CO₂ para

a atmosfera, dependendo do tipo de bioma e perturbações ambientais. Como será visto adiante, vários experimentos de campo foram realizados na Amazônia brasileira a fim de elucidar os mecanismos físico-químicos associados ao balanço de carbono (Schimel, 2004; Nagy; Artaxo; Forsberg, 2016). A maioria desses experimentos foram realizados na porção oeste, sobre ecossistemas de floresta densa de terra firme da Amazônia central e arco do desmatamento (Martin *et al.*, 2010b; Artaxo *et al.*, 2013; Artaxo *et al.*, 2022).

Outros tipos de floresta, igualmente importantes, foram pouco estudadas, dentre elas: florestas ombrófilas (densa e mista), campinaranas (florestada e arborizadas) e manguezais localizadas à noroeste da Amazônia oriental, florestas de igapó, várzeas, pantanal e, por fim, florestas estacionais decíduais, sempre-verde e semidecíduais. Estudar o balanço de CO₂ na interface desses ecossistemas é fundamental para que se possa avançar no entendimento do real papel das florestas amazônicas para a ciclagem global de carbono e regulação do clima na Terra e, portanto, no debate político acerca do aquecimento global. Esta pesquisa, em particular, visa melhorar a compreensão atual em relação às alterações no fluxo líquido de CO₂ sob condições atmosféricas perturbadas, especificamente sobre os ecossistemas de floresta semidecidual, presentes em todos os biomas da Amazônia brasileira, atualmente ameaçados.

1.1.1 Observação direta dos efeitos das queimadas no fluxo de CO₂

Uma das mais importantes fontes de poluição e de alterações na composição físico-química na atmosfera e ciclagem de carbono da Amazônia são as queimadas. Devido às mudanças de uso do solo, o carbono estocado a dezenas de milhares de anos pelas florestas vem sendo fortemente afetado nos últimos 30 anos, principalmente pelo desmatamento ilegal. As concentrações de carbono no ramo atmosférico tem, portanto, sofrido aumentos expressivos com a expansão das sociedades; expansão urbana, pecuária e atividades termo-industrial. Com o intuito de avaliar os impactos individuais dessas atividades no clima e funcionamento dos ecossistemas, vários experimentos de campo foram realizados (Brito *et al.*, 2014; Martin *et al.*, 2010b; Martin *et al.*, 2016; Martin *et al.*, 2017), quase todos coordenados pelo programa LBA (Laboratório de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia) sediado no INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia), em Manaus-AM (Artaxo *et al.*, 2013; Artaxo *et al.*, 2022).

Em relação ao impacto das queimadas, os estudos demonstraram maiores taxas de absorção de CO₂ ocorrendo geralmente em dias ligeiramente encobertos e não ensolarados (Gu *et al.*, 1999; Law, 2002; Yamasoe *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2007; Jing *et al.*, 2010). Sob determinados níveis de irradiância solar e condições de céu, observam-se valores absolutos mais elevados na troca líquida de CO₂, isto é, predominância de fotossíntese em relação à respiração (Goulden *et al.*, 1996; Gu *et al.*, 1999; Doughty; Flanner; Goulden, 2010; Cirino *et al.*, 2014). Neste sentido vários mecanismos têm sido então postulados para explicar tais observações como aumento da radiação difusa (Gu *et al.*, 1999; Yamasoe *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2007; Mercado *et al.*, 2009; Jing *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010); redução da respiração das folhas sob ação solar; redução do VPD (Goulden *et al.*, 2004; Randow *et al.*, 2004); redução da temperatura do dossel foliar (Doughty; Flanner; Goulden, 2010) e, finalmente; modificações na dinâmica estomática associada a flutuações da quantidade de luz solar no ambiente (Randow *et al.*, 2004). Embora boa parte dessas observações esteja limitada a medidas pontuais ou locais, espera-se ainda que o aumento na absorção de carbono, sob condições de crescente nebulosidade e carga de aerossóis atmosféricos, tenha implicações importantes para o clima regional e global (Abakumova, 1996; Gu *et al.*, 1999). Isto é de particular interesse para regiões do mundo onde a porcentagem de cobertura de

nuvens tem aumentado nos últimos anos (Keeling; Chin; Whorf, 1996; Myneni *et al.*, 1997; Gu *et al.*, 1999), ou para regiões onde extensas áreas de floresta absorvam quantidades significativas de CO₂ atmosférico, retirando o excesso de CO₂ do ar para alocações na forma de biomassa, ou ainda, para regiões do mundo frequentemente impactadas por fenômenos climáticos de variabilidade natural, capazes de produzir secas ou cheias extremas, como El Niño (Rädel *et al.*, 2016; Teuling *et al.*, 2017).

Esses estudos, de modo geral, são particularmente úteis para o Brasil, onde as maiores emissões de carbono para atmosfera ($\sim 0,2-0,8$ Pg C) são devido às queimadas (Houghton *et al.*, 2009; Houghton *et al.*, 2012), em particular, para a Amazônia, durante a estação seca, quando as queimadas são generalizadas e o fluxo de radiação PAR reduz em até 70% (Eck *et al.*, 2003; Procopio *et al.*, 2004), impactando fortemente a Produtividade Primária Líquida da floresta (NPP). São úteis também em áreas de floresta intacta da Amazônia durante a estação chuvosa, onde os inventários indicam sumidouros de carbono a taxas variando de 0,5 até elevados valores de 7 tC ha⁻¹ (Araújo, 2002; Ometto *et al.*, 2005; Malhi, 2010; Malhi, 2012).

Embora essas informações científicas representem um avanço importante para o entendimento do funcionamento dos ecossistemas na totalidade, é necessário mais conhecimento em relação aos fatores que impactam anualmente o carbono absorvido pelas florestas em áreas fortemente impactadas devido às queimadas, e nas áreas até então desprovidas de sistemas de monitoramento contínuo de fluxos de CO₂, energia, disponibilidade hídrica e nutrientes. O monitoramento de longo prazo do fluxo de CO₂ na Amazônia, até o momento, esteve limitado basicamente a sete torres de fluxo distribuídas em 5,5 milhões de km² operadas pelo programa LBA (Rocha *et al.*, 2009). Dos quase 20 anos de registros de medição, apenas alguns poucos estudos analisaram o impacto de nuvens e partículas atmosféricas no ciclo do carbono na Amazônia. O número limitado de fotômetros solares à superfície para o monitoramento contínuo da Profundidade Óptica de Aerossóis (AOD), variável indicadora do grau de extinção de radiação solar devido às queimadas, de fato, têm dificultado grandemente um mapeamento mais amplo e preciso da relação entre poluição e balanço líquido de carbono na floresta amazônica (Cirino *et al.*, 2014). Esses estudos, em geral, concentraram suas análises majoritariamente em áreas de floresta seca e estacionalmente seca, em Ji-Paraná-RO (Yamasoe *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2007) e mais recentemente na Amazônia central, em Santarém-PA e Manaus-AM (Doughty; Flanner; Goulden, 2010; Cirino *et al.*, 2014). Outro aspecto importante é o modelamento numérico dos resultados científicos observados por esses autores que só foi possível recentemente com o novo sistema numérico JULES (Joint UK Land Environment Simulator)/CCATT-BRAMS (Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modelling System), desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Este modelo demonstrou bom desempenho em relação às variáveis meteorológicas e a proporção de mistura de CO₂ em boa parte da América do Sul, mais precisamente na porção oeste da bacia amazônica (Moreira *et al.*, 2013; Moreira *et al.*, 2017).

Novas parametrizações físicas dos efeitos radiativos de aerossóis e nuvens e os impactos ligados à ciclagem de carbono na Amazônia tem sido inseridos nesses modelos. Entretanto, a capacidade dos sistemas numéricos em representar todo o bioma Amazônia, por exemplo, limita-se às campanhas de campo e torres de medidas de fluxo de CO₂, ocasionando incertezas, já que essas medidas limitam-se ainda a uma pequena variedade de tipos de florestas. De outro lado, na contramão desses problemas, a componente da precificação de carbono tem ganhado força novamente, trazendo a financeirização de serviços ecossistêmicos e, portanto, novos desdobramentos frente a política desenvolvimentista

para a Amazônia que utiliza também o sequestro (absorção) de CO₂ como um mecanismo viável para implementação em projetos para viabilizar a comercialização do carbono (o caso das florestas brasileiras). Essa prática tem sido observado, em particular, apoiado em relatórios técnicos de organizações governamentais. Se usados inadequadamente, contribuirão fatalmente para tomada de decisões a respeito da administração e destinação dos recursos naturais oriundos de florestas intactas, com efeitos potencialmente danosos à dinâmica e relação das comunidades tradicionais com a floresta.

1.1.2 A precificação do Carbono

1.1.2.1 *O contexto político nacional e global*

As seções 1.1.1 e 1.1.2 estabelecem o nicho dos principais objetos a serem estudados nesta tese, isto é, a troca líquida de CO₂ na interface floresta-atmosfera da Amazônia sob o direto efeito da poluição por queimadas e os discursos desenvolvimentistas apoiados na mercantilização do sequestro de carbono pelas florestas da Amazônia Brasileira. Estes tópicos subsidiam informações-chave para questões e decisões políticas de desenvolvimento econômico baseadas na preservação e mitigação dos ecossistemas amazônicos. Uma discussão importante, por exemplo, é a precificação do carbono. Como veremos adiante, esta política global, tem sido discutida até o momento com limitações importantes, dentre elas: a exploração dos ecossistemas de floresta, vistos principalmente como “prestadores de serviços ambientais”, úteis quase que exclusivamente à manutenção do modelo “desenvolvimentista” de países emergentes e desenvolvidos (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima - CQNUMC) que visa reformar o MDL ([Frangetto; Veiga; Luedemann, 2018](#); [Ridelensky; Santos, 2022](#)). O entendimento da Amazônia quanto entidade regional, considerado “chave” para o desenvolvimento de políticas sustentáveis, tem sido amplamente divulgado em importantes relatórios científicos, mas pouco considerados no planejamento econômico estratégico de forma a se buscar uma equidade ambiental para Amazônia. No contexto político atual em que se deflagra forte degradação das coordenadas ambientais, a precificação do carbono consiste também questão científica importante; um tópico de natureza interdisciplinar cuja abordagem requer um amplo e diversificado conjunto de conhecimentos multidisciplinares aplicados, diferentes técnicas, ferramentas, conceitos, teorias e dados de diversas naturezas ([Interdisciplinary-Research, 2005](#); [Akram et al., 2022](#)). Neste trabalho de tese, busca-se mostrar, em última análise, a inviabilidade política da precificação do carbono. Para tal, pressupõe-se que vulnerabilidade e resiliência de florestas aos extremos climáticos (naturais) e às perturbações antrópicas, são fatores limitadores de políticas impraticáveis como a “precificação do carbono”, representada aqui por atores (organizações e indivíduos) unidos em torno de uma agenda política comum. Busca-se determinar grupos influenciados por “crenças” preexistentes de desenvolvimento econômico baseado na prestação de serviços ecossistêmicos, aqui representado pela política de precificação do carbono ([Marques, 2016](#)).

1.1.3 A importância de um texto ensaístico no contexto das questões levantadas

O propósito de um texto ensaístico acadêmico é explorar, analisar e discutir um tópico específico de forma precisa e crítica, utilizando argumentos, evidências e pesquisa para chegar a conclusões sólidas e informativas, contribuindo para o corpo de conhecimento em uma determinada área ou disciplinas, oferecendo interpretações ou evidências sobre um tópico relevante ([Meneghetti, 2011](#)). Tem como objetivo instruir, conduzindo os leitores, apresentando dados substanciais, argumentos sólidos, respeitando as convenções

acadêmicas específicas e o rigor na pesquisa. Esse gênero textual é uma parte importante na comunicação acadêmica ajudando na construção do conhecimento, direcionado também para um público mais amplo, que podem ser acadêmicos, estudantes, tomadores de decisões e leitores interessados no tópico. Pretendendo alcançar esse público mais amplo, esse gênero textual promove a transformação e a adaptação do conteúdo científico complexo, tornando-o mais compreensível e interessante sem prejudicar a precisão das informações, utilizando meios como uma organização lógica, explicação de termos mais técnicos e contextualizações. Esse gênero textual é importante para divulgar informações científicas, envolvendo o público em questões importantes.

O ensaio que será apresentado no Capítulo 3 realizará uma breve reflexão crítica, informada por uma perspectiva das dificuldades de se realizar medidas ambientais na Amazônia para o entendimento da complexidade do funcionamento dos ecossistemas, defendendo, posteriormente, que essas dificuldades não são levadas em considerações nas formulações das decisões políticas envolvendo a prática da precificação do carbono no Brasil.

1.2 Justificativa e interdisciplinaridade da pesquisa

A floresta estacional semidecidual, localizada na fronteira do arco do desmatamento, está sob forte impacto antrópico devido às mudanças de uso da terra destinada aos avanços da monocultura da soja, pecuária e da indústria madeireira e vulnerabilidade ao fogo. Trata-se de uma área com grande diversidade de espécies de plantas e animais, fundamentais à ciclagem de nutrientes e oxigênio e regulação do clima local. Este trabalho visa mostrar que as perturbações induzidas por aerossóis de queimadas, podem promover alterações na produtividade deste ecossistema, buscando responder a duas questões científicas centrais ainda não realizadas para esse ecossistema: (1) Sob quais fatores exógenos do ambiente (temperatura, VPD, nebulosidade, radiação e poluição) têm-se as máximas taxas de absorção líquida de CO₂ na interface planta-atmosfera em áreas de floresta estacional semidecídua na Amazônia? (2) Qual o potencial de absorção de carbono por esse ecossistema da Amazônia em resposta a estes fatores? (3) que reflexões críticas podemos extrair destas análises com informações para políticas de crédito de carbono no Brasil?

O potencial de absorção de CO₂ da floresta semidecidual no Mato Grosso-MT, ainda não foi avaliada, seja por observação direta, ou propriamente por modelagem numérica. Sabe-se que essas florestas tropicais semidecíduas desempenham função central no sistema terrestre, preservando a biodiversidade (Fu *et al.*, 2018).

As características da região também são importantes, incluindo principalmente o clima, o tipo de solo e o índice pluviométrico. Neste sentido, o mapeamento do potencial de absorção de CO₂ em alguns ecossistemas da Amazônia brasileira, de fato, vem apresentando avanços importantes nos últimos anos (Carvalho *et al.*, 2010), a maioria dos estudos existentes reporta frequentemente a componente terrestre do carbono, isto é, os estoques de carbono alocados em solo. O potencial de absorção de CO₂ atmosférico, embora importante, não foi sistematicamente avaliado ainda em outras florestas da Amazônia sob a influência de fatores externos, como aerossóis e nebulosidade. Quase nada se sabe sobre como esses fatores externos do ambiente circundante afetam os potenciais de absorção de CO₂ atmosférico em florestas estacionais da Amazônia central, incluindo Cerrado e Caatinga. Não se tem, por exemplo, um mapeamento sistemático das condições biológicas das florestas em termos de cobertura de nuvens, aerossóis, radiação solar, temperatura foliar, déficit de pressão de vapor (VPD), disponibilidade hídrica e de nutrientes do solo, para que se possa entender o correto funcionamento desses ecossistemas.

Esta pesquisa busca sinergia para alcançar reflexões de modo que se possa minimizar os impactos ambientais (degradação/perda da biodiversidade) e sociais, mas sobretudo tentar pulsar através destes resultados a busca pelo entendimento do funcionamento dos ecossistemas, reforçando as suas especificidades num sistema complexo que garante o equilíbrio ambiental.

Devido à grande importância que a região ganhou frente ao mundo globalizado após a crise petrolífera de 1973 (Harvey, 2011), a Amazônia alcança interesse global. O potencial de energia da região faz dela um lugar “prestigiado” e, ao mesmo tempo, “cobiçado” para um planeta globalizado e capitalizado, com desdobramento para novas questões político-econômicas. O enfoque deste trabalho de pesquisa é, portanto, interdisciplinar, considerado o mais adequado para tratar as questões levantadas, com as quais a disciplinaridade não suporta elucidação completa para os problemas levantados. Para isso, a precificação de carbono no Brasil é discutida, aqui, a partir de reflexões que emergem da experimentação e da observação direta do fluxo de CO₂ em uma área de floresta no sul da Amazônia, localizada no ecótono Cerrado-Floresta Amazônica. Essas reflexões, por sua vez, adicionam perspectivas mais abrangentes para tratar desta questão ambiental de sentido ético, filosófico e político.

O arcabouço interdisciplinar desta pesquisa, caracteriza-se pela integralização de modelos conceituais que cruzam e ultrapassam as fronteiras disciplinares no âmbito das ciências naturais e sociais. Partículas atmosféricas, luminosidade, temperatura, umidade e fotossíntese, isto é, variáveis ambientais moduladas pelas queimadas, esta última com origem no homem, constituem os modelos social e biofísico os quais se misturam. No modelo social pontua-se o comportamento humano (dificuldade de implementar políticas públicas para reflexão de uma conservação dos ambientes naturais com abordagens às implicações do mercado de crédito de carbono). A busca de soluções para esse problema complexo, apontado nesta pesquisa, requer fundamentalmente uma nova forma de ver e pensar a natureza, desconstruindo a forma excessiva de consumir os recursos naturais.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o impacto radiativo da poluição por queimadas no saldo líquido de CO₂ em uma área de floresta localizada no sul da bacia Amazônica, com reflexões ensaísticas sobre a precificação do carbono no Brasil.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Quantificar os efeitos radiativos da pluma de poluição sobre variáveis biofísicas que influenciam diretamente a fotossíntese: radiação PAR, temperatura do ar, temperatura foliar do dossel e déficit de pressão do vapor;
- Realizar uma análise crítica ensaística sobre as estratégias de regulamentação do mercado de crédito de carbono para Amazônia brasileira, considerando os aspectos científicos, econômicos e políticos envolvidos;

1.4 Estrutura da Tese

- O Capítulo 1 contextualiza o problema central da pesquisa. Integra as questões científicas à problemática envolvida, reportando os principais achados científicos alcançados até o momento, no tópico desta pesquisa. Resultados globais e regionais são reportados para destacar a importância das florestas tropicais e da Amazônia brasileira no âmbito do que se visa estudar.
- O Capítulo 2 atende ao objetivo específico 1 supracitado. Nesta etapa, determina-se o efeito radiativo da poluição por queimadas na interface planta-atmosfera do ecótono Cerrado-Floresta Amazônica. Nesta etapa, calculam-se os efeitos para o saldo líquido de CO₂, temperatura foliar do dossel, temperatura do ar e déficit de pressão do vapor.
- O Capítulo 3, atende ao objetivo específico 2. Este capítulo consiste em um texto ensaístico com reflexões críticas sobre as estratégias de mercantilização do carbono na Amazônia, considerando três aspectos básicos fundamentais envolvidos: científicos, econômicos e políticos.
- O Capítulo 4, está reservado para a conclusão geral e considerações finais da pesquisa. Nesta etapa final, enfatizam-se as implicações dos resultados alcançados e a significância do trabalho realizado. Apresentam-se, também, perspectivas e recomendações-chave para trabalhos futuros, a fim de auxiliar a sociedade e o Estado com informações para uma melhor compreensão do funcionamento e fragilidades dos ecossistemas brasileiros.

2 IMPACTO RADIATIVO DA POLUIÇÃO POR QUEIMADAS NA TROCA LÍQUIDA DE CO₂ EM ÁREA DE FLORESTA NO SUL DA AMAZÔNIA

RESUMO¹

Os processos atmosféricos e o clima estão ligados ao ciclo do carbono na região amazônica como consequência do forte acoplamento biosfera-atmosfera. Os efeitos radiativos de aerossóis e nuvens ainda são desconhecidos para uma grande variedade de espécies e tipos de vegetação presentes nos biomas amazônicos. Este estudo examina os efeitos dos aerossóis atmosféricos sobre a radiação solar e seus efeitos sobre o saldo líquido de CO₂ (NEE) em uma área de floresta tropical semidecídua no norte do Estado do Mato Grosso. Nossos resultados mostram uma redução da assimilação no NEE com uma perda considerável com a diminuição da radiação solar incidente de $\approx 40\%$ e irradiância relativa entre 1,10-0,67. Um aumento médio de 35-70% na assimilação líquida de CO₂ foi observado para níveis de poluição, aqui expressos pela Profundidade Ótica do Aerossol (AOD), acima de $\approx 1,25$. O aumento de 35-70% no NEE foi atribuído ao aumento de até 60% na fração difusa da Radiação Fotossinteticamente Ativa em relação à fração direta. Esses resultados foram atribuídos principalmente aos aerossóis orgânicos de queima de biomassa de incêndios na área estudada. Também foram observadas importantes influências na temperatura e umidade relativa do ar induzidas pela interação entre radiação solar e alta carga de aerossóis na área de observação; um resfriamento médio de $\approx 3,0^{\circ}\text{C}$ e 10%, respectivamente. Dado o transporte de longa distância dos aerossóis emitidos pela queima de biomassa, mudanças significativas no fluxo de CO₂ podem estar ocorrendo em grandes áreas da Amazônia, com efeitos importantes sobre o potencial de absorção de CO₂ nos ecossistemas de florestas semidecíduas distribuídas na região.

Palavras-chave: Ciclo do Carbono. Floresta Semidecídua. Incêndios Florestais. Aerossóis.

¹Artigo publicado na Biogeosciences sob o título **Enhanced net CO₂ exchange of a semi-deciduous forest in the southern Amazon due to diffuse radiation from biomass burning**, EGUsphere [preprint] - <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-684>, 2023.

ABSTRACT

Carbon cycling in the Amazon fundamentally depends on the functioning of ecosystems and atmospheric dynamics, which are highly intricate. The radiative effects of aerosols on the Amazon-Cerrado biomes still need to be discovered for a wide variety of vegetation, usually unconsidered since that was not inventoried in previous studies. This study examines the effects of atmospheric aerosols on solar radiation and their effects on Net Ecosystem Exchange (NEE) in an area of semideciduous tropical forest in the North of Mato Grosso State. Our results show that for a relative irradiance (f) 1.10-0.67, a decrease in incident solar radiation is associated with a reduction in the NEE . However, an average increase of 35-70% in NEE was observed when pollution levels Aerosol Optical Depth (AOD) were above ≈ 1.25 and $f < 0.5$. The increase NEE was attributed to the increase of up to 60% in the diffuse fraction of Photosynthetically Active Radiation. These results were mainly attributable to the biomass burning organic aerosols from fires. Important influences on Vapor Pressure Deficit (VPD) and air Temperature (T_{air}) and Canopy (LC_T), induced by the interaction between solar radiation and high aerosol load in the observation area, were also noticed. On average, a cooling of about 3-4 °C and a decrease up to 2-3 hPa was observed for T_{air} , LC_T , and VPD , respectively. Given the long-distance transport of aerosols emitted by burning biomass, significant changes in atmospheric optical properties and irradiance will impact the CO_2 flux of semideciduous forests distributed in the region.

Keywords: Carbon Cycle. Semideciduous Forest. Forest Fire. Aerosols.

2.1 Introdução

O carbono (C) é um elemento-chave nos ciclos biogeoquímicos globais, e a compreensão dos fluxos de massa e energia da biosfera-atmosfera é essencial para a compreensão do armazenamento terrestre atual e futuro de C. O papel dos ecossistemas da Floresta Amazônica tem sido amplamente debatido (Booth *et al.*, 2012; Huntingford *et al.*, 2013; Brienen *et al.*, 2015), especialmente para as florestas tropicais amazônicas (Doughty *et al.*, 2015; Gatti *et al.*, 2014; Gatti *et al.*, 2021). Redistribuição de biomas e espécies vegetais (Davison; Rahbek; Morueta-Holme, 2021), perda de biodiversidade (Brando *et al.*, 2014; Saatchi *et al.*, 2021), aumento de queimadas (Brando *et al.*, 2019; Alencar *et al.*, 2022; Sullivan *et al.*, 2020), surtos de pragas e doenças (Anderegg *et al.*, 2020) são exemplos de impactos, agravada não apenas por fatores climáticos, mas também por fatores antrópicos (Ometto *et al.*, 2022). Estes impactos tem ameaçado os maiores sumidouros pantropicais de CO₂ desde 1990. Reduções de 1,26 PgC ano⁻¹ para 0,29 PgC ano⁻¹ são esperadas entre 1990-2030, possivelmente chegando a zero na Amazônia (Hubau *et al.*, 2020). O resultado do aumento dos níveis atmosféricos de CO₂ fornece um feedback importante sobre o futuro do aquecimento com efeito estufa (Booth *et al.*, 2012; Huntingford *et al.*, 2013). No bioma Amazônia, os ecossistemas florestais desempenham um papel importante no armazenamento terrestre de C e embora essas florestas pareçam ter um comportamento uniforme, existem sub-regiões climáticas distintas que afetam o armazenamento de C (Brienen *et al.*, 2015; Gatti *et al.*, 2021). A absorção de CO₂ através da fotossíntese aumenta os estoques de C na vegetação e no solo, representando um sumidouro de C, enquanto plantas, animais, respiração microbiana, decomposição da biomassa vegetal morta e incêndios florestais liberam CO₂, representando uma fonte de C para a atmosfera (Artaxo *et al.*, 2022; Venturini *et al.*, 2023; Silva-Junior *et al.*, 2020).

Em geral, a participação das florestas no ciclo global do carbono só pode ser adequadamente quantificada através de estudos de longo prazo que monitorem as trocas de C na interface planta-atmosfera. Estima-se que as florestas armazenem 200-300 Pg C (Pan, 2011; Saatchi *et al.*, 2011; Avitabile *et al.*, 2016), cerca de um terço do que está contido na atmosfera. Este estoque é muito dinâmico, e essas árvores processam cerca de 60% da fotossíntese global, sequestrando cerca de 72 Pg C do componente atmosférico através da produção primária bruta (GPP) todos os anos (Beer *et al.*, 2010) mas liberando uma quantidade semelhante de volta para atmosfera através da respiração do ecossistema (planta + animal + microbiana) (Nagy *et al.*, 2018). Com esses grandes fluxos, pequena mudança proporcional na absorção ou liberação de CO₂ pode resultar em um grande armazenamento fonte líquida de C.

As concentrações de carbono na atmosfera aumentaram desde o início do período industrial e atualmente atuam junto com outras fontes de emissão de C, como a degradação de florestas, principalmente tropicais. Relatórios recentes (Gatti *et al.*, 2021) mostram que algumas regiões da Amazônia atuam como fonte de CO₂ para a atmosfera, como resultado da exploração madeireira, mudanças no uso da terra e incêndios que ocorrem na região. No entanto, a modelagem numérica regional (Moreira *et al.*, 2017) e estudos in-situ (Carswell *et al.*, 2002; Randow *et al.*, 2004) indicam que as florestas amazônicas podem ocasionalmente ser sumidouros líquidos atmosféricos de CO₂; ou aproximadamente em equilíbrio (Vourlitis *et al.*, 2011). Em geral, o equilíbrio entre as taxas de emissão ou fixação de carbono é delicado, e pequenas perturbações externas podem alterar a dinâmica da floresta e o estado do sistema climático.

Dentre os agentes moduladores do balanço CO₂, a radiação solar é um componente fundamental tanto para a fotossíntese quanto para a respiração. No Brasil e principalmente

na região amazônica a queima de biomassa emite abundantemente gases e aerossóis na atmosfera, essas emissões podem alterar fortemente os fluxos radiativos impactando o fluxo de CO_2 (Aragão *et al.*, 2018; Malavelle *et al.*, 2019; Morgan *et al.*, 2019; Magalhães *et al.*, 2019). Os aerossóis atmosféricos da queima de biomassa afetam a eficiência do uso da luz (LUE) e a produtividade do ecossistema, influenciam a quantidade e a natureza da radiação solar recebida no sistema e afetam outras condições ambientais, como temperatura e umidade (Kanniah *et al.*, 2012; Mercado *et al.*, 2009). Estudos dos efeitos dos aerossóis nos processos de ciclagem de C terrestre encontraram efeitos positivos, negativos e neutros, e a maioria das pesquisas na Amazônia foram conduzidas nas regiões central (Cirino *et al.*, 2014), leste (Doughty; Flanner; Goulden, 2010; Oliveira *et al.*, 2007), e partes do sudoeste (Yamasoe *et al.*, 2006; Cirino *et al.*, 2014) da bacia. No entanto, poucas pesquisas foram feitas sobre ecótonos na Amazônia, por exemplo, na transição Cerrado-Floresta Amazônica, presente no arco do desmatamento, e em outros biomas, como Cerrado-Caatinga, Cerrado-Floresta Atlântica e florestas do Pantanal. Simulações numéricas também demonstraram o impacto dos aerossóis nos GPP nas escalas, regional (Moreira *et al.*, 2013; Rap, 2015; Bian *et al.*, 2021) e global (Mercado *et al.*, 2009; Rap *et al.*, 2018), mas ainda faltam representações físicas desses impactos nestes ecossistemas de transição.

Os modelos, no entanto, precisam de melhorias na parametrização dos efeitos radiativos de aerossóis e nuvens sobre o NEE , isto é, uma representação mais realista da estrutura do dossel e dos processos fisiológicos e morfológicos da folha (Durand *et al.*, 2021). Melhorias no modelo óptico de aerossóis, suas propriedades, formação secundária, tempo de vida, evolução e absorção de aerossóis também são críticas (Drugé *et al.*, 2022), especialmente aquelas relacionadas à forma, tamanho e composição química. Essas melhorias são fundamentais para uma distribuição espacial mais precisa e realista do potencial de absorção atmosférica de CO_2 pelas florestas amazônicas (Procopio *et al.*, 2004; Moreira *et al.*, 2017). Nesse sentido, o potencial de impacto dos aerossóis atmosféricos induzidos pelo fogo na absorção de CO_2 pelas florestas tropicais semidecíduas (sazonais) em Mato Grosso (no arco do desmatamento) não foi avaliado nem por observação direta, nem por modelagem numérica. Essas florestas desempenham um papel central na preservação da biodiversidade (Fu *et al.*, 2018), e parte delas estão localizadas na fronteira do desmatamento e sofrem variações sazonais em NEE (Vourlitis *et al.*, 2011). Esses atributos fazem desta região um excelente laboratório para avaliar os efeitos dos aerossóis atmosféricos na floresta NEE .

Esta pesquisa tem como foco estudar a ação dos aerossóis da queima de biomassa em uma área de floresta semidecídua localizada na porção sul da Bacia Amazônica, na região do arco do desmatamento na porção norte do Estado do Mato Grosso. Para tanto, busca-se especificamente: (1) desenvolver um algoritmo de irradiância de céu claro utilizando um longo período de observação da Profundidade Óptica do Aerossol (AOD); (2) quantificar o aumento da fração difusa da radiação solar devido à presença de aerossóis provenientes de incêndios na área de estudo experimental; (3) quantificar mudanças líquidas e relativas em NEE decorrentes de mudanças na radiação direta e difusa; (4) avaliar a influência dos incêndios nas variáveis biofísicas que influenciam as taxas fotossintéticas das florestas, como a temperatura da copa das folhas (LC_T), a temperatura do ar (T_{air}) e o déficit de pressão de vapor (VPD). Dados de aerossol e medições micrometeorológicas com fluxos de carbono medidos pelo sistema de covariância de vórtices turbulentos (eddy covariance) foram utilizados de 2005 a 2008. Todas as medições de radiação solar são avaliadas em termos de profundidade de aerossol (AOD), ângulo solar zenital (SZA) e irradiância relativa (f). Até onde sabemos, este é o primeiro estudo com esse propósito.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Descrição da área experimental

A área de estudo localiza-se no sul da bacia Amazônica, 50 km a nordeste de Sinop, no município de Cláudia (Lat 11° 24,75' S, Long. 55° 19,50' W), no Estado de Mato Grosso (Figura 2.1). Essa floresta está localizada no arco do desmatamento, região de contínua expansão agrícola (áreas de cultivo de soja e pastagem), exploração madeireira e queimadas; (Barbosa *et al.*, 2023; Nepstad *et al.*, 2014; Balch *et al.*, 2015; Alencar *et al.*, 2022) (Apêndice A, Apêndice B, Figura B.1), reconhecida como floresta estacional, seca ou semidecídua (Ackerly *et al.*, 1989; Ratter *et al.*, 1978). O Apêndice B mostra que a área de estudo está sob diferentes cargas de aerossóis durante as estações seca e chuvosa. Os resultados foram obtidos a partir das séries temporais dos satélites Terra e Aqua (AOD_m), listados na Tabela 2.1.

Estudos anteriores relatam as características peculiares deste tipo de floresta (Vourlitis *et al.*, 2011) que normalmente possui árvores com menor altura, biomassa e diversidade florística em comparação com florestas tropicais úmidas (Murphy; Lugo, 1986; Nogueira *et al.*, 2008) devido à sua variação sazonal bem definida em precipitação. A floresta está a 423 m acima do nível do mar, em uma transição onde a vegetação é composta por savana (cerrado), vegetação de transição (cerradão) e floresta amazônica (Vourlitis *et al.*, 2011).

As posições geográficas dessas florestas são descontínuas devido às flutuações climáticas ocorridas nos últimos 10.000 anos (Prado; Gibbs, 1993). As espécies arbóreas deste local são típicas da floresta semidecídua da Amazônia, com alturas máximas de copa variando entre 25-28 m. Uma descrição abrangente das espécies relatadas na região foi relatada por (Ackerly *et al.*, 1989; Lorenzi, 2000; Lorenzi, 2002). Os solos são ácidos com pH 4,2 e arenosos (94% areia), neossolos quartzarênicos bem drenados, pobres em nutrientes e com baixa matéria orgânica (Vourlitis *et al.*, 2001; Oliveira; Marquis, 2002), com estação seca que se estende de maio a setembro (Vourlitis *et al.*, 2002).

A temperatura média anual desta área em 30 anos é de 24°C, com precipitação de aproximadamente 2.000 mm ano⁻¹ (Vourlitis *et al.*, 2002). A Alta da Bolívia (BH) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (SACZ) estão entre os sistemas atmosféricos ativos na região norte de Mato Grosso, enquanto o sul é afetado por sistemas extratropicais, como os Sistemas Frontais (Reboita *et al.*, 2012). A perda de folhas (caducifolia) durante a estação seca (julho-setembro) é bastante sensível à disponibilidade hídrica e às temperaturas (máximas e mínimas) da região. Com a chegada da estação chuvosa (novembro-maio), as árvores que perderam as folhas voltam a brotar e a produzir novas (Vourlitis *et al.*, 2011).

2.2.2 Instrumentação e Dados

2.2.2.1 Medições de aerossol

Este estudo utilizou uma longa série de medições de profundidade óptica de aerossol – AOD (Aerosol Optical Depth) para avaliar o impacto das partículas atmosféricas no fluxo de radiação solar para a superfície. Foram utilizados dois tipos de sensores remotos: o sensor orbital MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), disponível a bordo dos satélites AQUA e TERRA, produtos MOD04-3K e MYD04-3K (Remer *et al.*, 2013), e um AERONET (Aerosol Robotic Network), um fotômetro solar, usado como medida padrão das propriedades ópticas de aerossóis atmosféricos na superfície, entre junho de 1999 e março de 2017 (Holben *et al.*, 1998). Todas as informações remotas de

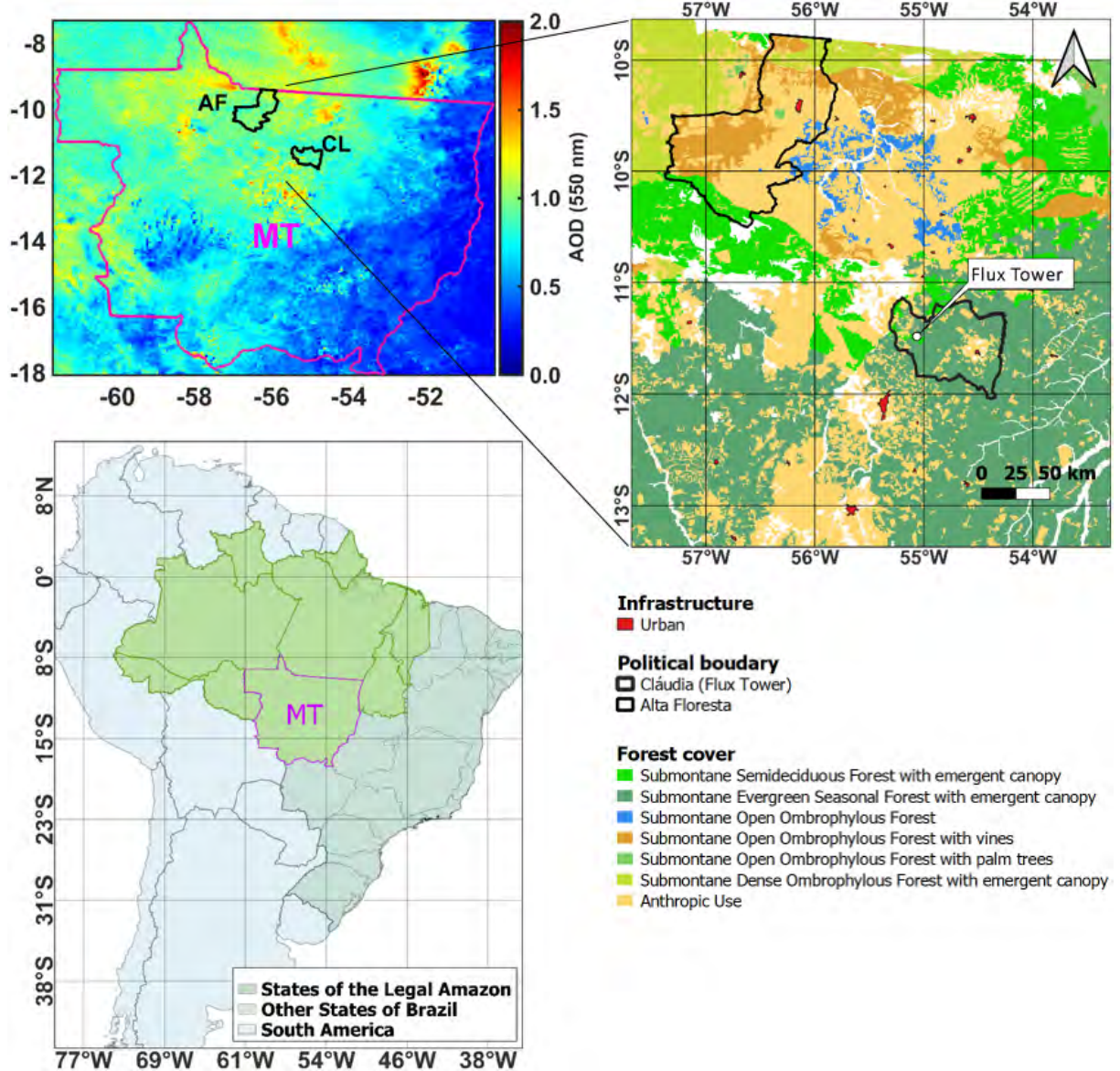


Figura 2.1 – (a) mostra a distribuição regional média de AOD em 550 nm extraído das plataformas Terra(Aqua) - MOD(MYD)04-3K entre 2000-2020 na área estudada; (b) mapa da América do Sul, destacando os limites políticos da região estudada (magenta); (c) mapa de localização da torre micrometeorológica no município de Cláudia, 50 km a nordeste de Sinop, Mato Grosso (ponto branco). As mudanças no uso e cobertura da terra também são mostradas por TerraBrasilis.

aerossóis necessárias para este estudo foram operadas e mantidas pela NASA (National Aeronautics and Space Administration).

Os satélites TERRA/AQUA possuem órbita polar heliosíncrona com Hora Local (LT) de passagem sobre as áreas de estudo em torno de 10h30min e 13h30min. Estas plataformas espaciais cobrem a superfície da Terra a cada 1-2 dias com medições de radiação em 36 bandas espectrais. Os produtos de aerossol MOD/MYD043K também apresentam a coleção de dados mais atual disponível da NASA, atualmente com resolução espacial de 3 km para AOD e outras propriedades ópticas de aerossol (Levy *et al.*, 2013; Remer *et al.*, 2013). Filtros para excluir a contaminação de dados por nuvens também são

aplicados durante o processamento das estimativas. A série AOD desses satélites possui 20 anos de dados sobre continentes e oceanos e está amplamente disponível na plataforma de acesso aberto do Sistema de Distribuição de Arquivos Atmosféricos - Nível 1, localizado no Distributed Active Files Center (LAADS-DAAC) do Goddard Space Flight Center (GSFC), em Greenbelt, Maryland (EUA). Neste trabalho, espacializações AOD de satélite foram utilizadas para obter informações regionais sobre a natureza ou tipo de aerossol atuante na área de estudo, entre 2002-2020 (Figura B.2). Informações mais detalhadas sobre o sensor MODIS, como modelos espectrais, validação e período de operação dos produtos citados podem ser encontradas em (Remer *et al.*, 2005; Remer *et al.*, 2013).

Uma longa série de medições de AOD (> 20 anos de dados) está disponível para a cidade de Alta Floresta no norte de Mato Grosso através de fotômetros solares CIMEL Electronique, mantidos e operados pela NASA (GSFC), através da rede AERONET (1999-2017). Esta rede de fotômetros destina-se ao monitoramento e caracterização de partículas de aerossóis em diversas regiões do mundo. Esses sensores representam a medida padrão de AOD e são amplamente utilizados na validação de estimativas de AOD de satélite. O sistema opera medições de radiação solar e filtros de interferência rotacional para extrair propriedades ópticas de aerossóis em várias bandas espectrais, entre 340-1020 nm (Schafer *et al.*, 2002; Schafer *et al.*, 2002; Procopio *et al.*, 2004; Schafer *et al.*, 2008). Isso permite avaliar em tempo real a influência direta das partículas atmosféricas em regiões altamente afetadas por incêndios, como a região do arco do desmatamento. Neste trabalho, o AOD foi utilizado nos comprimentos de onda de 500 nm (AERONET) e 550 nm (MODIS). Os dados de satélite e de fotômetro cobrem todo o período de dados micrometeorológicos e de fluxo, descritos na próxima seção. Em Alta Floresta, o sistema AERONET também conta com sensores individuais e medições de longo prazo da radiação solar incidente de ondas curtas ($SW_i(t)$), conforme descrito na Tabela 2.1.

2.2.2.2 Medidas Micrometeorológicas

O conjunto de dados de fluxo de CO₂ disponível para esta pesquisa foi amplamente utilizado e citado por estudos anteriores. Informações sobre os sistemas instalados na torre micrometeorológica estão disponíveis diretamente em (Vourlitis *et al.*, 2011). Foi utilizada uma estação meteorológica automática (AWS) para monitorar o clima no município de Cláudia entre junho de 2005 e julho de 2008. A torre implantada segue o padrão do sistema de torres de medição micrometeorológica do Programa LBA (Nagy; Artaxo; Forsberg, 2016; Artaxo *et al.*, 2022). Nesta pesquisa, a torre implantada consiste em um piranômetro, termômetro, psicrômetro, anemômetro, pluviógrafo e um sistema de vórtice turbulento (*eddy-covariance*). Aqui, essas medidas foram utilizadas para representar os fatores biofísicos que afetam as taxas fotossintéticas das florestas. Os dados micrometeorológicos foram medidos a cada 30-60 segundos e armazenados pelos sistemas *data-logger* (CR5000) e (CR-10X), ambos Campbell Scientific, Inc., a partir dos quais foram calculadas as médias horárias (Vourlitis *et al.*, 2011).

O conjunto de dados micrometeorológicos utilizado neste trabalho é o mesmo utilizado no estudo elaborado por (Vourlitis *et al.*, 2011), cujos dados são previamente validados. Detalhes técnicos como precisão, exatidão e calibração podem ser encontrados em (Vourlitis *et al.*, 2011; Moreira *et al.*, 2017). Todas as medições diretas utilizadas estão listadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Lista de variáveis medidas e instrumentação utilizada na torre micrometeorológica (no município de Cláudia-MT) e na estação AERONET, em Alta Floresta-MT. Os *flags* [1], [2] e [3] indicam a instrumentação utilizada na torre de fluxo, sistema AERONET e plataformas espaciais AQUA (TERRA), respectivamente.

Conjunto de Dados		Instrumentação		Atributos	
Medidas	Sensores [sites]	Models, Manuf.	Unidades	Símbolos	Altura
Rad. Solar Incidente	Piranômetro [1]	LI-200SB, LI-COR	Wm^{-2}	$SW_i(t)$	40.0 m
Rad. Fotossint. Ativa	Piranômetro [1]	LI-190SB, LI-COR	Wm^{-2}	PAR_i	41.5 m
Pressão Atmosférica	Barômetro [1]	PTB101B, VSLA	hPa	P_{air}	42.5 m
Temperatura do Ar	Thermohigrômetro [1]	CS215, RMS	$^{\circ}C$	T_{air}	41.5 m
Umidade Relativa	Thermohigrômetro [1]	HMP-35, VSLA	%	RH_{air}	41.5 m
Precipitação	Pluviômetro [1]	GAUGE, MANUAL	mm	PRP	40.5 m
Velocidade do Vento	Anemômetro Sônico [1]	CSAT-3, CSCI	ms^{-1}	US_s	42.0 m
Direção do Vento	Anemômetro Sônico [1]	CSAT-3, CSCI	deg	US_d	42.0 m
Fluxo de CO_2	Sistema Eddy [1]	LI-COR	$\mu mol\ m^{-2}s^{-1}$	FCO_2	42.0 m
Perfil Vertical CO_2	IRGA [1]	LI-820, LI-COR	ppm	$[CO_2]$	1-28 m
Rad. Solar Incidente	Piranômetro [2]	CM21, K&Z	Wm^{-2}	SW_{ia}	–
Prof. Óptica Aerossol	Fotômetro [2]	CIMEL	-	AOD_a	–
Prof. Óptica Aerossol	Modis-Terra [3]	MOD043K	-	AOD_m	–
Prof. Óptica Aerossol	Modis-Aqua [3]	MYD043K	-	AOD_m	–

2.2.2.3 Medidas de fluxo e concentração de CO_2

O sistema *eddy-covariance* tem sido amplamente utilizado para medir o fluxo líquido de CO_2 pelo ecossistema. Este sistema realiza medições por correlação de vórtices turbulentos a partir de um anemômetro sônico e uma câmara de gás infravermelha (*Infrared Gas Analyser, IRGA*), a partir da qual são realizadas medições de fluxo de CO_2 (Carbono), vapor de água (H_2O) e energia (calor sensível - H e calor latente - LE) são determinados em alta frequência, geralmente a 10 Hz. Os dados gerados e registrados pelo sistema *eddy*, são normalmente ajustados por *softwares* de compilação como Alteddy 3.90 (Alterra, WUR, Holanda). Os dados de fluxo de carbono dessas torres micrometeorológicas são apresentados, usando a convenção padrão de sinal consensualmente aceita pela comunidade científica (fluxo negativo indica absorção líquida de CO_2 pelo ecossistema).

2.2.3 Cálculo do NEE e dos efeitos radiativos dos aerossóis

2.2.3.1 Método para determinar a troca líquida de CO_2 no ecossistema

O *NEE* é obtido a partir do sistema *eddy-covariance*. O sistema *eddy* fornece medições de fluxo de CO_2 a 10 Hz a partir de um anemômetro sônico (CSAT-3, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT) integrado com um analisador de gás de caminho aberto (LI-7500, LI-COR Inc., Lincoln, NE). Para o cálculo de *NEE*, o termo de armazenamento $S[CO_2]_p$ é obtido conforme (Aubinet; Vesala; Papale, 2012) e (Araújo *et al.*, 2010). Para o cálculo do termo $S[CO_2]_p$, foram consideradas medidas contínuas da concentração de CO_2 dispostas verticalmente entre o solo e o topo da torre (Vourlitis *et al.*, 2011). Sob estas condições, o *NEE* de CO_2 é aproximado pela Equação (2.1):

$$NEE \approx FCO_2 + S[CO_2]_p \quad (2.1)$$

Onde FCO_2 é denominado fluxo turbulento de CO_2 , calculado pelo sistema *eddy* acima das copas das árvores (Grace *et al.*, 1996; Burba, 2013); $S[CO_2]_p$ é o perfil vertical da concentração de CO_2 ou termo de armazenamento, considerado um termo não turbulento, medido em níveis discretos z , em espessuras Δz_i , desde próximo à superfície do solo até o ponto de medição da covariância dos vórtices turbulentos na torre (Finnigan, 2006; Araújo *et al.*, 2010; Montagnani *et al.*, 2018). Neste trabalho, o perfil vertical $S[CO_2]_p$ foi estratificado em 5 níveis de referência (1, 4, 12, 20 e 28 m) (Vourlitis *et al.*, 2011). Condições diurnas típicas consistem em ventos vetoriais com velocidades de $2,0 \text{ ms}^{-1}$ e $u^* \geq 0,20 \text{ m s}^{-1}$ e direções predominantes SSW e SE. Aproximadamente 72% do fluxo acumulado tem origem dentro de 1 km e a representatividade do fluxo medido de CO_2 (*footprint*) é de aproximadamente 520 m (a montante da torre), seguindo o modelo proposto por (Schuepp *et al.*, 1990). As concentrações $[CO_2]$ foram calculadas seguindo (Aubinet *et al.*, 2001) e (Araújo *et al.*, 2010), conforme relatado por (Vourlitis *et al.*, 2011).

$$S[CO_2]_p = \frac{P_{air}}{RT_{air}} \int_0^z \frac{\partial[CO_2]}{\partial t} dz \quad (2.2)$$

Onde: P_{air} é a pressão atmosférica (Nm^{-2}), R é a constante molar do gás ($\text{Nm mol}^{-1} \text{K}^{-1}$) e T_{air} a temperatura do ar em graus Kelvin (K).

Foi calculado GPP a partir dos dados NEE e estimativas de respiração do ecossistema R_{eco} obtidas no período noturno NEE (informações suplementares), no entanto, as relações entre as propriedades ópticas atmosféricas e NEE foram qualitativos semelhantes quando usado o GPP estimado (Fig. 2.9). Dados os erros potenciais associados na estimativa de GPP e R_{eco} a partir dos dados NEE (Reichstein *et al.*, 2005), foi utilizado valores medidos NEE na análise do impacto dos aerossóis atmosféricos sobre a troca de CO_2 terra-atmosfera.

2.2.3.2 Método para determinar a irradiância solar do céu claro

O termo céu claro foi aqui utilizado para designar a influência mínima de nuvens e aerossóis na radiação solar medida pelo piranômetro. Para estimar as quantidades de radiação solar direta para a superfície sob condições de céu minimamente nublado foram utilizadas as medidas SW_{ia} do sistema AERONET 2.0 (*cloudless*) observadas sob condições de céu limpo, isto é, $AOD \leq 0,10$ (Artaxo *et al.*, 2022), sem plumas de fogo. Nestas condições, obtemos a Equação (2.3); um ajuste polinomial de ordem 4, aqui considerado representativo de todo o espectro solar (Meyers; Dale, 1983). O modelo $S_0(t)$ obtido foi utilizado para derivar os instantes de céu claro na superfície (Figura D.1) entre 07-17h (LT), conforme formulação abaixo:

$$SW_{ia} \{AOD \leq 0.10\} \approx S_0(t) = at^4 + bt^3 + ct^2 + dt + e \quad (2.3)$$

Onde $S_0(t)$ é a irradiância solar de céu claro em função do tempo, em Wm^{-2} . Os parâmetros (a, b, c, d, e) são os coeficientes da curva polinomial e t , o horário, em horas locais (LT). A Figura 2.2 mostra o ciclo diurno médio do SW_{ia} obtido a partir de medições de aerossóis de longo prazo pelo sistema AERONET sob diferentes condições de poluição. O gráfico ilustra a sensibilidade do método aplicado para determinar os níveis de irradiância esperados no dossel da floresta ($S_0(t)$) sob cargas variadas de aerossóis atmosféricos (AOD), curvas C2, C4 e C6. Os marcadores C1, C3 e C5 representam observações médias entre 07h00 e 17h00 usadas para ajustar as curvas C2, C4 e C6.

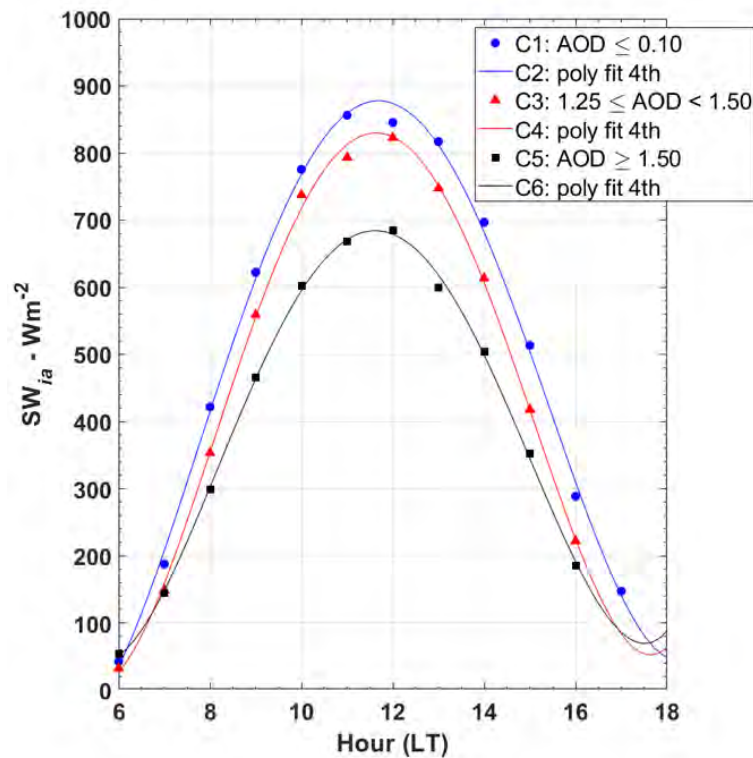


Figura 2.2 – Irradiância solar incidente sob diferentes condições de céu em Alta Floresta (junho de 1997 a março de 2017): céu limpo (pontos C1 e curva C2, $AOD \leq 0,10$), céu poluído (pontos C3 e curva C4, $1,25 \leq AOD < 1,50$ pontos C5 e curva C6, $AOD > 1,50$).

Os métodos utilizados aqui consideraram o banco de dados AERONET (Fig. 2.2). Utilizando a longa série de medições de AOD_a , foi possível obter diferentes curvas $S_0(t)$ para cada mês do ano, considerando as variações sazonais do SW_{ia} dado na Equação (2.3). A Figura D.1 mostra a variação sazonal do ciclo diurno $S_0(t)$ ao longo do ano. Os coeficientes das curvas de ajuste estão listados na Tabela H.1. Para avaliar a consistência do modelo $S_0(t)$, obtido pelo conjunto de dados SW_{ia} (AERONET), comparou-se os resultados calculados pela Equação (2.3) com o modelo de irradiância solar de céu limpo disponível pelo Meteoexploration (SolarCalculator). A Calculadora Solar é um sistema gratuito utilizado para calcular a irradiância solar do céu claro, gerenciado pela Meteo Exploration. A irradiância solar é calculada de acordo com Bird e Hulstrom (1981), atualizado por Corripio (2003). O hiperlink para Calculadora Solar está listado na Tabela I.3.

Também discute-se que o algoritmo não é preciso o suficiente para separar nuvens rasas de plumas de aerossóis orgânicos de queima de biomassa (BBOA). Porém, como as propriedades ópticas das nuvens profundas (Pardo *et al.*, 2020) diferem das do aerossol, é possível distingui-las porque o padrão de sombreamento é notavelmente diferente (Doughty; Flanner; Goulden, 2010). Por exemplo, nuvens mais profundas geralmente produzem $PAR(D)_F \sim 1$ (unidade), enquanto cargas altas de BBOA são geralmente inferiores a < 1 (unidade). Nestas condições, o parâmetro f pode ser usado como um indicador sensível da presença/entrada de aerossóis (Gu *et al.*, 2003; Jing *et al.*, 2010) mas não para detectar nuvens rasas (translúcidas). Na prática, as incertezas para os efeitos radiativos dos aerossóis no NEE são maiores quando $PAR(D)_F$ está próximo da unidade. Assim, nosso algoritmo não pode afirmar a completa ausência de nuvens, mas é um indicador qualitativo crucial

de aerossóis na atmosfera quando os fotômetros solares não estão prontamente disponíveis.

2.2.3.3 Determinação da irradiância relativa

Em termos práticos, a irradiância relativa f expressa a relação entre a radiação solar incidente e aquela observada na superfície sob céu claro ($AOD \leq 0,10$) e sem nuvens ($f \geq 1,0$). É um parâmetro que indica a presença de plumas de poluição com aerossóis que dispersam radiação solar e nuvens, geralmente utilizado em áreas sem instrumentação direta de nuvens. Este parâmetro tem sido considerado um indicador-chave na detecção de nuvens e plumas de poluição provenientes de queimadas na Amazônia (Gu *et al.*, 2001; Oliveira *et al.*, 2007; Cirino *et al.*, 2014). Para tanto, as quantidades observadas de $SW_i(t)$ no dossel da floresta são normalizadas pela irradiância $S_0(t)$, determinando assim o quociente f (um parâmetro adimensional), de acordo com a Equação 2.4. Também é destacado que valores de f podem assumir valores tão grandes quanto 1,2-1,3 ($f \sim 20-30\%$), normalmente devido ao chamado “efeito lacuna na nuvem” (Duchon; O’Malley, 1999; Gu *et al.*, 2001). Ainda não há consenso de valores na literatura a respeito. Este termo denota o aumento da irradiância da superfície induzido pela nuvem. Em geral, existem múltiplos espalhamentos da radiação solar pelas nuvens ao redor da área de estudo, mas ainda fora do ângulo de visão do Piranômetro. Isso será visto com mais detalhes em algumas seções a seguir.

$$f = \frac{SW_i(t)}{S_0(t)\{AOD_a \leq 0.10, \text{cloudless}\}} \quad (2.4)$$

Onde: $SW_i(t)$ é a irradiância solar incidente total medida pelo piranômetro (Wm^{-2}) sob qualquer atmosfera e $S_0(t)$ é a irradiância solar do céu claro (Wm^{-2}) sobre uma superfície plana perpendicular aos raios solares, sem o atenuante efeitos da atmosfera (nuvens e queimadas) para um determinado tempo e local, ou seja, $AOD_a \leq 0.10$ (*cloudless*). Valores próximos de zero representam condições de céu nublado e/ou esfumado, e valores próximos da unidade representam condições de céu claro (Gu *et al.*, 1999; Oliveira *et al.*, 2007; Jing *et al.*, 2010; Cirino *et al.*, 2014; Gao *et al.*, 2021).

Aqui, utiliza-se f como base de comparação para detectar a presença conjunta de nuvens e aerossóis de incêndios na área de estudo, uma vez que o local experimental não possui instrumentação para observação direta da cobertura de nuvens. A obtenção deste parâmetro é extremamente importante porque ao usar a radiação solar de céu claro como base, a radiação solar medida sob céu nublado torna-se uma nova métrica para observação de nebulosidade. Esta variável será comparada com o *NEE* para avaliar as respostas fotossintéticas do ecossistema às variações do ambiente externo.

2.2.3.4 Determinando o índice de claridade

Para determinar o índice de claridade, aqui denominado kt , a irradiância solar extraterrestre S_{ext} foi primeiro calculada dependendo apenas dos parâmetros orbitais. O índice kt é um coeficiente de proporcionalidade entre as medidas de radiação solar direta à superfície e S_{ext} e expressa a radiação solar direta transmitida na atmosfera (Gu *et al.*, 1999; Cirino *et al.*, 2014). Numa primeira aproximação, kt indica a transmissividade; o grau de transparência da atmosfera à radiação solar em um determinado momento e local, enquanto f é um parâmetro de comparação mais sensível à presença de aerossóis e nuvens espalhadores de radiação. Aqui, kt e SZA foram usados como preditores do componente difuso da radiação (Gu *et al.*, 1999; Cirino *et al.*, 2014). Para o cálculo da irradiância S_{ext}

também são necessários alguns parâmetros e variáveis como a constante solar da Terra (S_{ext}^t), a latitude do local (φ), declinação solar (δ), ângulo horário (h) e distância quadrada média entre a Terra e o Sol (Gates, 1980). A determinação de S_{ext} considera o ângulo de incidência dos raios solares e, portanto, as variações nas quantidades de radiação solar na superfície, moduladas pelo SZA . Sob estas condições, kt pode ser expresso conforme a Equação (2.5):

$$kt = \frac{SW_i(t)}{S_{ext}} \quad (2.5)$$

Onde $SW_i(t)$ é a radiação de ondas curtas medida pelo piranômetro (Wm^{-2}) (Tabela 2.1) e S_{ext} é a irradiância solar extraterrestre (Wm^{-2}) estimada em uma superfície perpendicular aos raios solares, sem os efeitos atenuantes da atmosfera para um determinado tempo e local, expressa conforme a Equação 2.6:

$$S_{ext} = S_{ext}^T \left(\frac{\bar{D}}{D} \right)^2 \times \cos(z) \quad (2.6)$$

Nesta equação S_{ext}^T é a constante solar da Terra ($\approx 1367 Wm^{-2}$), \bar{D} é a distância média Terra-Sol ($\sim 1,49 \times 10^6 km$), D é a distância Terra-Sol em um determinado dia juliano, e $\cos(z)$ o cosseno do ângulo solar zenital (SZA), calculado conforme proposto por (Bai et al., 2012). Este índice calculado foi utilizado para estabelecer a radiação solar difusa, conforme descrito em detalhes na próxima seção.

2.2.3.5 Determinação da radiação PAR difusa

Para determinar a componente difusa do PAR total ($PAR(D)$), adotou-se os procedimentos de Spitters; Toussaint; Goudriaan (1986) e Reindl; Beckman; Duffie (1990), amplamente utilizados na literatura quando não há medidas diretas de radiação $PAR(D)$ (Gu et al., 1999; Jing et al., 2010; Zhang et al., 2010; Bai et al., 2012). O cálculo detalhado pode ser encontrado no realizado por Gu et al. (1999). A estimativa é realizada derivando a radiação PAR difusa de acordo com a formulação abaixo (Spitters; Toussaint; Goudriaan, 1986).

$$PAR(D) = \left[\frac{1 + 0.3(1 - q^2)q}{1 + (1 - q^2)\cos^2(90 - z)\cos^3(z)} \right] \times PAR_i \quad (2.7)$$

Onde $PAR(D)$ é a incidência do fluxo de radiação PAR difuso (total) ($\mu mol \text{ fóton } m^{-2}s^{-1}$), na faixa do infravermelho próximo, em um plano horizontal em relação à superfície da Terra, enquanto q é um coeficiente de proporcionalidade usado para denotar a razão entre a radiação difusa total e uma determinada quantidade de irradiância (SW_i) na superfície, sob um dada condição do céu (Wm^{-2}). O parâmetro q é expresso considerando faixas de variação do índice kt (Gu et al., 1999). Para expressar a fração difusa da radiação PAR ($PAR(D)_F$) utilizou-se a relação entre $PAR(D)$ e PAR_i (Spitters; Toussaint; Goudriaan, 1986). Na ausência de medições diretas da radiação solar difusa, os procedimentos relatados por estes autores ainda são amplamente utilizados (Jing et al., 2010; Cirino et al., 2014; Moreira et al., 2017).

2.2.3.6 Determinando a eficiência de uso da luz

Outro parâmetro importante neste estudo é a eficiência do uso da luz (LUE), que expressa a eficiência do uso da luz nos processos fotossintéticos pela copa. É definido como a razão entre NEE e PAR_i . Vários outros procedimentos foram usados para aproximar o LUE ; alguns utilizam o coeficiente de proporcionalidade entre a radiação NEE e $PAR(D)$ (Moreira *et al.*, 2017), e outros utilizam a medição de temperatura diretamente na folha das árvores (LI-COR) para capturar a resposta fotossintética como uma função da variação da intensidade luminosa (Doughty; Flanner; Goulden, 2010). Códigos de transferência radiativa do dossel com parametrização física validada para diferentes tipos de folhas também são utilizados (Mercado *et al.*, 2009). Aqui, por questões práticas, foi utilizado procedimentos aplicados por (Jing *et al.*, 2010) e (Cirino *et al.*, 2014), conforme a Equação (2.8), onde LUE é dado em valores percentuais.

$$LUE \cong \frac{NEE}{PAR_i} \quad (2.8)$$

Também foi realizado o mesmo procedimento com GPP , mas como mencionado acima nossos resultados com GPP foram qualitativamente semelhantes aos obtidos usando NEE . Como NEE foi medido diretamente com apenas a avaliação LUE foi calculada a partir de NEE .

2.2.3.7 Determinação da temperatura do dossel foliar

Foi Utilizado a parametrização proposta por (Tribuzy, 2005) para estimar a temperatura do dossel foliar LC_T , obtida a partir de experimentos de campo realizados na Amazônia central, localizada a aproximadamente 60-70 km NW do centro de Manaus-AM. Medições de temperatura por termopares nas folhas forneceram uma relação estatística significativa PAR_i e RH_{air} durante as estações seca (julho-agosto/2003) e chuvosa (dezembro de 2003 a fevereiro de 2004). A equação final obtida é expressa em função da umidade relativa do ar (RH_{air}) e da radiação PAR_i , válida para as estações seca e chuvosa (equação 2.9).

$$LC_T = [(2.48 \cdot 10^{-6}(RH_{air})^2 - 1.82 \cdot 10^{-4}(RH_{air}) - 1.83 \cdot 10^{-6}(PAR_i) + 0.0363)]^{-1} \quad (2.9)$$

Onde LC_T é a temperatura foliar do dossel ($^{\circ}C$), PAR_i e RH_{air} são radiação fotossinteticamente ativa ($\mu mol m^{-2}s^{-1}$) e umidade relativa (%), respectivamente. Devido às incertezas e limitações (equação 2.9), foi utilizado um método alternativo baseado na equação de Stefan-Boltzmann (Equação E.1), seguindo (Doughty; Flanner; Goulden, 2010) e (Cirino *et al.*, 2014) (Figs. E.1 e E.2), com resultados discutidos em (2.2.3.7).

2.2.3.8 Determinação do NEE de céu claro

O NEE observado em dias claros ($AOD < 0,1$ e claro) também foi utilizado como base para comparação de dias com alta carga de aerossóis. A Figura 2.3 ilustra o comportamento do NEE sob condições de céu claro ($f \approx 1,0$) entre 07-17h (LT). Os ajustes polinomiais obtidos são usados para determinar o $NEE_0(sza)$ em função das variações de SZA para cada mês do ano entre junho de 2005 e julho de 2008 (Fig. 2.3). Foi listado os coeficientes da curva na Tabela H.2. As curvas estimadas e sua qualidade de ajuste são consistentes com o comportamento observado em estudos anteriores (Gu *et al.*, 1999; Cirino *et al.*, 2014). A equação 2.10 foi utilizada para estimar $NEE_0(sza)$ ao longo do ano,

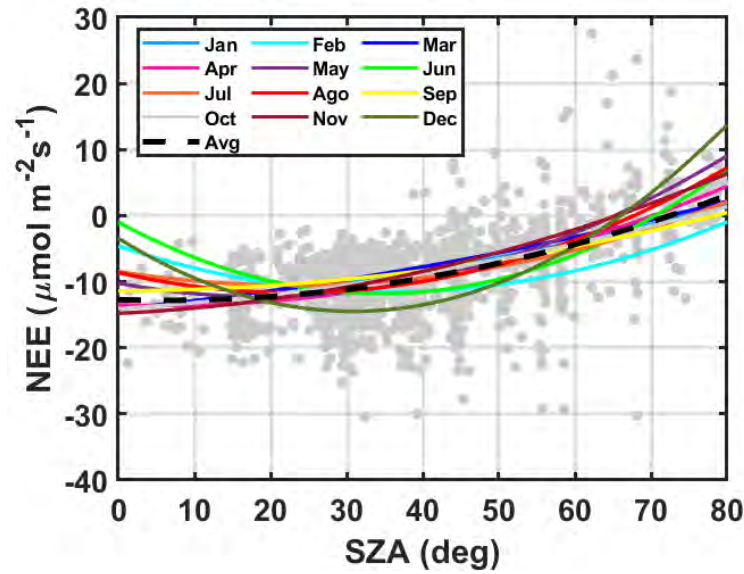


Figura 2.3 – Mostra as alterações mensais do NEE como uma função sza para condições de céu limpo ($f_{zsim} 1,0$) das 07 às 17h (LT), entre junho de 2005 e julho de 2008. Os coeficientes das curvas ajustadas $NEE_0(sza)$ foram listados na Tabela H.2. A linha pontilhada preta é a curva média anual $NEE_0(sza)$.

considerando as mudanças sazonais de fatores biofísicos como radiação solar, deduidade, estresse hídrico e térmico, que podem adicionar ruído dependente do tempo ao modelo ajustado. A figura D.2 mostra mudanças sazonais no $NEE_0(sza)$ (ciclo médio horário).

$$NEE_0(sza) = p_1 SZA^2 + p_2 SZA + p_3 \quad (2.10)$$

Onde $NEE_0(sza)$ é o NEE normalmente encontrado em dias de céu claro ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Os parâmetros p_1 , p_2 e p_3 são os coeficientes da curva polinomial e iguais a 0,0038, $-0,99$ e -12 , respectivamente.

Assim como f , $\%NEE$ foi aqui utilizado aqui como base de comparação para os valores máximos negativos observados durante o período de estudo, assumindo a ausência de estresse hídrico e deficiência de nutrientes (Gu *et al.*, 1999; Oliveira *et al.*, 2007; Doughty; Flanner; Goulden, 2010; Cirino *et al.*, 2014).

Mudanças observadas em NEE versus NEE sob condições de céu claro foram usadas para determinar o efeito percentual dos aerossóis em NEE . O $\%NEE$ foi calculado pela seguinte relação (Bai *et al.*, 2012; Gu *et al.*, 1999; Oliveira *et al.*, 2007):

$$\%NEE = \left(\frac{NEE(sza) - NEE_0(sza)}{NEE_0(sza)} \right) \times 100 \quad (2.11)$$

Para eliminar a interferência do ângulo de elevação solar na análise de mudanças em $\%NEE$ versus f , os dados foram agrupados em intervalos SZA de 20-25°. Este intervalo foi pequeno o suficiente para minimizar os efeitos da elevação solar durante o dia e representar mudanças em NEE em função de f em resposta apenas a aerossóis e/ou nuvens. Esse intervalo também garantiu tamanho amostral suficiente para análises estatísticas. Intervalos SZA menores que 15° reduziram significativamente o tamanho da amostra, impossibilitando o desenvolvimento de uma análise estatística robusta (Gu *et al.*, 1999). Valores acima

de 50 ou em torno de 0 (ângulos solares muito próximos do plano horizontal e vertical, respectivamente) foram, em geral, muito contaminados por nuvens (Gu *et al.*, 1999; Cirino *et al.*, 2014).

2.2.4 Procedimentos de análise dos dados

Foram desenvolvidas rotinas computacionais para compilação, certificação, organização e análise das variáveis apresentadas na Tabela 2.1. Foram Realizados ajustes de curvas e cálculos matemáticos ou estatísticos com os pacotes disponíveis em (MATLAB, 2013).

Para controle de qualidade dos dados, foram excluídos do banco de dados valores não físicos, fora dos níveis aceitáveis, totalizando uma perda de $\sim 3\%$ do conjunto amostral (aproximadamente 3.600 pontos amostrados). Foram excluídos valores máximos e mínimos inesperados para a região, por exemplo, valores abaixo e acima de 20 e 40 °C, 40 e 95%, -40 e $+40$ ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), 0 e 1000 (Wm^{-2}) e entre 0 e 3000 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), respectivamente, para T_{air} , RH_{air} , FCO_2 , $\text{SW}_i(t)$ e PAR_i . A análise dos dados consiste em três etapas fundamentais: (1) variação da radiação solar com a profundidade óptica AOD_a analisada em função da irradiância f ; (2) efeitos de aerossóis e nuvens na troca líquida de CO_2 na interface floresta-atmosfera e, finalmente, (3) quantificação do desempenho fotossintético em função das cargas de poluição, e análise de como a poluição afetou valores biológicos críticos ou ótimos para fatores ambientais como T_{air} , LC_T e VPD (Déficit de pressão de vapor). O desempenho fotossintético, em todos os casos, é analisado em função de NEE . Ao final, a variação líquida percentual da atividade fotossintética da floresta ($\%NEE$) é avaliada em função da irradiância f . A regressão não linear foi utilizada para determinar relações funcionais entre NEE e outras variáveis de radiação. As relações encontradas são avaliadas a partir da correlação de Poisson e tabuladas em termos de parâmetros estatísticos descritivos básicos como coeficiente de determinação (R^2) e nível de significância (P_{valor}) com margem de confiança de 95%. Estatísticas descritivas básicas também são aplicadas aos dados para obter valores médios, medianas, percentis e desvios padrão para as variáveis medidas e estimadas. A Tabela 2.2 lista variáveis indiretas, calculadas a partir do conjunto de dados listado na Tabela 2.1.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Ciclo diário médio da troca líquida de CO_2

O padrão diário médio de NEE observado em 2005-2008 (Figura 2.4) segue o padrão típico de florestas tropicais (Gu *et al.*, 1999; Niyogi *et al.*, 2004; Randow *et al.*, 2004; Araújo *et al.*, 2010; Vourlitis *et al.*, 2011). A Figura 2.4 mostra fluxos negativos máximos médios $-13,7 \pm 6,2 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, em torno de 10-11h (LT), e os fluxos positivos máximos são em média $+6,8 \pm 5,8 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, durante o período noturno entre 19h e 05h (LT). Foi observado uma ligeira diferença no padrão do ciclo diário do NEE entre as estações chuvosa e seca (Figura 2.4), com mudança (um avanço) no pico de absorção de CO_2 da estação chuvosa a seca, de cerca de 12 h (LT) a 10h (LT), respectivamente (Figura 2.4). As estimativas de absorção de CO_2 foram cerca de 10-15% menores (ou seja, menos negativas) durante ambas as temporadas ($< 0,6 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), quando comparado com (Vourlitis *et al.*, 2011). A hipótese é que variações sazonais na disponibilidade de água, nutrientes, radiação temperatura, VPD e poluição são contrabalançadas ao longo do ano, produzindo um comportamento sazonal médio sem diferentes significativas em NEE .

Tabela 2.2 – Lista de variáveis indiretas (calculadas), símbolos e unidades de medida de grandezas derivadas de acordo com a literatura citada.

Medidas Indiretas	Símbolos	Unidades	Literatura
Troca Líquida de CO ₂	NEE	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	(Vourlitis <i>et al.</i> , 2011)
Produtividade Primária Bruta	GPP	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	(Wutzler <i>et al.</i> , 2018)
Respiração do Ecossistema	R_{eco}	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	(Wutzler <i>et al.</i> , 2018)
Deficit de Pressão do Vapor	VPD	hPa	(Vourlitis <i>et al.</i> , 2011)
Irradiância Solar de céu claro	$S_0(t)$	Wm^{-2}	(Author)
Ângulo Solar Zenital	SZA	Graus	(Bai <i>et al.</i> , 2012)
Irradiância Relativa	f	-	(Cirino <i>et al.</i> , 2014)
Índice de claridade	kt	-	(Gu <i>et al.</i> , 1999)
Irradiância Solar Extraterreste	S_{ext}	Wm^{-2}	(Gu <i>et al.</i> , 1999)
Radiação PAR Difusa	$PAR(D)$	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	(Gu <i>et al.</i> , 1999)
Fração PAR Difusa	$PAR(D)_F$	-	(Gu <i>et al.</i> , 1999)
Eficiência de uso da Luz	LUE	-	(Jing <i>et al.</i> , 2010)
Temperatura do dossel foliar	LC_T	°C	(Tribuzy, 2005)
Troca NEE de céu claro	$NEE_0(sza)$	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	(Autor)
Troca Relativa de NEE	$\%NEE$	%	(Autor)

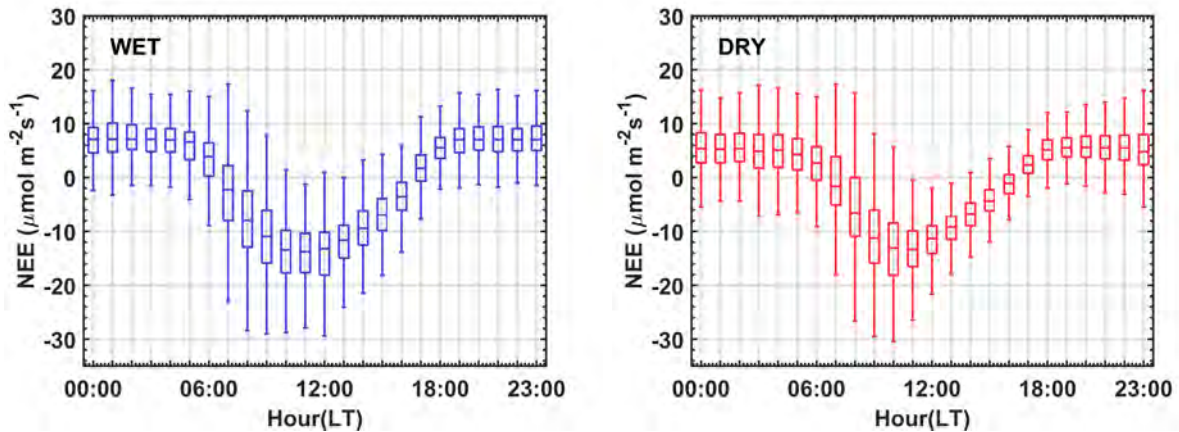


Figura 2.4 – NEE ciclo horário médio entre junho/2005 e julho/2008, durante as estações chuvosa (a) e seca (b) para a floresta semidecídua do município de Cláudia. Nenhum filtro é aplicado. O NEE é apresentado para quaisquer condições de céu durante o ano. Foi utilizado o box plot para representar a distribuição dos dados de fluxo de CO₂. As barras verticais são os valores máximo e mínimo. Os limites inferior e superior das caixas representam, respectivamente, os percentis 25 e 75, enquanto as linhas horizontais azuis e vermelhas representam a mediana dos dados de fluxo de CO₂

Além disso, diferentes abordagens em ambos os estudos também podem explicar as diferenças, ou seja, análises realizadas em diferentes escalas de tempo. Por exemplo (Vourlitis *et al.*, 2011) relatou valores médios de NEE de CO₂ de séries temporais diárias e mensais. Variações mensais semelhantes, com magnitudes mais negativas durante o dia nos meses chuvosos ($-9,0 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, entre novembro-fevereiro) e menos negativas durante as horas de luz nos meses secos ($-7,7 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, entre maio-agosto) foram observadas. O equilíbrio geral do NEE revelou absorção líquida de carbono de $-0,12 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e $-0,18$

$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ durante as estações chuvosa e seca, respectivamente. As taxas máximas de fotossíntese e respiração da copa das folhas foram observadas em outubro-novembro, sendo os primeiros meses da estação chuvosa.

2.3.2 A influência dos aerossóis na radiação solar de ondas curtas

O impacto das partículas de aerossol por incêndios no fluxo SW_i é avaliado em função de f , AOD_a , SZA , $\text{PAR}(D)_F$ e PAR_i . A Figura 2.5 (a) mostra o comportamento da irradiância relativa f para diferentes níveis de poluição AOD_a , nas faixas SZA entre $20\text{-}50^\circ$. Uma relação próxima e estatisticamente significativa entre f e AOD_a é observada com valor $p < 0,01$ e um coeficiente de determinação R^2 de cerca de aproximadamente 0,92 (Tabela 2.3). Observa-se uma relação aproximadamente linear em que f diminui cerca de 40-60% quando o AOD_a varia de 0,10 a 5,0. Não foi observada diferença estatisticamente significativa entre os períodos da manhã e da tarde. Há apenas um ligeiro aumento de $\approx 5\text{-}20\%$ (em média) no valor de f entre o final da manhã e a tarde, atribuído aqui ao espalhamento múltiplo da radiação solar devido à formação de nuvens perto da torre (Gu *et al.*, 2001). Para ângulos SZA entre 20 e 50° , há uma forte redução nas quantidades de SW_i ($225 \pm 50 \text{ Wm}^{-2}$) associadas principalmente com o aumento da concentração de aerossóis emitidos por incêndios locais ou transportados regionalmente durante a época de queimadas. (Oliveira *et al.*, 2007) e (Cirino *et al.*, 2014) relataram resultados cerca de 2-3 vezes menores para reduções de 20-30% em f e aumento de AOD de 0,1 para 0,8, na FLONA-Tapajós (Santarém-PA) e Amazônia central (K34), em Manaus-AM.

A Figura 2.5 (b) mostra a fração de radiação difusa calculada em função de AOD_a , com estreita relação estatística observada ($R^2 = 0,98$ e $0,96$) para nos horários da manhã e da tarde (Tabela 2.3). Devido à redução nos fluxos instantâneos de SW_i , observa-se um aumento de cerca de 85% na radiação difusa quando o AOD_a aumenta de 0,10 para 5,0. Esses resultados são consistentes com estudos anteriores realizados na Amazônia brasileira (Doughty; Flanner; Goulden, 2010; Cirino *et al.*, 2014; Rap, 2015; Moreira *et al.*, 2017; Malavelle *et al.*, 2019; Bian *et al.*, 2021) e em todo o mundo (Niyogi *et al.*, 2004; Jing *et al.*, 2010; Rap, 2015; Rap *et al.*, 2018) e revelam-se particularmente importantes devido à capacidade do $\text{PAR}(D)$ de penetrar com mais eficiência na copa das folhas e, sob certas condições, aumentar a absorção de carbono pelo ecossistema.

Tabela 2.3 – Ajustes polinomiais (Figura 2.5), coeficientes e estatísticas para os períodos matutino e vespertino na torre micrometeorológica de Cláudia-MT (2005-2008). R^2 é o coeficiente de correlação, ΔSW_i é a quantidade de radiação de ondas curtas incidente e STD é o desvio padrão.

Configurações		Período	Coeficientes			Estatísticas	
Função Polinomial		Hora Local	a	b	c	R^2	ΔSW_i (STD)
f	poly fit 1st	07-12h	-0.11	0.95	-	0.92	-200 (± 50)
	-	12-17h	-0.13	1.10	-	0.92	-250 (± 80)
$\text{PAR}(D)_F$	poly fit 2nd	07-12h	-0.023	0.27	0.20	0.98	-97 (± 30)
	-	12-17h	-0.034	0.25	0.42	0.90	-118 (± 42)

2.3.3 A influência dos aerossóis na radiação difusa

A Figura 2.6 mostra o comportamento das radiações PAR_i e $\text{PAR}(D)$ em função de f e SZA . Para reduções em f de $\approx 40\%$ (f variando de 1,0 a 0,6) houve fortes reduções em PAR_i ($\sim 750 \mu \text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) e um aumento correspondente de 55% na radiação difusa

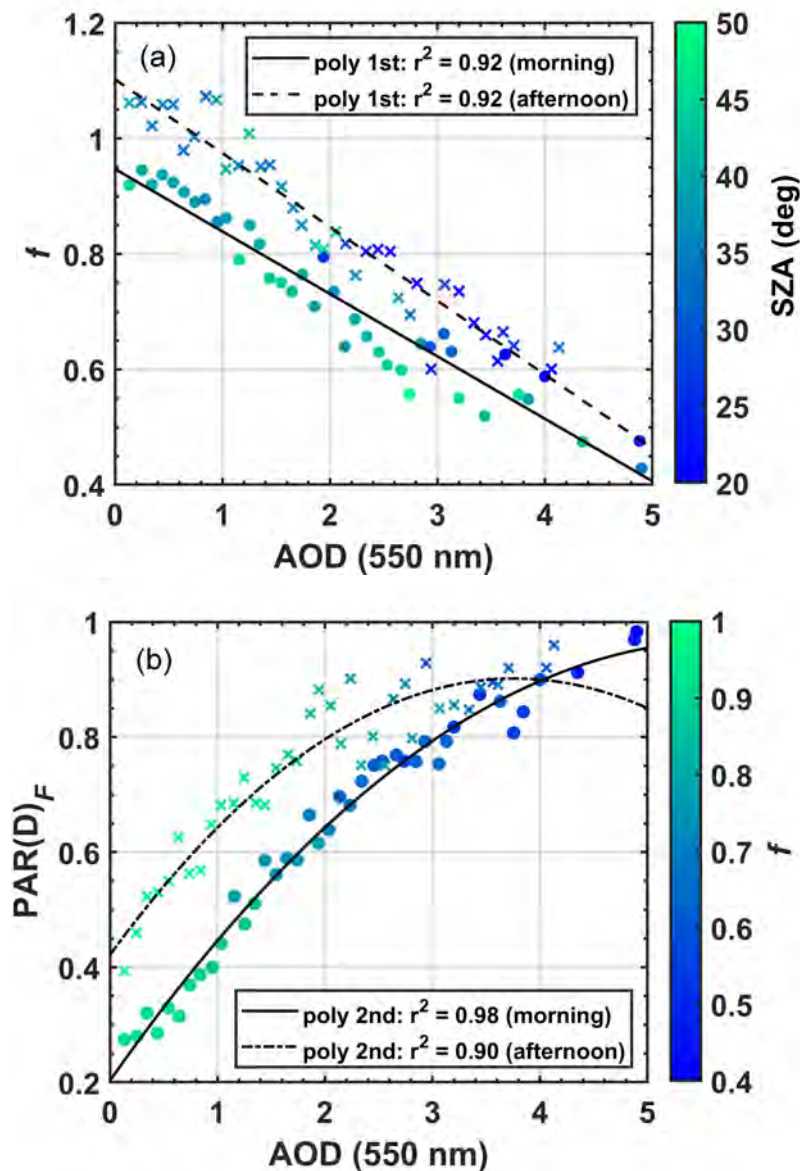


Figura 2.5 – Correlação 3D entre f e $PAR(D)_F$ com aumento de AOD_a para diferentes valores SZA (a) e irradiância f (b) em floresta semidecídua na região de Cláudia, município a 50 km a nordeste de Sinop-MT (2005-2008). As médias são apresentadas como pontos agrupados (bin), quantificados e determinados em termos de desvio padrão (STD) para cada bin mostrado em Tabela 2.3.

$PAR(D)$ ($\sim 600 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) entre julho e dezembro. Esses números indicam uma forte redução no PAR_i à medida que os níveis de poluição aumentam e mudam de condições de céu claro ($AOD \leq 0,10$, $f \sim 1,0$) para condições de céu esfumado em aerossol de incêndios ($AOD \gg 0,1$; $f \ll 1,0$). Figura 2.6 mostra uma diminuição quase linear entre PAR_i e f , enquanto o comportamento de $PAR(D)$ e f não apresenta um comportamento linear (Figura 2.6b).

Os ajustes polinomiais, coeficientes e pontos de inflexão são exibidos na Tabela 2.4. $PAR(D)$ atinge valores máximos ($779\text{-}1080 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) para f entre 0,63 e 0,66 (reduções de 37-34%) para intervalos SZA ($20\text{-}40^\circ$). Como será visto abaixo, estes valores são considerados críticos para taxas máximas de absorção de CO_2 (máximo-negativo NEE). As variações negativas em f também sugerem alta carga poluidora para incêndios no local

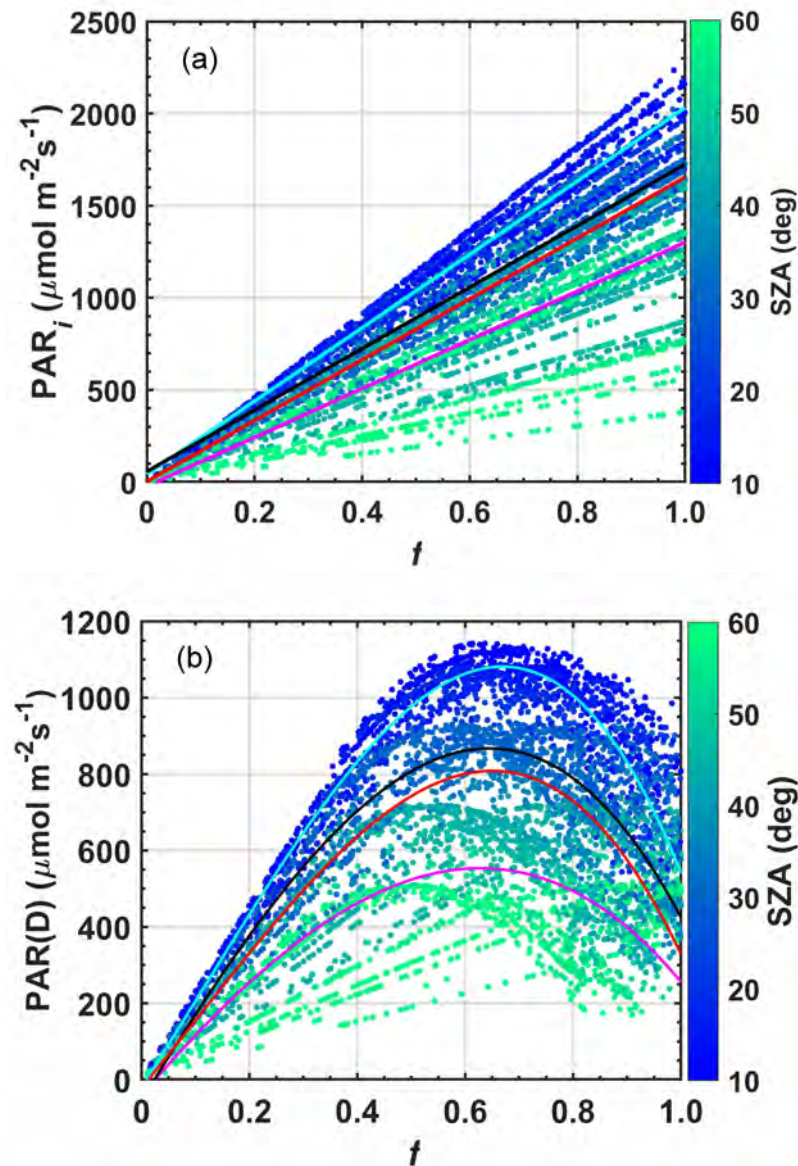


Figura 2.6 – Correlação 3D entre f , PAR_i (a) e $PAR(D)$ (b) para diferentes valores SZA . As linhas azul, preta, magenta e vermelha são as curvas polinomiais ajustadas às faixas de variação analisadas do SZA , respectivamente iguais a $0-20^\circ$, $20-40^\circ$, $40-60^\circ$ e $0-60^\circ$, em floresta semidecídua no Município de Cláudia, 50 km a nordeste de Sinop-MT (2005-2008).

($AOD \gg 0.10$) produzindo reduções estatisticamente significativas de até 35% no fluxo de radiação PAR (Figs. 2.6a e 2.5a) e um aumento de 50% em $PAR(D)_F$ (Figs. 2.6b and Fig. 2.5b).

Para $SZA < 40^\circ$, observam-se as maiores taxas de variação $PAR(D) f^{-1}$, indicando a entrada/presença de plumas-poluição e nuvens sobre o piranômetro da torre de medição. Tabela 2.4 mostra um ligeiro deslocamento dos pontos de inflexão (Cp) para valores menores de f ($\sim 1.0-0.60$), bem como um aumento acentuado no $PAR(D)$ (50%, $\sim 400-500 \mu\text{mol foto.m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Esses resultados estão provavelmente ligados à maior espessura óptica da atmosfera no início e no final do dia e à maior concentração de aerossóis (BBOA). Aqui, levanta-se duas hipóteses razoáveis: (1) menor CLP (Camada Limite Planetária) favorece maior concentração de BBOA sobre a copa das árvores, geralmente entre 06-

09h LT ($SZA < 75^\circ$); (2) Camada Limite Planetária (CLP) mais espessa, proporciona nuvens mais profundas e maior sombreamento no dossel (Oliveira *et al.*, 2020), além de favorecer a dispersão de incêndios (Nepstad *et al.*, 2014), intensificando a concentração de BBOA no local por advecção ou transporte regional de partículas (Figura 2.1, B.2, C.1 e C.2). Para um determinado período do ano, sob condições meteorológicas estáveis, o BBOA pode explicar alterações no PAR(D), pelo menos numa base horária, especialmente entre maio e outubro, quando a evapotranspiração é maior que a precipitação ($ET > PRP$) (Vourlitis *et al.*, 2002; Vourlitis *et al.*, 2011) e a fração de cobertura de nuvens mais profunda é frequentemente menor. Nos demais meses do ano, nuvens e aerossóis se misturam, produzindo efeitos radiativos inseparáveis, considerando nossa instrumentação e conjunto de dados disponíveis no local estudado.

O aumento de 50% em $PAR(D)$ pode ser atribuído principalmente às partículas espalhadoras de radiação (BBOA), especialmente durante a estação seca (Shilling *et al.*, 2018; Sá *et al.*, 2019) e mesmo à cobertura de nuvens. Nas temporadas de incêndios, cerca de 80% do BBOA é composto de partículas finas $PM_{2,5}$ (Bian *et al.*, 2021) das quais 10% é BC (Carbono Negro) e BCr (Carbono Marrom), ambos Albedo de Espalhamento Único (SSA) e AOD podem ser afetados. Em geral, essas partículas têm o potencial de aquecer a atmosfera (absorção maior que a reflexão), produzindo valores que podem estar acima dos limites fisiológicos ideais do ecossistema, influenciando as taxas de absorção de CO_2 (máximo-negativo NEE). Também é possível uma mistura de outros tipos de partículas provenientes de transporte de longo alcance com propriedades químicas complexas, por exemplo, aerossóis urbanos e BBOA africano (Sá *et al.*, 2019; Holanda *et al.*, 2023).

Tabela 2.4 – Ajustes polinomiais (Figura 2.6), coeficientes e estatísticas para os períodos matutino e vespertino na torre micrometeorológica de Cláudia-MT (2005-2008). $C_p(x_v, y_v)$ é o ponto crítico da curva de ajuste, onde a derivada é igual a zero.

Configurações		Ângulos	Coeficientes				Estatística	
Função Polinomial		SZA	a	b	c	d	R^2	$C_p(x_v, y_v)$
PAR_i	poly 1st	0-20°	$+1.5 \times 10^3$	+56			0.92	
		20-40°	$+2.0 \times 10^3$	+41			0.86	
		40-60°	$+1.7 \times 10^3$	+57			0.64	
		0-60°	$+1.3 \times 10^3$	-23			0.67	
PAR_D	poly 3rd	0-20°	-2.5×10^3	$+8.4 \times 10^2$	$+2.2 \times 10^3$	-19	0.92	(0.66, 1080)
		20-40°	-1.3×10^3	-5.6×10^2	$+2.3 \times 10^3$	-56	0.66	(0.63, 846)
		40-60°	-6.4×10^2	-7.0×10^2	$+1.6 \times 10^3$	-41	0.42	(0.61, 529)
		0-60°	-2.0×10^3	$+5.8 \times 10^2$	$+1.7 \times 10^3$	-22	0.40	(0.63, 779)

2.3.4 O efeito indireto dos aerossóis na eficiência de uso da luz pela floresta

Houve uma variação mensal bem definida de AOD_a , conforme mostrado nas seções anteriores. Sendo os incêndios a principal causa de alterações na composição física e química da atmosfera ao longo do ano (Martin *et al.*, 2010b; Martin *et al.*, 2010; Artaxo *et al.*, 2013; Artaxo *et al.*, 2022), foram encontradas reduções estatisticamente significativas para o SW_i e PAR_{ev} . Esta seção avalia principalmente os níveis ótimos de PAR_i , bem como os efeitos das mudanças na eficiência do uso da radiação solar pela floresta ($LUE \approx NEE/PAR_i$).

As análises são realizadas em função da radiação $PAR(D)$, a partir da qual é determinada a máxima eficiência de uso da luz para a floresta semidecídua estudada. Sob condições de céu esfumado ($AOD \gg 0,10$), a assimilação de carbono aumenta gradualmente com o aumento do PAR_i atingindo a saturação máxima por volta de 1550 e 1870 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ na faixa entre 20-50° SZA , valores para os quais o máximo NEE (negativo) é aproximadamente $-23 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Sob condições de céu limpo, considerando a mesma faixa de SZA , o máximo negativo NEE é cerca de $-18 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, o que ocorre com um PAR_i de 2100-2300 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Fig. 2.7a). Para complementar esta análise, o fluxo LUE normalizou por $PAR(D)_F$ durante dias com alta carga de aerossóis na estação de queimadas (Fig. 2.7b). Nessas condições, a floresta atinge fluxos máximos de NEE em dias de fumaça e não sob condições de céu claro. Os resultados revelam que são necessárias menores quantidades de energia para que a floresta atinja a saturação máxima em dias não poluídos. As análises apresentadas na Fig. 2.7 confirmam maior eficiência fotossintética sob condições de céu esfumado para o ecossistema de floresta semidecídua estudado, resultados compatíveis com observações de campo (Oliveira *et al.*, 2007; Doughty; Flanner; Goulden, 2010; Cirino *et al.*, 2014) e por modelagem numérica na Amazônia (Rap, 2015; Moreira *et al.*, 2017; Malavelle *et al.*, 2019; Bian *et al.*, 2021) e o mundo (Rap *et al.*, 2018).

Devido à natureza físico-química do BBOA e suas propriedades intrínsecas, (Cirino *et al.*, 2018; Adachi *et al.*, 2020) a radiação $PAR(D)$ afeta o NEE e o funcionamento de diversos ecossistemas florestais amazônicos (Rap, 2015; Rap *et al.*, 2018; Bian *et al.*, 2021), especialmente onde ocorrem espécies de árvores adaptadas a condições de pouca luz, por exemplo, na sub-copa foliar das florestas amazônicas (Mercado *et al.*, 2009).

A eficiência fotossintética (LUE), intimamente ligada à capacidade da copa de converter energia solar em biomassa, é de $\sim 1-2\%$ para a floresta estudada, indicando perda ou rejeição de grande parte da energia solar disponível para fotossíntese. Porém, para valores elevados de $PAR(D)_F$, próximos a 1,0, são observados picos de até 3% na eficiência fotossintética. Nas situações em que a fração difusa totaliza valores máximos, os valores de AOD_a são em média superiores a 1,0 e $f \ll 1,0$. Esses achados corroboram as análises anteriores e reforçam a presença de aerossóis espalhadores de radiação emitidos pelos incêndios na área estudada. Vale ressaltar que mudanças em $PAR(D)_F$ (Fig. 2.7b) expressam mudanças proporcionais em $PAR(D)$. Embora exista uma grande incerteza (alto desvio padrão) no comportamento de LUE com o aumento da radiação PAR_D , há um aumento gradual e aproximadamente linear nos valores de LUE na faixa de radiação PAR_D entre 0,20-1,0. Este comportamento é peculiar à vegetação alta com dossel geralmente frondoso de florestas tropicais, os quais são mais sensíveis à transferência de radiação PAR_D do dossel superior para o tronco. Na vegetação de baixa estatura, como na região semiárida do nordeste da China (por exemplo, gramíneas), o LUE permanece aproximadamente constante, mesmo para valores elevados de PAR_D gerados por aerossóis e nuvens (Jing *et al.*, 2010). No geral, porém, o LUE é baixo para muitos tipos de vegetação, normalmente entre 1-3%.

2.3.5 A absorção líquida de CO_2 devido aos aerossóis de queimadas

A Figura 2.8 mostra as mudanças relativas do NEE durante todos os meses do ano, descontando fatores de confusão devido à sazonalidade, ou seja, mudanças mensais de variáveis que afetam fortemente as taxas fotossintéticas. Três razões essenciais reforçam a utilização do ano inteiro nestas análises: (1) a estação chuvosa contém cerca de 15-20% do número de incêndios florestais detectados durante a estação seca (Apêndice I, Tab. I.2). Observou-se numerosos focos de incêndios ao redor da área de estudo, ou seja, fontes de

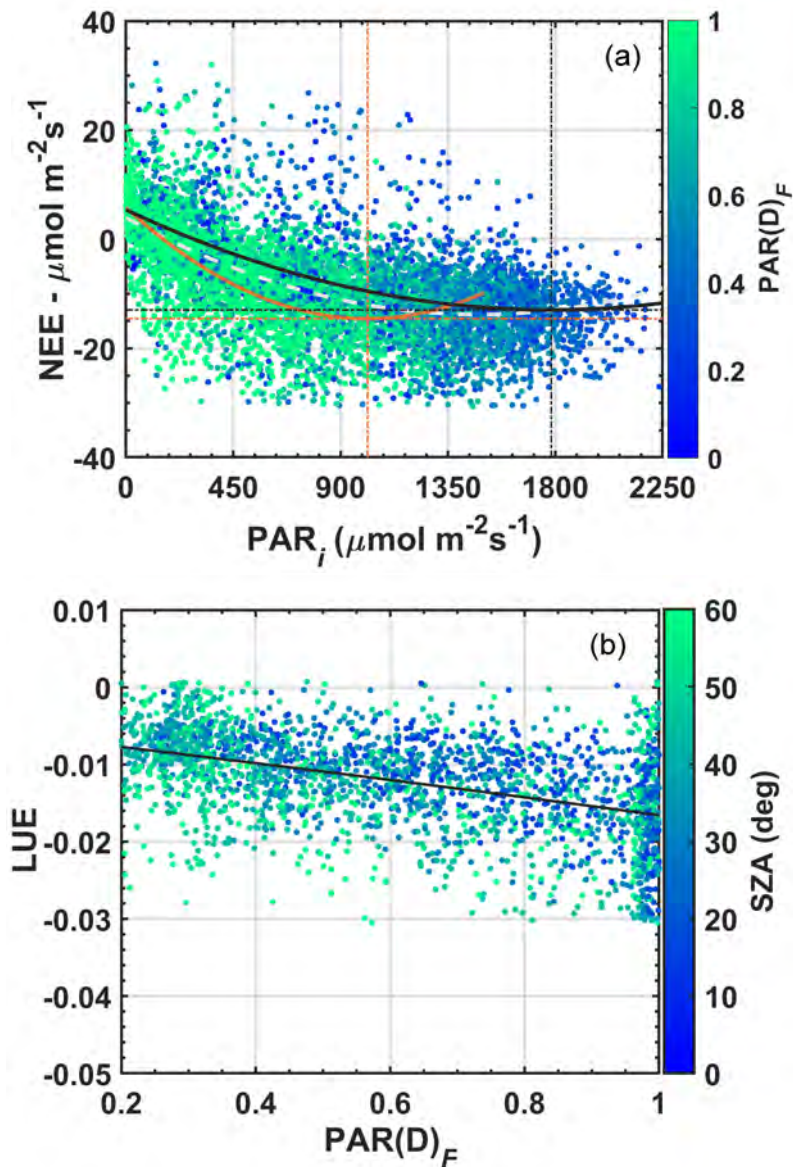


Figura 2.7 – NEE em função da radiação, PAR_i para medições entre 08h e 17h LT (a). Na imagem (b) LUE é uma função da fração $PAR(D)_F$ ($R^2 = 0,21$, o valor de $p < 0,001$) para uma área de floresta semidecídua localizada no município de Cláudia-MT, 50 km ao norte de Sinop, entre junho de 2005 a julho de 2008. As linhas laranja e preta denotam, respectivamente, observações $PAR(D)_F \geq 0,60$ e observações $f \approx 1,0$ (condições de céu claro). As linhas verticais laranja e preta indicam os mínimos globais das curvas polinomiais.

BBOA emitidas localmente e transportadas regionalmente (Apêndice C, Fig. C1); (2) a contribuição relativa do BBOA durante a estação chuvosa é relativamente pequena, mas contribui para melhorar o espaço amostral, considerado um aspecto crítico para o estudo; (3) a remoção ou manutenção dos períodos de transição e chuvosos nas análises não altera a direção científica dos resultados inicialmente encontrados na Figura 2.8b (ver apêndice G).

2.3.5.1 Sazonalidade dos fatores biofísicos no NEE

Para reduzir o efeito devido à sazonalidade de fatores biofísicos fortemente impulsionados pela mudança nas condições climáticas durante o ano (por exemplo, estresse hídrico, deciduidade, respiração do ecossistema), normalizou-se Equação (2.11) pelo céu claro NEE ajustado para cada mês do ano (Apêndice D, Fig. D.2) mostra as variações mensais médias encontradas no período 2005-2008). Esses ajustes apoiam melhor nossas suposições em relação às quantidades derivadas descritas nos métodos. Na verdade foi observado um aumento médio relativo de 30% no % NEE para SZA variando de $0-75^\circ$ após a aplicação dessas correções, em comparação com uma curva única para todos os anos. Para SZA variando de $0-20^\circ$ foi observado um realce de até 70% no % NEE . Como muitos estudos não levam em conta essas correções, esses resultados sugerem que os impactos do BBOA sobre o NEE podem ser ainda mais significativos do que se sabia anteriormente, especialmente na Amazônia Central (Manaus, K34) e Ocidental (Ji Paraná, RBJ) (Oliveira *et al.*, 2007; Cirino *et al.*, 2014; Rap, 2015; Moreira *et al.*, 2017).

A Equação 2.11 e a Equação 2.4 permitiram avaliar o comportamento da razão entre o % NEE e a irradiância f para intervalos SZA de $0-75^\circ$. Este procedimento foi adotado para minimizar os efeitos da elevação solar e da temperatura do ar no fluxo de NEE ao longo do dia (Gu *et al.*, 1999; Cirino *et al.*, 2014). Os intervalos a cada 25° garantiram as menores variações possíveis de SZA e o maior número possível de pontos dentro do espaço amostral necessário para análises estatísticas. Para cada intervalo SZA analisado, o % NEE médio foi avaliado em bins de f igual a 0,1, calculado separadamente (Fig. 2.8). Os pontos críticos e os coeficientes das curvas para todos os dados (entre $0-75^\circ$ SZA) são mostrados no material suplementar (Apêndice - Fig. G.1 e Tabela I.1). Em média, um aumento médio (absoluto) de aproximadamente $7,0 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ na absorção de carbono foi observado em relação às condições de céu claro quando f variou de 1,1-1,0 a 0,66, resultados para a faixa SZA entre $0-75^\circ$ (Fig. 2.8a). O aumento de $7,0 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ representa um aumento de 20-70% no fluxo de NEE . Este aumento, fortemente ligado ao aumento na concentração de aerossóis por incêndios, é explicado principalmente pelo aumento de 50% no PAR (D)F, ($\approx 450 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ na corrente PAR(D)) e redução de 35-40% na irradiância f quando o AODa varia de 0,10 a 5,0, como foi mostrado na Figura 2.5b.

Oliveira *et al.* (2007) e Cirino *et al.* (2014) apresentaram um aumento relativo de cerca de 30% para valores de f variando de 1,1 a 0,80. Esses estudos mostraram que o aumento na absorção de carbono na presença de aerossóis e nuvens torna-se menor e semelhante em ambos os locais para as bandas $SZA < 20$. A radiação solar sofre menor espalhamento próximo ao zênite ($SZA \sim 10^\circ$) devido às partículas suspensas na atmosfera e ao estreitamento do caminho óptico, reduzindo os efeitos da radiação difusa no processo fotossintético. Esses resultados, em particular, se repetem para a floresta semidecídua estudada de Mato Grosso, mas um forte aumento de 70% em % NEE é observado para faixas mais baixas de SZA (entre $50-75^\circ$), no primeiras horas do dia, entre 8h e 10h (LT), enquanto na Reserva Biológica do Jaru (JBR) os maiores aumentos se concentram nas faixas SZA entre $10-35^\circ$, próximo ao meio-dia, ou no período da manhã e tarde (Oliveira *et al.*, 2007). No K34, em Manaus, as absorções máximas e as máximas % NEE que ocorrem não ultrapassam 20% e os efeitos dos aerossóis e das nuvens operam em conjunto. As influências radiativas individuais de nuvens e aerossóis são difíceis de quantificar porque as observações de satélite AOD têm uma baixa resolução temporal. Resultados semelhantes foram observados por (Doughty; Flanner; Goulden, 2010) na FLONA-Tapajós, Amazônia central. Em geral, desvios padrão mais elevados são encontrados em regiões mais impactadas por aerossóis (Oliveira *et al.*, 2007; Cirino *et al.*, 2014; Rap, 2015), como Ji-Paraná (RO) e

Tabela 2.5 – Ajustes polinomiais (Figura 2.8), coeficientes e estatísticas para os períodos entre 07-17h (LT) na torre micrometeorológica a 50 km de Sinop-MT, no município de Cláudia, entre 2005-2008.

Configurações	Ângulos	Coeficientes				Estatística	
Poly fit 2nd	SZA	a	b	c	d	R^2	$C_p(x_v, y_v)$
<i>NEE</i>	0-25°	+23	-31	-4.3		0.88	(0.74, -07.50)
	25-50°	+21	-30	-1.7		0.95	(0.73, -12.61)
	50-75°	+20	-29	+3.1		0.88	(0.67, -14.71)
	0-75°	+21	-30	-1.1		0.97	(0.72, -11.90)
Poly fit 3rd	SZA	a	b	c	d	R^2	$C_p(x_v, y_v)$
% <i>NEE</i>	0-25°	-3.5×10^1	-1.2×10^2	$+2.1 \times 10^2$	-5.7×10^1	0.89	(0.68, 21.31)
	25-50°	$+1.4 \times 10^2$	-4.9×10^2	$+4.6 \times 10^2$	-9.7×10^1	0.97	(0.63, 30.13)
	50-75°	$+1.1 \times 10^3$	-2.9×10^3	$+2.1 \times 10^3$	-3.8×10^3	0.96	(0.54, 110.9)
	0-75°	$+2.0 \times 10^2$	-6.6×10^2	$+5.8 \times 10^2$	-1.2×10^2	0.98	(0.61, 36.40)

Alta Floresta (MT). Como as concentrações de aerossóis são relativamente mais baixas na FLONA-Tapajós (PA) e Manaus (AM), os desvios padrão são menores (Oliveira *et al.*, 2007; Doughty; Flanner; Goulden, 2010; Rap, 2015). Esses desvios podem ser encontrados em estudos anteriores publicados por (Oliveira *et al.*, 2007) na FLONA-Tapajós (PA), (Cirino *et al.*, 2014) em Manaus (AM) e Ji-Paraná (RO).

A Tabela 2.5 lista os coeficientes dos ajustes encontrados para *NEE* e %*NEE* em função de f para cada uma das faixas *SZA* consideradas. Foi identificado as condições de radiação ideais e críticas para a absorção de carbono entre 07-17h (LT) e listados abaixo. Como mencionado anteriormente, os pontos de inflexão (C_p) representam os chamados ótimos fisiológicos. Nossos resultados mostram uma diminuição (aumento) substancial, estatisticamente significativa, de *NEE* (%*NEE*) em função de f de $-7,5 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ a $-14,7 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e 1-0,63 ($\approx 40\%$) quando *SZA* varia de 0-25° a 50-75°, respectivamente ($R^2 \geq 0,85$).

Estes resultados correspondem, respectivamente, ao aumento relativo (%*NEE*) de cerca de 25-110% nas primeiras e últimas horas do dia, quando os ângulos solares mais baixos (maior ótimo fisiológico), corroborados com resultados apresentados em Figura 2.5, Figura 2.6 e Apêndice I (Tab. I.24). Para valores inferiores a 0,63, também foi observado um forte declínio das taxas fotossintéticas até $f \sim 0,25$, quando o processo de fotossíntese é totalmente interrompido. Assim, $f \sim 0,66$ (*SZA* 0-75°) pode ser interpretado como um limite para o qual as taxas fotossintéticas ($NEE f^{-1}$) indicam uma forte redução na capacidade de absorção de carbono da floresta em resposta sobrecarregar o BBOA. Quanto às melhorias no *NEE*, atribuídas ao sombreamento, devem ser vistas como uma estreita resiliência da floresta em resposta a uma atmosfera poluída. Estes resultados oferecem uma visão mais direta sobre as alterações na radiação solar causadas pelo BBOA e os seus impactos na absorção de carbono durante o dia, embora existam incertezas não medidas associadas às nuvens.

2.3.6 Insights sobre as incertezas da respiração do ecossistema

Como não existem medições locais diretas da Respiração Ecossistêmica (R_{eco}), são necessárias estimativas. No entanto, normalmente, os modelos disponíveis na literatura superestimam ou subestimam grosseiramente o R_{eco} local, especialmente quando dados in-situ não estão disponíveis para ajustá-los (por exemplo, respiração autotrófica e heterotrófica; serapilheira, solo, troncos, galhos, folhas e raízes) (Malhi, 2012). É importante

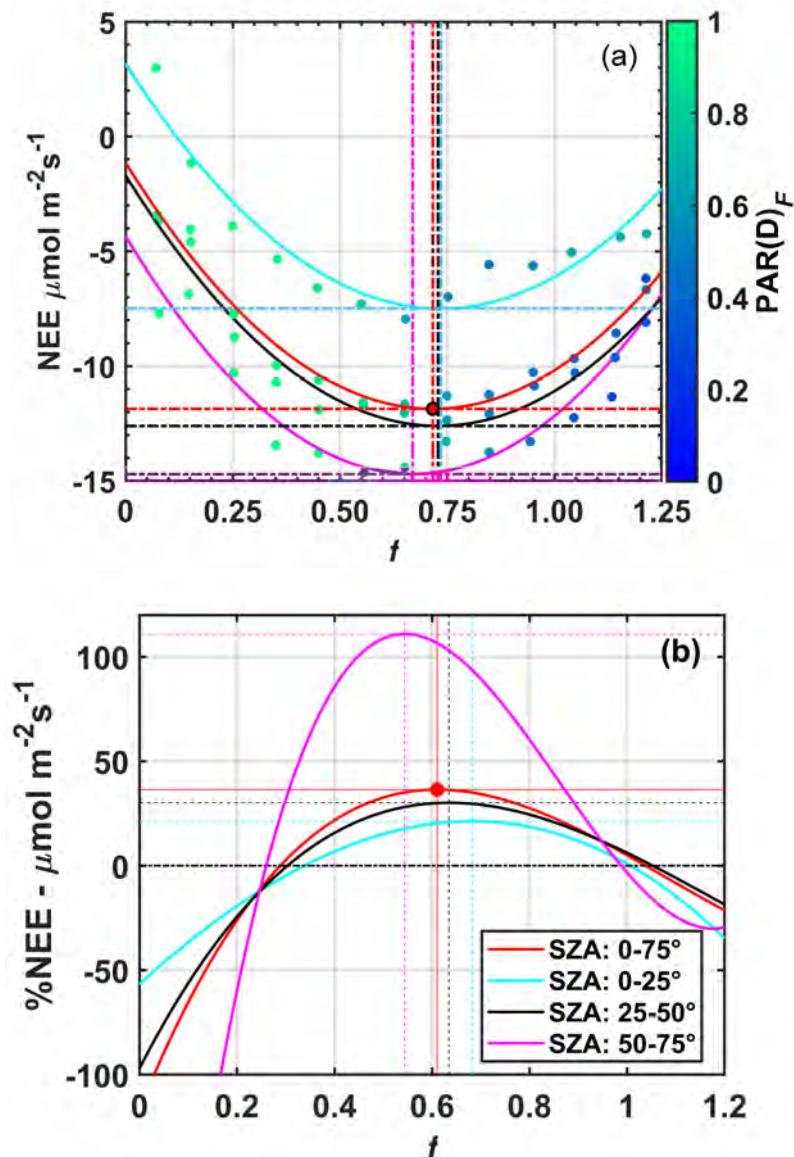


Figura 2.8 – (a) Variabilidade do NEE com f para vários intervalos de SZA . O $\%NEE$ em função da irradiância f para os mesmos intervalos SZA é mostrado em (b). O NEE é calculado a partir da Equação (2.11), corrigido com o $NEE_0(sza)$ calculado a partir das curvas de ajuste apresentadas na Tabela H.2. Esses gráficos incluem os efeitos dos aerossóis na área experimental de Cláudia-MT, entre 2005-2008

destacar que os efeitos indiretos do BBOA sobre R_{eco} ainda não foram explorados no ecótono “Cerrado-Floresta Amazônica”. Pouco se sabe sobre como os aerossóis modificam o R_{eco} na região. Destacou-se em estudos anteriores de (Vourlitis *et al.*, 2002; Vourlitis *et al.*, 2011) que esses fizeram estimativas diárias para o R_{eco} sem isolar os efeitos atenuantes da radiação devidos aos aerossóis. Essas condições são bem diferentes para o estudo atual. Uma vez que as taxas fotossintéticas também são moduladas pela radiação solar (atenuada pelo BBOA), mudanças na VPD também podem estar impactando a respiração do ecossistema a partir de interações não lineares, influenciando a abertura e fechamento dos estômatos, temperatura do dossel, umidade e temperatura do solo. Todos esses fatores influenciam a dinâmica microbológica do solo e da serapilheira, com implicações ainda desconhecidas

para R_{eco} (in-situ). Assim, assumimos que as incertezas subjacentes ao cálculo do R_{eco} (pelas razões mencionadas) poderiam afetar os nossos resultados de forma igualmente significativa ao desconsiderá-lo. Portanto, assumimos que a variabilidade temporal do GPP é semelhante à variabilidade temporal do NEE.

Para melhor apoiar a nossa suposição ($GPP \approx NEE$), fizemos um teste semelhante (Figs. 2.8b e apêndice G.1) usando apenas dados diurnos durante a estação seca (Apêndice G, Fig. G.1 e G.2). Descobrimos que a variação % (em média) é semelhante, cerca de 15% para SZA (0-75°) e cerca de 35% para SZA (50-75°). Ambas as diferenças podem ser atribuídas a incertezas devido ao R_{eco} diurno (Fig. 2.9) e a fatores que precisam ser melhor explorados em trabalhos futuros. Levantou-se a hipótese de alguns mecanismos que poderiam levar a um aumento de NEE ao longo das estações seca e enfumaçada (fortemente apoiado por estudos anteriores na Amazônia e no mundo), como segue abaixo. (1). Durante a estação seca (julho-setembro), o déficit fotossintético devido à decidualidade é parcialmente compensado pelo feedback positivo de fatores extrínsecos: concentração de BBOA, $PAR(D)$, resfriamento do ar e da copa das folhas e redução de VPD (Vourlitis *et al.*, 2001; Gu *et al.*, 2003; Rap *et al.*, 2018; Corwin *et al.*, 2022). (2). Durante a estação de folhas novas (outubro-maio), o aumento fotossintético é explicado principalmente pelo feedback positivo tanto de fatores extrínsecos (mencionados) quanto intrínsecos (Índice de Área Foliar e LUE): variação nas características do dossel da floresta devido ao novo folhas germinadas, ou seja, maior capacidade fotossintética da copa que compensa a resposta estomática desfavorável devido à seca precedente (Wu *et al.*, 2016; Green *et al.*, 2020); (3). A magnitude dos efeitos observados nas hipóteses (1) e (2) dependerá fortemente da intensidade e frequência de ocorrência de fenômenos meteorológicos (por exemplo, dinâmica de camadas limitadas planetárias) (Fuentes *et al.*, 2016; Gao *et al.*, 2021).

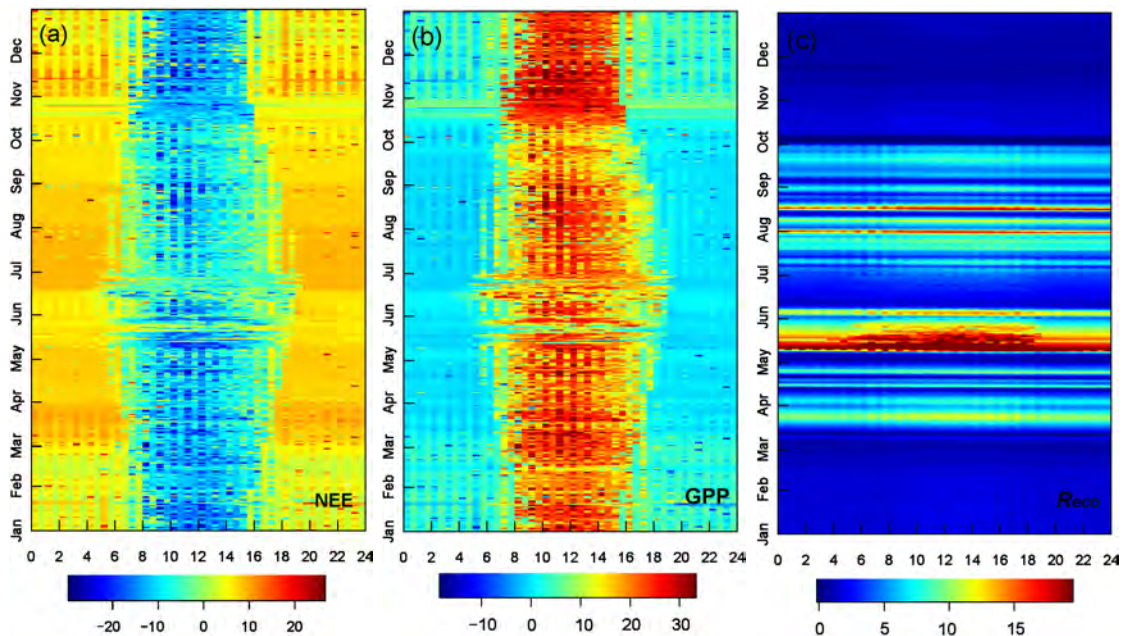


Figura 2.9 – Mudanças sazonais nas impressões digitais calculadas pelo sistema REddy-Proc em $\mu\text{mol m}^2\text{s}^{-1}$ durante os anos 2005-2008: (a) NEE ; (b) GPP ; and (c) R_{eco} Diurno. O eixo-x mostra a hora (24h), UTC -4.

2.3.7 Efeitos do BBOA nas variáveis biofísicas e NEE

Esses resultados são importantes porque grande parte da área amazônica é frequentemente impactada pela presença de aerossóis em pequenas quantidades (baixo AOD), semelhantes aos observados no norte da bacia amazônica, em Manaus-AM. Em regiões com altas taxas de desmatamento e queima de biomassa, entretanto, os aumentos na absorção de CO₂ são significativos e podem ter grandes impactos no orçamento de carbono da floresta amazônica. Sobre ecossistemas florestais densos da Amazônia central, picos de absorção de CO₂ são frequentemente observados em intervalos maiores e mais estreitos de f (1,1 a 0,80), especialmente para ecossistemas florestais densos (Gu *et al.*, 1999; Yamasoe *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2007; Doughty; Flanner; Goulden, 2010). Isto é diferente das pastagens e florestas temperadas, onde a absorção líquida máxima de CO₂ é geralmente encontrada na faixa f entre 1,0-0,5 (Gu *et al.*, 1999; Niyogi *et al.*, 2004; Jing *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010).

Os mecanismos para explicar a variação de %NEE com a irradiância f são complexos e influenciados pela dinâmica da Camada Limite Planetária (PBL) ao longo do dia, incluindo o transporte de emissões de queima transportadas regionalmente e emitidas localmente. Para as florestas semidecíduais aqui estudadas, um acúmulo de aerossóis de incêndios durante a noite (19h às 06h, LT) pode estar associado a uma maior estabilidade no PBL durante a temporada de incêndios (valores mais baixos na velocidade do vento, redução na convecção e camada limite estreitamento). Esses fatores podem aumentar a concentração de aerossóis (AOD_a) durante a noite, com efeitos importantes na capacidade de absorção de CO₂ (%NEE) observada nas primeiras horas do dia (Valores SZA entre 50-75°).

Estudos futuros poderão elucidar os efeitos dinâmicos do PBL na capacidade fotossintética das florestas da Bacia Amazônica, como estudos realizados em outras florestas ao redor do mundo, por exemplo, em Utah, EUA, (Helliker; Ehleringer, 2000), Reino Unido, (Yakir, 2003), e Pequim, China, (Wang *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022). Experimentos de campo focados na distribuição vertical de $PAR(D)_F$ ao longo do dossel melhorarão a compreensão atual dos efeitos individuais de aerossóis e nuvens no microclima da floresta (LC_T e VPD) em %NEE.

A Figura 2.10 mostra interferência significativa dos aerossóis nas variáveis ambientais que conseqüentemente afetam a dinâmica fotossintética das plantas. O efeito atenuante da irradiância solar incidente devido à presença de aerossóis desencadeia reduções estatisticamente significativas em LC_T , T_{ar} e VPD perto do dossel da floresta (Fig. 2.10). No entanto, notou-se que a variabilidade T_{air} é maior/mais ampla do que a variabilidade LC_T (Figs. 2.10b e 2.10a), o que sugere que o LC_T não consegue capturar a variabilidade realista. Para verificar e avaliar a consistência do modelo LC_T (Equação 2.9), calibrado para as condições da Amazônia Central (mencionado na seção 2.2.3.7), um segundo método (LC_{Ts}), baseado na equação de Stefan-Boltzmann utilizado por (Doughty; Flanner; Goulden, 2010; Cirino *et al.*, 2014) foi testado (ver Apêndice, Equação E.1 e Figs. E.1 e E.2). Observou-se que T_{air} é sistematicamente menor ao longo do dia (Apêndice, Figs. E.1b e E.1a), resultados obtidos a partir dos mesmos pontos de dados mostrados nas Figuras 2.10a e 2.10 b. Em média, a amplitude entre LC_T e T_{air} é igual a 2,2 (\pm 2,1) °C (Apêndice, Fig. E.1c), e a copa das folhas é mais quente que o ar entre 7h e 17h (LT), conforme esperado. A copa das folhas estava mais quente que T_{air} durante o dia. No entanto, o desvio padrão (padrão) de LC_{Ts} é significativamente maior. A amplitude entre LC_{Ts} e T_{air} é cerca de 1,7 \pm 11,1 °C (Figs. E.1a e E.1b). LC_{Ts} parecem capturar o comportamento horário médio, mas exibem uma variabilidade horária muito maior em comparação com T_{air} ao longo do

ano. Os resultados de LC_T revelam um padrão horário médio aceitável para a temperatura da copa das folhas, embora o padrão não seja realista em comparação com T_{air} . Devido às limitações de LC_T , vale a pena mencionar que provavelmente esteja-se subestimando as incertezas dos efeitos dos aerossóis na temperatura do dossel. No entanto, o impacto dos aerossóis no T_{ar} também indica um importante resfriamento na superfície ($\sim 3-4$ °C), com efeitos relevantes no dossel e no funcionamento da área estudada ecossistema.

Vários mecanismos têm sido utilizados para explicar o aumento da capacidade fotossintética do dossel devido a alterações nas propriedades biofísicas da floresta, entre eles, a tendência geral de diminuição das temperaturas (Koren; Dagan; Altaratz, 2014; Bai *et al.*, 2012) e VPD (Min, 2005; Yuan *et al.*, 2019) sob céu nublado ou esfumaçado. O efeito desse resfriamento, especialmente na copa das folhas, também pode exercer influência considerável na fotossíntese da floresta (Doughty; Flanner; Goulden, 2010; Vourlitis *et al.*, 2011). Aqui, o impacto dos aerossóis produziu, respectivamente, um resfriamento de 3 °C e 2,5 °C no LC_T e T_{ar} quando f diminuiu de 1,10 para 0,66 (Fig. 2.10a e Fig. 2.10b), faixas para as quais o NEE aumenta cerca de 3-7 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ conforme discutido na seção anterior. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por (Davidi; Koren; Remer, 2009) e (Doughty; Flanner; Goulden, 2010) na FLONA-Tapajos (Santarém-PA). No entanto, os impactos individuais desses efeitos dependem de medidas simultâneas e de longo prazo de fatores extrínsecos (estresse hídrico, disponibilidade de nutrientes, radiação solar, aerossóis e cobertura de nuvens) e aspectos intrínsecos da planta (tipo de floresta, estrutura da copa foliar, estrutura estomática). e estrutura radicular), indisponíveis no local e período estudado. Além disso, a relação não linear entre esses fatores torna difícil determinar os ótimos fisiológicos para determinadas variáveis biofísicas, como temperatura e VPD (Figura 2.10c).

O aumento da umidade relativa devido ao resfriamento do ar induzido por nuvens ou aerossóis também pode influenciar a fotossíntese (Freedman *et al.*, 1998; Altaratz; Koren; Reisin, 2008; Jing *et al.*, 2010). Em muitos locais florestais, a redução em f diminui o VPD durante a estação seca. Estas reduções, fortemente influenciadas pelo resfriamento do ar, também estão intimamente ligadas ao resfriamento da copa da floresta e ao aumento da capacidade de absorção de CO_2 (%NEE) (Doughty; Flanner; Goulden, 2010), considerando seus ótimos fisiológicos (pontos de inflexão). Para condições de céu nublado ou poluído, o comportamento geralmente decrescente do VPD pode influenciar a abertura dos estômatos e intensificar a fotossíntese (Jing *et al.*, 2010). Aqui, observa-se uma redução de 2-3 hPa atribuída à diminuição de cerca de 3-4 (°C) na temperatura do ar, o que corresponde a uma redução de até $\sim 40\%$ em f a partir do qual o NEE é criticamente reduzido. Além disso, ainda é possível que uma melhoria no NEE esteja relacionada a um aumento nas taxas de transpiração, proporcionando resfriamento do ar, ou seja, feedback positivo entre AOD, NEE e RU_{ar} (Caioni *et al.*, 2020).

Diferentemente do que foi encontrado aqui, as florestas da Amazônia central, em Manaus-AM (K34), FLONA-Tapajos (K83), Santarém-PA e Ji-Paraná (RO) parecem ser menos tolerantes à atenuação da luz solar induzida por nuvens e aerossóis. Em nossa floresta, a distribuição de f é próxima de 0,66 para $AOD_a \gg 0,10$ (Tabela 2.5). Este valor é 15-20% inferior aos valores encontrados na Amazônia central quando o NEE atinge valores negativos máximos durante a estação de queimadas ($f \sim 0,80$). Este é o valor limite no qual a absorção máxima de carbono é observada devido à carga de aerossóis no JBR no JBR Ji-Paraná (sul da bacia amazônica), bem como na reserva Cuieiras no K34, em Manaus-AM. Essas comparações são relevantes porque quantidades maiores (menores) de aerossóis e nuvens na região amazônica podem fazer com que certos tipos de florestas absorvam quantidades ainda maiores (menores) de carbono ao longo do dia (Gu *et al.*, 1999;

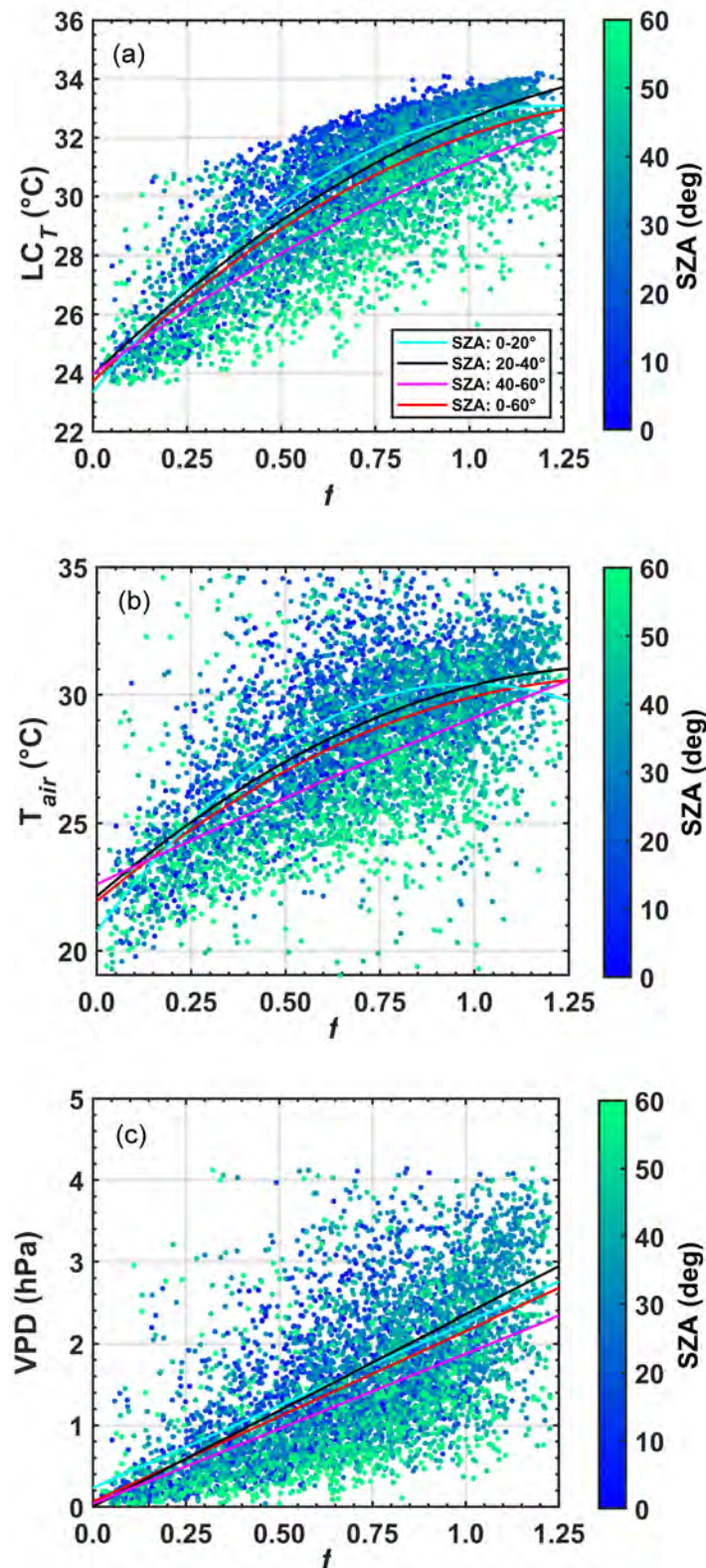


Figura 2.10 – Correlação entre a irradiância relativa f com LC_T (a), T_{air} (b) e VPD (c), valores calculados para SZA entre 0 e 60. A temperatura do ar foi medida a 42 m do solo, na torre micrometeorológica localizada no município de Cláudia, a 50 km de Sinop-MT, utilizando a parametrização dada em (Tribuzy, 2005), entre 2003-2004.

Cirino *et al.*, 2014). Os padrões de distribuição de frequência % NEE e seus impactos na fotossíntese permanecem desconhecidos para muitos outros tipos de florestas na Amazônia e ao redor do mundo. Os resultados relatados aqui também são consistentes com os cálculos de (Gu *et al.*, 1999) para florestas temperadas no Canadá, onde máximos negativos no fluxo NEE ocorrem para faixas f entre 0,55–0,60.

A variabilidade interanual da relação entre o AOD_a observado, contagens de incêndios e NEE não pôde ser analisada, principalmente devido à falta de uma série de longo prazo de dados de fluxo de NEE na região. Na Amazônia central, foi observada variabilidade significativa de ano para ano. Maiores % NEE foram frequentemente encontrados em dias com altas contagens de incêndios. No entanto, o stress hídrico e a disponibilidade de nutrientes também desempenham um papel essencial na capacidade de absorção de carbono (Gatti *et al.*, 2014; Hofhansl *et al.*, 2016; Gatti *et al.*, 2021; Malhi *et al.*, 2021). Modificações conjuntas nestas variáveis tornam extremamente difícil quantificar os efeitos individuais dos aerossóis e das nuvens no NEE . Experimentos de campo que medem todos esses aspectos produzirão estudos com conclusões mais robustas e abrangentes sobre as respostas ecossistêmicas das florestas amazônicas a perturbações ambientais externas, como incêndios.

2.4 Conclusão

A profundidade óptica do aerossol derivada do sistema AERONET provou ser uma variável chave na elaboração do modelo de irradiância solar de céu claro usado para determinar a irradiância relativa f . O modelo concebido pode ser direcionado para outras regiões da Amazônia desde que estejam dentro da mesma faixa de latitude, onde não haja medições de SW_i . O parâmetro f permitiu avaliar satisfatoriamente os efeitos radiativos dos aerossóis provenientes de queimadas na absorção líquida de carbono (NEE) pelo ecossistema de floresta semidecídua estudado. Os impactos radiativos em PAR_i e $PAR(D)$ permitiram avaliar os impactos na eficiência do uso da luz do dossel (LUE), que aumentou $\sim 1-3\%$ sob condições poluídas (AOD_a). As mudanças na radiação solar incidente e no fluxo de CO_2 (NEE) poderiam ser atribuídas aos efeitos combinados de aerossóis emitidos localmente, regionalmente ou transportados de regiões mais distantes, considerando os métodos aplicados.

No ecossistema de floresta semidecídua estudado, o (NEE) aumentou de 20-70% quando a profundidade óptica variou de 0,1 a 5,0 (em média). Este efeito foi atribuído a uma redução média de até 40% na quantidade de radiação PAR total, e também a um aumento de até 50% na fração difusa da radiação ($PAR(D)_F$). Este aumento na capacidade de absorção de CO_2 pelo ecossistema está intimamente ligado à composição florística do sub-bosque e de certos tipos de espécies florestais adaptadas a condições de baixa luminosidade, que consiste em uma vegetação mais eficiente na captação de luz difusa durante a fotossíntese processo. Os resultados mostram maior eficiência fotossintética sob condições de céu esfumado; carregados com partículas que espalham a radiação solar devido aos incêndios, mas também revelam o limite máximo nos cortes de radiação PAR necessários para o processo de fotossíntese. Irradiâncias relativas f inferiores a 0,66, em média, indicam o ponto crítico em que as taxas fotossintéticas da floresta sofrem reduções drásticas. Valores de irradiância relativa $f \sim$ de 0,22 indicam 100% de interrupção no processo fotossintético.

Devido ao aumento da concentração de partículas de aerossóis provenientes de queimadas na região, estatisticamente, também foram observadas alterações significativas em variáveis meteorológicas (biofísicas), como temperatura da copa das folhas e VPD . As

descobertas científicas revelam uma forte influência dos aerossóis do fogo nestas variáveis, com efeitos potencialmente importantes na fotossíntese e na absorção de carbono. As reduções de 3 e 5 °C na copa das folhas e na temperatura do ar estão fortemente associadas a uma redução de 40% em f e uma redução de $\sim 2,0$ hPa nos valores de VPD que induzem a abertura dos estômatos e contribuir para o aumento observado de 20-70% na capacidade de absorção de CO_2 da floresta ($\%NEE$). As influências ou contribuições individuais de VPD , T_{air} e LC_T para o saldo líquido de CO_2 do ecossistema, no entanto, não puderam ser diretamente quantificadas nesta pesquisa. Correlações indiretas, no entanto, revelam efeitos estatisticamente significativos entre as variáveis biofísicas mencionadas e as mudanças observadas no fluxo NEE durante a exposição das florestas ao fogo e valores elevados de AOD_a (superiores a 1,25, em média) . Estudos focados nos impactos das queimadas no fluxo de água para a atmosfera merecem atenção e podem ajudar a compreender o papel das florestas na manutenção das chuvas e seus efeitos no ciclo hidrológico (estudos ainda não realizados para a maioria dos biomas da Amazônia).

Sugere-se um estudo regional mais abrangente dos efeitos aqui mencionados, baseado em outros tipos de vegetação e biomas, utilizando mapas de vegetação, estimativas de sensoriamento remoto, dados meteorológicos e modelagem numérica, ajudará a entender melhor como o clima e a função do ecossistema na Amazônia são afetados. pelo ambiente natural e antrópico. As reduções no fluxo NEE e, portanto, a redução da capacidade fotossintética das plantas devido ao aumento excessivo na concentração de aerossóis BBOA e reduções drásticas nos fluxos de radiação solar ($f \leq 0,22$) devido às queimadas na região, constitui um efeito de notável relevância para a ciclagem do carbono em ambientes de floresta semidecídua na Amazônia e, portanto, uma importante contribuição para uma melhor compreensão deste ciclo na região. Trabalhos futuros também envolveriam a estimativa da importância em escala global da carga de aerossóis na radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e, conseqüentemente, nos fluxos de troca líquida de ecossistemas (NEE). Além do uso potencial de modelagem numérica, abordagens promissoras nessa direção incluem pesquisas sobre fluorescência de clorofila induzida por luz solar (SIF) de sensoriamento remoto (??). O SIF tem sido cada vez mais utilizado como um novo proxy para a produtividade da vegetação. Comparar SIF com PAR_i e $PAR(D)$ de sensoriamento remoto (??) permite uma comparação dos efeitos em escala global com base observacional observado neste estudo e, potencialmente, a estimativa do impacto da carga de aerossóis em geral, e da queima de biomassa em particular, na capacidade fotossintética das plantas.

REFERÊNCIAS

- ACKERLY, D. D. *et al.* The forest-cerrado transition zone in southern amazonia: results of the 1985 projeto flora amazônica expedition to mato grosso. **Brittonia**, v. 41, n. 2, p. 113–128, 1989.
- ADACHI, K. *et al.* Mixing states of Amazon basin aerosol particles transported over long distances using transmission electron microscopy. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 20, n. 20, p. 11923–11939, 2020. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/20/11923/2020/>.
- ALENCAR, A. A. C. *et al.* Long-term landsat-based monthly burned area dataset for the brazilian biomes using deep learning. **Remote Sensing**, v. 14, n. 11, 2022. ISSN 2072-4292. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/11/2510>.
- ALTARATZ, O. *et al.* Humidity impact on the aerosol effect in warm cumulus clouds. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 17, p. 1–5, 2008. ISSN 00948276.
- ANDEREGG, W. R. *et al.* Divergent forest sensitivity to repeated extreme droughts. **Nature Climate Change**, Nature Research, v. 10, n. 12, p. 1091–1095, dec 2020. ISSN 17586798.
- ARAGÃO, L. E. *et al.* 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**, Springer US, v. 9, n. 1, p. 1–12, 2018. ISSN 20411723. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>.
- ARAÚJO, A. C. *et al.* The spatial variability of CO₂ storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 2, p. 226–237, 2010. ISSN 01681923.
- ARTAXO, P. *et al.* Tropical and boreal forest – atmosphere interactions: A review. **Tellus B: Chemical and Physical Meteorology**, Mar 2022.
- ARTAXO, P. *et al.* Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: From natural biogenic to biomass burning conditions. **Faraday Discussions**, v. 165, n. February 2014, p. 203–235, 2013. ISSN 13596640.
- AUBINET, M. *et al.* Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 108, n. 4, p. 293–315, 2001. ISSN 01681923.
- AUBINET, M. *et al.* **Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis**. [S.l.]: Springer, 2012.
- AVITABILE, V. *et al.* An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. **Global Change Biology**, v. 22, n. 4, p. 1406–1420, 2016. ISSN 13652486.
- BAI, Y. *et al.* Comparing the impact of cloudiness on carbon dioxide exchange in a grassland and a maize cropland in northwestern China. **Ecological Research**, v. 27, n. 3, p. 615–623, 2012. ISSN 09123814.
- BALCH, J. K. *et al.* The Susceptibility of Southeastern Amazon Forests to Fire: Insights from a Large-Scale Burn Experiment. **BioScience**, v. 65, n. 9, p. 893–905, 2015. ISSN 15253244.

BARBOSA, F. R. G. M. *et al.* Land-Use Dynamics for Agricultural and Livestock in Central-West Brazil and its Reflects on the Agricultural Frontier Expansion. **Cleaner and Circular Bioeconomy**, v. 4, n. November 2022, p. 100033, 2023. ISSN 27728013.

BEER, C. *et al.* Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. **Science**, v. 329, n. 5993, p. 834–838, 2010. ISSN 00368075.

BIAN, H. *et al.* The response of the Amazon ecosystem to the photosynthetically active radiation fields: Integrating impacts of biomass burning aerosol and clouds in the NASA GEOS Earth system model. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 21, n. 18, p. 14177–14197, 2021. ISSN 16807324.

Bird e Hulstrom, R. A Simplifield Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces. 1981.

BOOTH, B. B. *et al.* High sensitivity of future global warming to land carbon cycle processes. **Environmental Research Letters**, v. 7, n. 2, 2012. ISSN 17489326.

BRANDO, P. M. *et al.* Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, National Academy of Sciences, v. 111, n. 17, p. 6347–6352, apr 2014. ISSN 10916490.

BRANDO, P. M. *et al.* Prolonged tropical forest degradation due to compounding disturbances: Implications for CO₂ and H₂O fluxes. **Global Change Biology**, v. 25, n. 9, p. 2855–2868, 2019. ISSN 13652486.

BRIENEN, R. J. *et al.* Long-term decline of the Amazon carbon sink. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 519, n. 7543, p. 344–348, 2015. ISSN 14764687. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/nature14283>.

BURBA, G. **Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural and Regulatory Applications: A Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates**. [*S.l.*]: LI-COR Biosciences, 2013. 345 p. ISBN 978-0-61576827-4.

CAIONI, C. *et al.* Droughts amplify differences between the energy balance components of Amazon forests and croplands. **Remote Sensing**, v. 12, n. 3, 2020. ISSN 20724292.

CARSWELL, F. E. *et al.* Seasonality in co₂ and h₂o flux at an eastern amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. D20, p. LBA 43–1–LBA 43–16, 2002. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2000JD000284>.

CIRINO, G. *et al.* Observations of Manaus urban plume evolution and interaction with biogenic emissions in GoAmazon 2014/5. **Atmospheric Environment**, v. 191, n. August, p. 513–524, 2018. ISSN 18732844.

CIRINO, G. G. *et al.* The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in the Amazon. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, n. 13, p. 6523–6543, 2014. ISSN 16807324.

CORRIPIO, J. G. Vectorial algebra algorithms for calculating terrain parameters from dems and solar radiation modelling in mountainous terrain. **International Journal of Geographical Information Science**, Taylor & Francis, v. 17, n. 1, p. 1–23, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/713811744>.

CORWIN, K. A. *et al.* Smoke-driven changes in photosynthetically active radiation during the u.s. agricultural growing season. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 127, n. 23, p. e2022JD037446, 2022. E2022JD037446 2022JD037446. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2022JD037446>.

DAVIDI, A. *et al.* Direct measurements of the effect of biomass burning over the Amazon on the atmospheric temperature profile. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9, n. 21, p. 8211–8221, 2009. ISSN 16807324.

DAVISON, C. W. *et al.* **Land-use change and biodiversity: Challenges for assembling evidence on the greatest threat to nature.** [S.l.]: John Wiley and Sons Inc, 2021. 5414–5429 p.

DOUGHTY, C. E. *et al.* Effect of smoke on subcanopy shaded light, canopy temperature, and carbon dioxide uptake in an Amazon rainforest. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 24, n. 3, p. 1–10, 2010. ISSN 08866236.

DOUGHTY, C. E. *et al.* Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia. **Nature**, v. 519, n. 7541, p. 78–82, 2015. ISSN 14764687.

DRUGÉ, T. *et al.* Modeling radiative and climatic effects of brown carbon aerosols with the ARPEGE-Climat global climate model. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Copernicus Publications, v. 22, n. 18, p. 12167–12205, sep 2022. ISSN 16807324.

DUCHON, C. E.; O'MALLEY, M. S. Estimating cloud type from pyranometer observations. **Journal of Applied Meteorology**, American Meteorological Society, Boston MA, USA, v. 38, n. 1, p. 132 – 141, 1999.

DURAND, M. *et al.* Diffuse solar radiation and canopy photosynthesis in a changing environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier B.V., v. 311, dec 2021. ISSN 01681923.

FINNIGAN, J. The storage term in eddy flux calculations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 136, n. 3-4, p. 108–113, 2006. ISSN 01681923.

FREEDMAN, J. *et al.* Boundary layer cloud climatology and enhanced forest-atmosphere exchange. In: **Preprints of 23rd Conference on Agricultural and Forest Meteorology.** [S.l.: s.n.], 1998. p. 41–44.

FU, Z. *et al.* The surface-atmosphere exchange of carbon dioxide in tropical rainforests: Sensitivity to environmental drivers and flux measurement methodology. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 263, n. December 2017, p. 292–307, 2018. ISSN 01681923. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.001>.

FUENTES, J. D. *et al.* Linking meteorology, turbulence, and air chemistry in the amazon rain forest. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, n. 12, p. 2329–2342, 2016. ISSN 15200477.

GAO, Y. *et al.* Atmospheric aerosols elevated ecosystem productivity of a poplar plantation in Beijing, China. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 51, n. 10, p. 1440–1449, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0396>.

GATES, D. M. **Biophysical Ecology**. [S.l.]: Springer New York, NY, 1980. ISBN 9781461260264.

GATTI, L. V. *et al.* Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. **Nature**, Springer US, v. 595, n. 7867, p. 388–393, 2021. ISSN 14764687. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>.

GATTI, L. V. *et al.* Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 506, n. 7486, p. 76–80, 2014. ISSN 00280836. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/nature12957>.

GRACE, J. *et al.* The use of eddy covariance to infer the net carbon dioxide uptake of Brazilian rain forest. **Global Change Biology**, v. 2, n. 3, p. 209–217, 1996. ISSN 13541013.

GREEN, J. K. *et al.* Amazon rainforest photosynthesis increases in response to atmospheric dryness. **Science Advances**, v. 6, n. 47, p. eabb7232, 2020. Disponível em: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/sciadv.abb7232>.

GU, L. *et al.* Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: Enhanced photosynthesis. **Science**, v. 299, n. 5615, p. 2035–2038, 2003. Disponível em: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1078366>.

GU, L. *et al.* Cloud modulation of surface solar irradiance at a pasture site in Southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 106, n. 2, p. 117–129, 2001. ISSN 01681923.

GU, L. *et al.* Responses of net ecosystem exchanges of carbon dioxide to changes in cloudiness: Results from two North American deciduous forests. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 104, n. D24, p. 31421–31434, 1999. ISSN 01480227.

HELLIKER, B. R.; EHLERINGER, J. R. Establishing a grassland signature in veins: $\delta^{18}\text{O}$ in the leaf water of C_3 and C_4 grasses. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 97, n. 14, p. 7894–7898, 2000. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.97.14.7894>.

HOFHANSL, F. *et al.* Amazon forest ecosystem responses to elevated atmospheric CO_2 and alterations in nutrient availability: Filling the gaps with model-experiment integration. **Frontiers in Earth Science**, v. 4, n. February, p. 1–9, 2016. ISSN 22966463.

HOLANDA, B. A. *et al.* African biomass burning affects aerosol cycling over the Amazon. **Communications Earth & Environment**, v. 4, n. 1, p. 154, May 2023. ISSN 2662-4435. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00795-5>.

HOLBEN, B. N. *et al.* AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, n. 1, p. 1–16, 1998. ISSN 00344257.

HUBAU, W. *et al.* Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. **Nature**, Nature Research, v. 579, n. 7797, p. 80–87, mar 2020. ISSN 14764687.

HUNTINGFORD, C. *et al.* Simulated resilience of tropical rainforests to CO₂ -induced climate change. **Nature Geoscience**, Nature Publishing Group, v. 6, n. 4, p. 268–273, 2013. ISSN 17520894. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo1741>.

JING, X. *et al.* The effects of clouds and aerosols on net ecosystem CO₂ exchange over semi-arid Loess Plateau of Northwest China. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 17, p. 8205–8218, 2010. ISSN 16807316.

KANNIAH, K. D. *et al.* Control of atmospheric particles on diffuse radiation and terrestrial plant productivity: A review. **Progress in Physical Geography**, v. 36, n. 2, p. 209–237, 2012. ISSN 03091333.

KOREN, I. *et al.* From aerosol-limited to invigoration of warm convective clouds. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1143–1146, 2014. ISSN 10959203.

LEVY, R. C. *et al.* The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 6, n. 11, p. 2989–3034, 2013. ISSN 18671381.

LORENZI, H. **Arvores , brasileiras**. São Paulo: [s.n.], 2000.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2002. (Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil, v.2). ISBN 9788586714146. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=UN4sAQAAMAAJ>.

MAGALHÃES, N. de *et al.* Amazonian Biomass Burning Enhances Tropical Andean Glaciers Melting. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–12, 2019. ISSN 20452322.

MALAVELLE, F. F. *et al.* Studying the impact of biomass burning aerosol radiative and climate effects on the Amazon rainforest productivity with an Earth system model. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 19, n. 2, p. 1301–1326, 2019. ISSN 16807324.

MALHI, Y. The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation. **Journal of Ecology**, v. 100, n. 1, p. 65–75, 2012. ISSN 00220477.

MALHI, Y. *et al.* **Chapter 6: Biogeochemical Cycles in the Amazon**. [S.l.]: United Nations Sustainable Development Solutions Network, New York, USA, 2021. ISBN 9781734808001.

MARTIN, S. T. *et al.* An overview of the Amazonian Aerosol Characterization Experiment 2008 (AMAZE-08). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 23, p. 11415–11438, 2010. ISSN 16807316.

MARTIN, S. T. *et al.* Sources and properties of Amazonian aerosol particles. **Reviews of Geophysics**, v. 48, n. 2, 2010. ISSN 87551209.

MATLAB. **version 9.8.8.748 (R2013a)**. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2013.

MERCADO, L. M. *et al.* Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. **Nature**, v. 458, n. 7241, p. 1014–1017, 2009. ISSN 00280836.

MEYERS, T. P.; DALE, R. F. **Predicting daily insolation with hourly cloud height and coverage**. 1983. 537–545 p.

- MIN, Q. Impacts of aerosols and clouds on forest-atmosphere carbon exchange. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 110, n. D6, 2005. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004JD004858>.
- MONTAGNANI, L. *et al.* Estimating the storage term in eddy covariance measurements: The ICOS methodology. **International Agrophysics**, v. 32, n. 4, p. 551–567, 2018. ISSN 02368722.
- MOREIRA, D. S. *et al.* Coupling between the JULES land-surface scheme and the CCATT-BRAMS atmospheric chemistry model (JULES-CCATT-BRAMS1.0): Applications to numerical weather forecasting and the CO₂ budget in South America. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 4, p. 1243–1259, 2013. ISSN 1991959X.
- MOREIRA, D. S. *et al.* Modeling the radiative effects of biomass burning aerosols on carbon fluxes in the Amazon region. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, n. 23, p. 14785–14810, 2017. ISSN 16807324.
- MORGAN, W. T. *et al.* Non-deforestation drivers of fires are increasingly important sources of aerosol and carbon dioxide emissions across Amazonia. **Scientific Reports**, Springer US, v. 9, n. 1, p. 1–15, 2019. ISSN 20452322. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-53112-6>.
- MURPHY, P. G.; LUGO, A. E. Ecology of tropical dry forest. **Annual review of ecology and systematics**. Vol. 17, n. November 2003, p. 67–88, 1986. ISSN 0066-4162.
- NAGY, L. *et al.* **Interactions Between Biosphere, Atmosphere, and Human Land Use in the Amazon Basin: An Introduction**. [S.l.]: Springer Berlin, Heidelberg, 2016. 3-15 p. ISBN 9783662499009.
- NAGY, R. C. *et al.* Soil carbon dynamics in soybean cropland and forests in mato grosso, brazil. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 123, n. 1, p. 18–31, 2018. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2017JG004269>.
- NEPSTAD, D. *et al.* Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1118–1123, 2014. ISSN 10959203.
- NIYOGI, D. *et al.* Direct observations of the effects of aerosol loading on net ecosystem CO₂ exchanges over different landscapes. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 20, p. 1–5, 2004. ISSN 00948276.
- NOGUEIRA, E. M. *et al.* Tree height in Brazil's 'arc of deforestation': Shorter trees in south and southwest Amazonia imply lower biomass. **Forest Ecology and Management**, v. 255, n. 7, p. 2963–2972, 2008. ISSN 03781127.
- OLIVEIRA, M. I. *et al.* Planetary boundary layer evolution over the amazon rainforest in episodes of deep moist convection at the amazon tall tower observatory. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 20, n. 1, p. 15–27, 2020. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/20/15/2020/>.
- OLIVEIRA, P. H. *et al.* The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO₂ flux in Amazonia. **Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology**, v. 59, n. 3, p. 338–349, 2007. ISSN 02806509.

OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. **The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna**. Columbia University Press New York, 2002. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/10.7312/oliv12042>.

OMETTO, J. *et al.* Cross-chapter paper 7: Tropical forests. In: _____. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2022. p. 2369–2410. ISBN 9781009325844.

PAN, Y. A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v. 333, n. August, p. 988–993, 2011.

PARDO, L. H. *et al.* Drop size distribution broadening mechanisms in a bin microphysics eulerian model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, American Meteorological Society, Boston MA, USA, v. 77, n. 9, p. 3249 – 3273, 2020. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atms/77/9/jasD200099.xml>.

PRADO, D. E.; GIBBS, P. E. Patterns of Species Distributions in the Dry Seasonal Forests of South America. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, v. 80, n. 4, p. 902, 1993. ISSN 00266493.

PROCOPIO, A. S. *et al.* Multiyear analysis of amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 3, p. 1–4, 2004. ISSN 00948276.

RAP, A. Fires increase Amazon forest productivity. **Geophysical Research Letters**, n. June, p. 4654–4662, 2015. ISSN 00948276.

RAP, A. *et al.* Enhanced global primary production by biogenic aerosol via diffuse radiation fertilization. **Nature Geoscience**, Springer US, v. 11, n. 9, p. 640–644, 2018. ISSN 17520908. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41561-018-0208-3>.

RATTER, J. A. *et al.* Observations on the vegetation of northeastern Mato Grosso II. Forests and soils of the Rio Suiá–Missu area. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing papers of a Biological character. Royal Society (Great Britain)**, v. 203, n. 1151, p. 191–208, 1978. ISSN 00804649.

REBOITA, M. S. *et al.* Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. **Terra e Didática**, v. 8, n. 1, p. 34–50, 2012.

REICHSTEIN, M. *et al.* On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Global Change Biology**, v. 11, n. 9, p. 1424–1439, 2005. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>.

REINDL, D. *et al.* Diffuse fraction correlations. **Solar Energy**, v. 45, n. 1, p. 1–7, 1990. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9090060P>.

REMER, L. A. *et al.* The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 62, n. 4, p. 947–973, 2005. ISSN 00224928.

REMER, L. A. *et al.* MODIS 3 km aerosol product: Algorithm and global perspective. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 6, n. 7, p. 1829–1844, 2013. ISSN 18671381.

SÁ, S. S. de *et al.* Contributions of biomass-burning, urban, and biogenic emissions to the concentrations and light-absorbing properties of particulate matter in central amazonia during the dry season. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 19, n. 12, p. 7973–8001, 2019. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/19/7973/2019/>.

SAATCHI, S. *et al.* Detecting vulnerability of humid tropical forests to multiple stressors. **One Earth**, Cell Press, v. 4, n. 7, p. 988–1003, jul 2021. ISSN 25903322.

SAATCHI, S. S. *et al.* Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 108, n. 24, p. 9899–9904, 2011. ISSN 00278424.

SCHAFFER, J. S. *et al.* Observed reductions of total solar irradiance by biomass-burning aerosols in the Brazilian Amazon and Zambian Savanna. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 17, p. 2–5, 2002. ISSN 19448007.

SCHAFFER, J. S. *et al.* Characterization of the optical properties of atmospheric aerosols in Amazônia from long-term AERONET monitoring (1993-1995 and 1999-2006). **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 113, n. 4, p. 1–16, 2008. ISSN 01480227.

SCHAFFER, J. S. *et al.* Atmospheric effects on insolation in the Brazilian Amazon: Observed modification of solar radiation by clouds and smoke and derived single scattering albedo of fire aerosols. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. 20, p. LBA 41–1–LBA 41–15, 2002. ISSN 01480227.

SCHUEPP, P. H. *et al.* Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 50, n. 1-4, p. 355–373, 1990. ISSN 00068314.

SHILLING, J. E. *et al.* Aircraft observations of the chemical composition and aging of aerosol in the manaus urban plume during goamazon 2014/5. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 18, n. 14, p. 10773–10797, 2018. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/18/10773/2018/>.

SILVA-JUNIOR, C. H. L. *et al.* Persistent collapse of biomass in amazonian forest edges following deforestation leads to unaccounted carbon losses. **Science Advances**, v. 6, n. 40, p. eaaz8360, 2020. Disponível em: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/sciadv.aaz8360>.

SPITTERS, C. J. *et al.* Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis Part I. Components of incoming radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 38, n. 1-3, p. 217–229, 1986. ISSN 01681923.

SULLIVAN, M. J. P. *et al.* Long-term thermal sensitivity of Earth’s tropical forests. **Science**, in press, n. 800, p. 869–874, 2020.

TRIBUZY, E. S. Canopy leaf temperature variations and their effect on the CO₂ assimilation rate in Central Amazonia (in Portuguese). **Doctoral thesis**, p. 102, 2005.

VENTURINI, A. M. *et al.* Soil microbes under threat in the amazon rainforest. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 38, n. 8, p. 693–696, 2023. ISSN 0169-5347. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169534723001118>.

VOURLITIS, G. L. *et al.* Temporal patterns of net CO₂ exchange for a tropical semideciduous forest of the southern Amazon Basin. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 116, n. 3, p. 1–15, 2011. ISSN 01480227.

VOURLITIS, G. L. *et al.* Seasonal variations in the net ecosystem CO₂ exchange of a mature Amazonian transitional tropical forest (cerradão). **Functional Ecology**, v. 15, n. 3, p. 388–395, 2001. ISSN 02698463.

VOURLITIS, G. L. *et al.* Seasonal variations in the evapotranspiration of a transitional tropical forest of Mato Grosso, Brazil. **Water Resources Research**, v. 38, n. 6, p. 30–1–30–11, 2002. ISSN 00431397.

WANG, X. *et al.* Intermediate aerosol loading enhances photosynthetic activity of croplands. **Geophysical Research Letters**, v. 48, n. 7, p. e2020GL091893, 2021. E2020GL091893 2020GL091893. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020GL091893>.

WANG, Z. *et al.* Aerosol pollution alters the diurnal dynamics of sun and shade leaf photosynthesis through different mechanisms. **Plant, Cell & Environment**, v. 45, n. 10, p. 2943–2953, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/pce.14411>.

WU, J. *et al.* Leaf development and demography explain photosynthetic seasonality in amazon evergreen forests. **Science**, v. 351, n. 6276, p. 972–976, 2016. Disponível em: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.aad5068>.

WUTZLER, T. *et al.* Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc. **Biogeosciences**, v. 15, n. 16, p. 5015–5030, 2018. ISSN 17264189.

YAKIR, D. 4.07 - the stable isotopic composition of atmospheric co₂. In: HOLLAND, H. D.; TUREKIAN, K. K. (Ed.). **Treatise on Geochemistry**. Oxford: Pergamon, 2003. p. 175–212. ISBN 978-0-08-043751-4. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B008043751604038X>.

YAMASOE, M. A. *et al.* Effect of smoke and clouds on the transmissivity of photosynthetically active radiation inside the canopy. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, n. 6, p. 1645–1656, 2006. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/6/1645/2006/>.

YUAN, W. *et al.* Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. **Science Advances**, v. 5, n. 8, p. 1–13, 2019. ISSN 23752548.

ZHANG, M. *et al.* Impact of cloudiness on net ecosystem exchange of carbon dioxide in different types of forest ecosystems in China. **Biogeosciences**, v. 7, n. 2, p. 711–722, 2010. ISSN 17264189.

3 REFLEXÕES ENSAÍSTICAS SOBRE A PRECIFICAÇÃO DO CARBONO NA AMAZÔNIA

RESUMO

A precificação do carbono é um mecanismo que permite o predomínio do poder sobre os recursos naturais; usado como justificativa para mitigar os impactos das mudanças climáticas, promover desenvolvimento socio-econômico, sustentabilidade e erradicação da pobreza. Entretanto, não há, concretamente, até o momento, benefícios sociais e ambientais claros advindos da regulação normativa relacionada à compra e venda de carbono. Arraigados na ideia de desenvolvimento econômico a partir da exploração de recursos não-renováveis, grandes corporações, empresas e países, pressionados pelo Protocolo de Quioto, fomentam mecanismos para manterem suas emissões de gases GEE em detrimento do que eles rotineiramente intitulam "serviços-ecossistêmicos". Essa nova forma política de exploração, visa expandir o comércio do ar, como também outros elementos da natureza, tal como observado em relatórios especializados de contabilização dos recursos naturais, como o System of Environmental Economic Accounting (SEEA /DSEA). Este capítulo se assenta nas incertezas, limitações e desafios científicos ainda não superados pelos estudiosos e traz reflexões oportunas sobre os aspectos impraticáveis da precificação de carbono no Brasil. Para tal, argumentam-se dois fatores preponderantes, interconectados: entraves científicos e instabilidade jurídica. A falta sistemática de observações in-situ com amplo espectro de instrumentos operando continuamente por um longo período é apontada como a principal fonte de incertezas na representação física dos sistemas numéricos usados para calcular o saldo líquido de CO₂, na interface planta atmosfera. Eventos extremos e fenômenos de variabilidade climática natural interagem com o crônico e progressivo desmatamento na região, criando mecanismos de retroalimentação ainda não representados nos sistemas numéricos. Essas limitações, propiciam instabilidade jurídica no sistema normativo regulatório de leis e projetos de lei no âmbito da Política Nacional de Mudança do Clima. Para contornar o problema, um conjunto de leis normativas bastante complexo deverá ser criado para assegurar e conciliar conhecimentos científicos, interesses socio-econômicos e ética ao longo do processo de comercialização do carbono, tornando-o impraticável ou inviável. Nesta etapa, toma-se como objeto instrutivo a PL528-A/2021, ainda em desenvolvimento no Brasil. Uma breve reflexão ensaística é feita para destacar as fragilidades existentes no referido projeto de lei e suas implicações para as bases de sustentação da vida na Amazônia. Como resultado, identifica-se a necessidade de modificações significativas e uma série de aditivos à Política Nacional de Mudança do Clima. Adicionalmente, sugerem-se explorações de recursos voltadas para bioeconomia, incorporando dispositivos que assegurem os princípios constitucionais da ética, legalidade e proporcionalidade, garantindo assim a efetiva participação dos povos originários nas atuais e futuras pesquisas na região da Amazônia. Esses povos, empoderados de conhecimentos milenares e científicos, serão essenciais para as decisões nos âmbitos nacional e global relacionadas ao futuro de nossos biomas.

Palavras-chave: Incertezas-Desafios. Mercantilização-carbono. PL528-A/2021. Instabilidade-Jurídica

ABSTRACT

Carbon pricing is a mechanism that allows the predominate power over natural resources, used for socio-economic development, climate change mitigation, sustainability, and poverty eradication. However, to date, there are no clear social and environmental benefits arising from regulations related to the purchase and sale of carbon. Rooted in economic development based on exploring non-renewable resources, large corporations, companies, and developed countries, pressured by the Kyoto Protocol, promote mechanisms to maintain their GHG (Greenhouse gas emissions) amounts to what they routinely call ecosystem services. This new political form of exploration aims to expand the use of environmental assets in trade and other elements of nature, as observed in reports specializing in this type of accounting, such as the System of Environmental-Economic Accounting (SEEA), from The United Nations Department of Economic and Social Affairs. United Nations Economic and Social (UN DESA). This chapter is based on the uncertainties, limitations, and scientific challenges that scholars still need to overcome and brings timely reflections on the impractical aspects of carbon pricing in Brazil. To this end, two dominant factors, closely connected, are argued: scientific obstacles and legal instability. The systematic lack of in-situ observations with a broad spectrum of instrumentation operating continuously for an extended period is pointed out as the primary source of uncertainty in the physical representation of the numerical systems used to calculate the net balance of CO₂, at the plant-atmosphere interface. Extreme events and phenomena of natural climate variability interact with chronic and progressive deforestation in the region, creating positive and negative feedback not yet represented by the numerical systems. We've identified these limitations as the leading cause of legal instability foreseen for the normative regulatory system, law 2,187/2009 (National Climate Change Policy), and underlying appendices, such as PL528-A/2021. A very complex set of normative rules will have to be created that can ensure and reconcile, primarily, scientific knowledge, socio-economic interests, and ethics throughout the entire carbon trading process, making it impractical or unfeasible. To this end, Law Project - LP-528-A/2021, still under development in Brazil, is taken as an instructive object. Here, we gave a brief essay to highlight the existing weaknesses in the current paradigm of exploitation of natural resources and its implications for the basis for sustaining life in the Amazon. As a result, we showed the need for significant modifications and a series of additions to the National Climate Change Policy. Additionally, we suggested resource explorations aimed at bioeconomy, incorporating devices that ensure the constitutional principles of ethics, legality, and proportionality, thus guaranteeing the effective participation of original peoples in current and future research in the Amazon region. These people, empowered with ancient and scientific knowledge, will be essential for decisions at national and global levels related to the future of our biomes.

Keywords: Uncertainties-Challenges. Carbon Commodification. PL528-A/2021. Legal-Instability

3.1 Introdução

3.1.1 Apresentação geral

Esta seção traz reflexões sobre os entraves científicos na Amazônia e seus impactos para o sistema normativo destinado à comercialização dos créditos de carbono no Brasil. Nesta etapa, princípios constitucionais fundamentais e conhecimentos científicos se unem para embasar reflexões ensaísticas, usadas para indicar os aspectos impraticáveis da comercialização de ativos ambientais, como o “sequestro do carbono”, objeto explorado no capítulo 2. A factualidade, aferida pelo método científico convencional, é pensada, aqui, como elemento constituinte básico-primordial e indissociável do processo de adequação e criação de leis ambientais atuais e futuras destinadas à Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). Em última análise, um conjunto de reflexões é exposto para apontar caminhos factíveis que podem contribuir para a preservação dos biomas brasileiros, conciliando crescimento econômico e desenvolvimento social. Para evitar discussões exaustivas, todas as análises são tratadas brevemente, baseadas exclusivamente na PNMC. Somente os aspectos mais relevantes e pertinentes da lei no^o. 12.187/2009, são considerados.

3.1.2 Dificuldades de medição na Amazônia Brasileira

3.1.2.1 *Entraves administrativos*

A implementação de medidas científicas na Amazônia enfrenta ainda muitos desafios. Burocracia excessiva com licitações e licenças, elevada tributação, contratos complexos entre estado e empresas e anuências de ordem ética, envolvendo culturas e conhecimentos locais, modulam fortemente a qualidade e a competitividade da pesquisa nos ambientes Amazônicos, bem como a contratação e fixação de pessoal qualificado para coordenar a realização de experimentos e estudos inovadores de longo período (Massarani, 2011). Essas dificuldades, impulsionaram radicalmente a emigração de inúmeros cientistas brasileiros nos últimos 20 anos, expatriação fomentada por melhores condições de trabalho no exterior (Nunes; Felix; Prates, 2017). Este é um fator complicador que impacta o contingente de profissionais qualificados e experientes para trabalhar com pesquisas na Amazônia, considerando a complexidade da região. A centralização da formação de recursos humanos e de infraestrutura, voltada para o eixo sul-sudeste, marcada pelo desenvolvimento econômico desigual entre os estados brasileiros, segrega e cria ambientes competitivos indesejáveis, favorecendo historicamente maior cooperação científica internacional nas porções sul e sudeste do Brasil (Yamamoto, 2000; Anjos, 2016). Com efeito, constata-se substancial falta de infraestrutura que impossibilita a criação e modernização de tecnologias próprias por sociedades profissionais e acadêmicas (Caliari; Rapini; Chiarini, 2020).

O custo operacional para implantar e manter medidas de campo é outro fator importante. Os custos globais variam significativamente (Negrón-Juárez *et al.*, 2020), dependendo do bioma, tamanho, complexidade observacional, tecnologia empregada nos equipamentos, e o quão remotos são os locais de observação. A acessibilidade é outro fator limitador crítico, pois grande parte da Amazônia é remota e de difícil acesso, com vastas áreas de floresta densa e rios imprevisíveis. Isso torna o trabalho logístico de transporte e a instalação de infraestrutura de pesquisa complicadas e caras. Um exemplo concreto, é o custo operacional global gerado pelo programa LBA (MCTi) durante os anos 2000', da ordem de 100 milhões de reais (Lasslop *et al.*, 2008). Este número mais que triplicou durante os anos 2010 com a implementação de dois novos grandes projetos, também implantados na Amazônia Central, são eles: ATTO (Amazon Tall Tower Observatory) e

AMAZON-FACE (Free Air CO₂ Enhancement), destinados às observações de troca de partículas e gases entre a floresta e a atmosfera, especialmente CO₂, CH₄ e propriedades de aerossóis atmosféricos (Andreae *et al.*, 2015; Hart *et al.*, 2020). A torre do projeto ATTO, erguida no município de São Sebastião do Uatumã, por exemplo, custou cerca de R\$ 18,4 milhões (FINEP, 2023) enquanto o AMAZON-FACE já ultrapassa a marca de R\$ 50 milhões. Atualmente, estes projetos encontram-se ativos e em áreas de difícil acesso, com comunicação e conectividade limitadas que também dificultam a colaboração e a comunicação com outras instituições de pesquisa e cientistas *in-situ*. É importante refletir sobre a relevância científica de ambos, mas também as receitas orçamentárias anuais extraordinárias. Trata-se de apenas dois “novos” pontos de observação, distantes cerca de 200 km, distribuídos nos mais de 1,5 milhões de km², na Amazônia Central. No entanto, estudos mostram que a representatividade dessas medidas (*footprint*) não excedem 500 km² (Botía *et al.*, 2022). Obviamente, isso não reduz a importância dos grandes programas e experimentos, mas revela, ao mesmo tempo, discernimento sobre as limitações existentes.

Fatores natural e social também influenciam fortemente a manutenção e a qualidade das medidas na região. Condições climáticas e ambientais extremos: elevadas temperaturas, alta umidade e constantes chuvas criam um adicional desafio para a operação de equipamentos de pesquisa e para a saúde dos pesquisadores (SPA, 2021). Desmatamento, práticas de exploração ilegal, conflitos territoriais, são exemplos de pressões sociais que também impactam a segurança dos pesquisadores e a integridade dos ecossistemas que estão sendo estudados e, portanto, a qualidade das informações registradas (Nepstad *et al.*, 2014). Além disso, a pesquisa na Amazônia, frequentemente, envolve interações com as comunidades originárias locais, requerendo conhecimentos tradicionais e culturas desafiadores em termos de colaboração e ética de pesquisa (Nunes, 2019). Além das possíveis incertezas que podem ser geradas, a complexidade aumenta consideravelmente conforme o ambiente estudado. Por exemplo, regiões como o ecótono Cerrado-Amazônia, estudado no capítulo 2, apresentam alta complexidade na interpretação de resultados, já que este ambiente é frequentemente impactado por queimadas locais, regionais e forte degradação ambiental (Silva *et al.*, 2023).

Erros e incertezas ao longo do tempo, são pontos importantes, que afetam a qualidade das medidas, frequentemente desconsiderados em muitas análises e relatórios. A calibração regular de instrumentos, garante o bom estado de funcionamento ao longo do período de medição. Como já mencionado, a falta de manutenção adequada leva a erros significativos para o monitoramento das condições ambientais, validação e controle de qualidade das informações prestas à sociedade. Para realizar uma boa avaliação de erros e incertezas, modelos estatísticos robustos são necessários (Brown *et al.*, 1995).

Os modelos são diversos para atender esta finalidade e esbarram em teorias matemáticas complexas, nem sempre disponíveis ou escritos nos códigos computacionais. Quantificar a confiabilidade das medições, auxiliando na compreensão dos limites de precisão dos dados e aprimoramento de modelos teóricos, portanto, demanda também programas científicos de longo prazo na Amazônia com densas redes de instrumentação capaz de produzir dados confiáveis se forem cuidadosamente planejados, monitorados e documentados (Menefee *et al.*, 2022). Não havendo um monitoramento contínuo adequado, com atenção aos detalhes, a precisão das medições ao longo do tempo são afetadas e longos períodos ficarão desprovidos de informações com dados críticos (Kruijt *et al.*, 2004). Essas lacunas serão então preenchidas por modelos teóricos, geralmente, não calibrados às condições locais, procedimento necessário para a modelagem dos sistemas numéricos que gera informações espacializadas e distribuídas para toda a Amazônia (Wutzler *et al.*, 2018). Isso fatalmente induzirá interpretações equivocadas, tanto nos modelos teóricos que estarão

mal-calibrados e sem representação física, quanto nos sistemas de modelagem numérica que se utilizam de banco de dados para calibrar e representar fisicamente as informações de um determinado ambiente. A realização das análises diagnósticas e prognósticas necessárias para tratar, prever e mitigar impactos depende fortemente desses aspectos (Moreira *et al.*, 2017; Rap *et al.*, 2018).

Pelas razões apontadas, a Amazônia conta ainda com pouquíssimos pontos de observação (Apêndice K) com as coordenadas na Tabela J.1, considerando principalmente sua territorialidade e tamanha complexidade dos fenômenos ambientais e dos processos socio-econômicos na região (Gandour, 2021). Para o monitoramento sistemático do saldo líquido de CO₂, por exemplo, distribuiu-se, nos últimos 40 anos, não mais que 10 torres micrometeorológicas espalhadas nos 5,5 milhões de km² de área de floresta, com pontos de observação majoritariamente distribuídos na Amazônia Central (Lasslop *et al.*, 2008). Muito pouco se sabe sobre o balanço de carbono na região, embora inúmeros experimentos científicos tenham sido realizados desde os anos 70-80, aos dias atuais (Martin *et al.*, 2010b; Martin *et al.*, 2010). Esses experimentos, evidentemente, continuarão sendo fundamentais para o conhecimento atualmente existente e para compreensão da Amazônia quanto entidade regional (LBA, FASE-2). No entanto, trata-se de expedições científicas intensivas, limitadas e projetadas para um curto período, com o registro de poucas amostras, embora, geralmente, uma ampla gama de fenômenos sejam avaliados com um grande espectro de medidas/grandezas. Por serem de curto prazo, campanhas intensivas muitas vezes não captam o comportamento e a resposta dos biomas brasileiros às adversidades do tempo e do clima, sendo de extrema importância a criação e a manutenção de programas científicos de cooperação internacional como, o LBA, PPBIO, GENOMA, dentre outros (Lasslop *et al.*, 2008). Os aspectos supracitados, explicam boa parte dos “subatendimentos” em termos de pesquisa e desenvolvimento no Brasil, especialmente na região Amazônica.

Portanto, deve-se ter em mente que estruturas administrativas com logísticas complexas são continuamente requeridas para manter operante um vasto e diversificado número de instrumentos e medidas de longo-prazo nos ecossistemas amazônicos, geralmente, em áreas de difícil acesso, hostis à tecnologia empregada na fabricação de equipamentos importados pelos cientistas brasileiros. Tudo isso, contribui para um monitoramento rasteiro dos biomas, com grande lacuna de medição e registro de grandezas físicas básicas e essenciais para o entendimento dos ecossistemas amazônicos.

3.1.2.2 *Entraves científicos*

Avaliar processos e fenômenos de curto período, por exemplo, interações que ocorrem entre folhas e o ambiente, requer instrumentação capaz de determinar o comportamento molecular e celular dos constituintes foliares em resposta a fatores externos (exógenos). Alta tecnologia empregada é imprescindível para decodificação de inúmeros processos químicos e físicos que ocorrem nessa interface (Huntingford *et al.*, 2008). Executar medidas nessa escala é, portanto, desafiador, principalmente, devido às limitações técnicas que vão desde o tamanho da amostra, onde folhas individuais não representam o conjunto maior, como árvores ou ecossistemas inteiros, sendo necessário coletar e analisar várias folhas para obtenção de uma maior representatividade da vegetação, até a capacitação de pessoal que possa amostrar, processar e analisar os dados adquiridos (Huntingford *et al.*, 2008). Outras limitações consideram as condições ambientais que variam no tempo e no espaço como a quantidade de luz solar, umidade, temperatura; preparação das amostras que requer procedimentos para garantir o acondicionamento e processamento adequados, uma instrumentação específica para medir a área foliar (Mercado *et al.*, 2009; Rap, 2015).

Outra etapa importante é a integração do tipo de dado coletado, que precisa representar fenômenos em escala maior como o nível de ecossistema ou uma paisagem. Para esse nível de compreensão os pesquisadores geralmente planejam estudos cuidadosos, usam métodos estatísticos robustos, realizam análises em larga escala e consideram as condições ambientais específicas ao interpretar os resultados das medidas foliares (SPA, 2021; IPCC, 2022). Além disso, a colaboração interdisciplinar e o uso de tecnologias avançadas podem ajudar a melhorar a precisão e a eficiência das medidas e estimativas numéricas de processos ecofisiológicos-chave (Huntingford *et al.*, 2008; Huntingford *et al.*, 2013). Sistemas numéricos computacionais desenvolvem-se na busca por essa compreensão, pois a natureza não funciona linearmente, ela ocorre e precisa continuar a existir nos fenômenos de ordem não-linear, o chamado sistema caótico, onde tudo está acontecendo ao mesmo tempo. Captar, medir, analisar, interpretar são ações que fazem parte na busca pela compreensão dos fenômenos naturais. Recorrer a instrumentos tem sido uma das formas mais próximas dessa realidade. Dependendo do que se quer responder, a pesquisa precisará de instrumentos eficazes e de fácil manuseio, o que nem sempre é possível ou está prontamente disponível no mercado. Além do alto custo para aquisição desses instrumentos, depara-se também com a deficiência nacional para desenvolver a própria tecnologia, como já mencionado, seja nas construções de sensores ou desenvolvendo os próprios sistemas numéricos computacionais. A ciência brasileira ainda é muito dependente da tecnologia externa.

A dificuldade em simular o comportamento e as respostas dos ecossistemas amazônicos frente às adversidades do tempo e do clima, cria incertezas ainda maiores para os sistemas numéricos e maiores dificuldades para as ações de mitigação e controle dos impactos causados pelo desmatamento ilegal, pela ação de fenômenos extremos e de variabilidade climática natural, os quais serão cada vez mais frequentes (IPCC, 2022). As projeções pelo Hadley-Center (Instituto Inglês) e outros institutos, são exemplos concretos. Eles destacam em seus resultados para a Amazônia, as incertezas e as divergências para os diferentes cenários (otimistas/pessimistas) e lugares na Amazônia (Marengo; Souza, 2018). Apesar desses desafios, a pesquisa na região continua sendo de extrema importância, devido à sua contribuição para a compreensão da biodiversidade global, mudanças climáticas, ciclos biogeoquímicos e o impacto das atividades humanas em ecossistemas sensíveis. Portanto, muitos cientistas e instituições continuam a enfrentar esses desafios para avançar nosso conhecimento sobre essa região crítica do planeta.

3.2 Instabilidade jurídica e comercialização do carbono no Brasil

As leis, em geral, não são necessariamente estabelecidas a partir do conhecimento científico, mas sim a partir de um processo político e legislativo o qual pode considerar evidências científicas, princípios éticos, valores sociais, necessidades econômicas e outros fatores. São vários os princípios constitucionais que orientam o processo legislativo no Brasil, fundamentais para garantir justiça, legitimidade e respeito aos direitos e garantias individuais dos cidadãos (Trennepohl, 2022). Convenientemente, destaca-se, aqui, o Princípio da Razoabilidade, concebido para inibir arbitrariedades e garantir proporcionalidade aos objetivos que se visa alcançar; factibilidade ou exequibilidade. Não existe, entretanto, mecanismos regulatórios do qual se deve usar ou devem estar equilibrados os aspectos científicos, éticos, sociais e econômicos durante o processo de elaboração das leis (Jeklin *et al.*, 2016). A proporcionalidade desses aspectos, depende, fundamentalmente, do problema em questão, o qual pode ou não ser tratado adequadamente. A lucidez com que se trata o problema, entretanto, dependerá ainda de variáveis internas e intrínsecas, dentre

elas: condição política, intelectual e ética do Congresso Nacional, isto é, discernimento e competência interna do Senado Federal e Câmara dos Deputados.

Em 2021, publicou-se projeto de lei sob no. 528-A, atualmente em elaboração e discussão no Brasil. Baseada na Política Nacional de Mudança do Clima — Lei no. 12.187, de Dez/2009. A proposta visa, principalmente, regimentar o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE) e estimular o mercado voluntário de créditos de carbono no Brasil (OECD, 2021). A criação de um arcabouço legal para tratar adequadamente as transações com os chamados “ativos de carbono” é apresentada como alternativa viável e única de preservação da integridade ambiental dos biomas brasileiros, geração de riquezas e combate a pobreza. No entanto, as incertezas apontadas anteriormente criam problemas substanciais para a criação de um sistema normativo que possa estar preparado para fiscalizar, julgar e/ou executar leis ambientais de regulação das negociações atualmente em curso (Jeklin *et al.*, 2016). Os elementos básicos para criação de um sistema jurisdicional, neste caso, devem se ater majoritariamente nos conhecimentos técnicos e científicos atualmente existentes em relação à Amazônia (Almenar; Alcaraz; Romero, 2021). Nesse sentido, o legislativo precisará encampar, compilar e sistematizar os resultados científicos encontrados nos últimos 20-30 anos na Amazônia, o que não é trivial. Neste cenário, hipotetiza-se que haverá, portanto, a divisão de grupos de interesse: alguns, considerarão a ciência e depositarão nos cientistas, confiança e lugar de fala. Outros negarão ou distorcerão a ciência dos resultados e o amplo corpo de literatura sobre o tópico, seja por falta de compreensão/entendimento ou por interesses específicos. O desenvolvimento econômico, pautado na exploração desmedida dos recursos naturais, poderá propagar desinformação em massa, já que padecemos de um amplo e competente jornalismo científico com sólida formação no tópico, imersos nos princípios éticos e verdadeiramente sustentáveis. Nas próximas seções, este problema será analisado a partir de abordagens geopolíticas.

3.2.1 A situação atual da precificação do carbono no Brasil

3.2.1.1 *Abordagens geopolíticas*

Algumas das iniciativas relacionadas à precificação do carbono incluem o mercado de carbono, um sistema que permite a compra e venda de créditos de carbono, com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) na tentativa de minimizar as mudanças climáticas. Está baseado no princípio de que empresas, organizações e países podem compensar suas emissões de GEE financiando projetos que reduzem ou remover emissões equivalentes em outros lugares. A ideia central do mercado de carbono é criar um incentivo econômico para a redução das emissões de GEE. Esse mercado foi estabelecido após o tratado internacional (Protocolo de Quioto), vigorando a partir de 2005.

Essa ideia de mercantilização da natureza ganha formas/moldes dentro da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (Rio-92). Uma forma similar a esta prática aconteceu durante o período Pós II Guerra Mundial, com a chamada Revolução Verde que ditou e ritmou práticas nas mudanças tecnológicas principalmente na área agrícola com o uso intensivo de pesticidas, alterações genéticas das plantas e máquinas sofisticadas em substituição à agricultura familiar, resultando no aumento do PIB (Produto Interno Bruto) mas que gerou graves impactos socioambientais (contaminação do solo, dos humanos etc.). As ideias e a maneira como ocorreu a Revolução Verde, pode ser observado através do tempo, nos discursos implantados durante conferências sobre o meio ambiente realizado, por exemplo, pela ONU (Organizações das Nações Unidas), e no caso observado durante a Rio+20, ocorrido em 2012, onde foi pontuado temas como a economia verde,

erradicação da pobreza, segurança alimentar e desenvolvimento sustentável.

É possível observar o comportamento e a sociedades através desses encontros mundiais onde as principais economias globais estão à frente e apresentam documentos desenvolvidos e definidos sob o ponto de vista discursivo do seu tempo. Segundo (Foucault, 2018) cada época possui sua própria episteme (conjunto de conhecimentos, princípios e regras que guiam o pensamento, a produção de conhecimento e a compreensão em uma determinada época ou período histórico) e quais afirmações são consideradas verdadeiras e como tal conhecimento é construído. Nessas conferências as grandes empresas multinacionais, bancos e seguradoras tem direcionado a pauta ambiental mostrando-se preponderante em todos os processos devido ao próprio sistema econômico adotado.

Para que os países emissores de GEE possam cumprir as regras do Protocolo de Quioto, precisou estabelecer uma flexibilização e entrar em cena os países subdesenvolvidos para ampliar e favorecer a meta imposta. Para esse propósito dois mecanismos foram criados para comercializar essas emissões, onde empresas ao atingirem os níveis limites de emissões paguem por projetos de compensação das suas emissões.

Esse é o cenário (espaço) onde os países subdesenvolvidos revelam que sua organização do espaço é dependente dessas forças políticas externas, principalmente a detenção do conhecimento sobre o desenvolvimento de tecnologias. Diante desse modelo adotado, a ideologia do crescimento, o Estado instrui e facilita o trajeto para que os modernizadores possam operacionalizar, deixando o terreno propício para atividades exógenas. A crescente pauta ambiental discutida dentro dessas conferências, são sempre mediadas exclusivamente por países do chamado Primeiro Mundo - as grandes potências econômicas. A relação capital x natureza vem sendo acompanhada dentro desses encontros através de discursos ideológicos, como observado nas conferências Rio 92 e Rio+20, com o avanço do fluxo do capital em direção aos recusos naturais. Uma evolução é observada com o discurso de um desenvolvimento sustentável atrelada à ideia de uma economia verde, utilizando-se de conceitos ambientais de modo a inseri-los na lógica de acumulação para o contínuo avanço da exploração dos bens naturais, conservando o contínuo crescimento e minimizando a crise ambiental que se está imersa.

A forma como uma sociedade e a vida econômica se organiza e se estrutura, depende da maneira como o espaço a nível nacional se comporta e se constitui através, por exemplo, dos níveis de capital estrangeiro aplicado, e como este exerce influência sobre as atividades econômicas e as maneiras pelas quais serão influenciadas. A forma política, em seu nível mais alto - O Estado, participa nessa construção, definindo ou alterando modelos de produção, consumo e da disposição dos recursos. Algo já apontado e observado por (Santos, 2014) mostra as formas de acumulação de tempo, observando o passado histórico-social através das divisões do trabalho, subordinada a uma temporalidade internacional em decorrência do modo de produção e consumo. Esse modelo que se tornou hegemônico e forma as sociedades capitalistas traz uma visão de que os recursos naturais são infinitos e de que tudo é ascendente e progressivo. Essa forma de pensar é também uma das bases da crise ambiental contemporânea, que vem sendo vivenciada no tempo e no espaço, e que até o momento vem instituindo uma inteligibilidade sobre os fenômenos que ocorrem nas relações sócioambientais.

Dentro do mercado mundial do carbono, ganha-se a a visão através dos discursos que se pode compensar a poluição através de mecanismos de precificação. A Organização das Nações Unidas, criou uma estrutura desenvolvida pela Divisão de Estatística (SYSTEM OF ENVIRONMENTAL ECONOMIC ACCOUNTING) (SEEA, 2019; SEEA, 2021) que fornece diretrizes e princípios gerais para integrar dados econômicos e ambientais. Um sistema contábil dos bens ecossistêmicos, onde todas as funções são tratadas como ativos

financeiros. O SEEA como parte de sua abordagem utiliza um compartimento para monitorar e relatar as emissões de gases de efeito estufa e outras atividades econômicas que afetam o meio ambiente. Este setor das Nações Unidas tem encontrado dificuldades para contabilizar o sequestro de carbono atmosférico pois é preciso levar em consideração cálculos específicos que depende da implementação de dados disponíveis para determinado país ou região. Embora o uso da abordagem do SEEA não seja de uso obrigatório, o mesmo apoia o uso pelos países com o discurso de que esse mecanismo permitirá entender a contribuição dos ecossistemas em termos monetário, auxiliando na compreensão do homem.

Essa forma de ver os ambientes naturais é na visão de (Santos, 2008) temporalidades hegemônicas, onde há um poder isolado e absoluto, e esse tempo é o do capital na sua forma globalizada, habilitado para exercer poder geopolítico sobre os demais, reordenando territórios, instaurando os novos dinamismos socioterritoriais. As temporalidades vividas são realmente distintas, observando-se a diferença entre os atores sociais envolvidos, deixando em evidência o tempo-mercadoria expressa na forma contabilizada dos recursos naturais, colocando a ideia de que tudo pode ser apropriado, observando-se a concentração do conhecimento técnico-científico imbricada nas relações sociais e de poder.

As grandes conferências ambientais globais estão moldando a percepção pública e política de maneira a favorecer interesses econômicos e corporativos, enquanto os verdadeiros problemas socioambientais são minimizados. Os grandes atores corporativos empresariais tem trabalhado de forma sincronizada, aproveitando cada espaço, seja ele físico ou virtual, para implementar o mercado de crédito de carbono se utilizando dos graves problemas ambientais contemporâneos.

Apesar de ainda não estar regularizado no Brasil, a prática da comercialização de carbono tem sido divulgado por empresas e corporações interessadas em capitalizar e lucrar com este comércio. Propor e fortalecer um mercado regulamentado, apenas justificando a emissão industrial, não se sustenta já que a maior fonte de emissões no Brasil é a queima da biomassa vegetal (IPCC, 2021). Os discursos apresentados em relatórios e webinários trazem a justificativa da implementação de uma agenda ESG (Environmental, Social, Governance) com projetos voltados na proteção das florestas e com investimento em comunidades locais. Um dos atores envolvidos em captar projetos no Brasil é o grupo empresarial (CEBDS), que tem atuado compartilhando essa iniciativa para potenciais grupos empresariais que são as partes interessadas (stakeholders).

Nesse mercado as discussões sobre as vantagens da assetização da natureza é um tópico complexo e frequentemente controverso. Existem diferentes perspectivas sobre os benefícios dessa abordagem, e muitas delas estão relacionadas a argumentos de mercado, conservação ambiental e gestão sustentável de recursos naturais. Como o Brasil não possui um mercado regulamentado, relatórios e projetos nas esferas Estaduais, dentro do mercado voluntário, estão ganhando ampliação e apresentam em documentos que quantificarão absorção, sequestro de CO₂ e outros serviços ecossistêmicos mas sem descrever os detalhes para posteriormente valorar o carbono.

Atualmente toda essa avaliação na aplicação de crédito de carbono tem ganhado novos desdobramentos a nível global. Nesse novo cenário político mundial de energia e clima que se arma, novos mecanismos de avaliações de riscos de projetos (<https://bezerocarbon.com/>) tem sido desenvolvido, promovendo uma possível ruptura. Nessa plataforma os projetos serão classificados dentro de uma análise baseada em risco, disponível publicamente avaliando créditos de carbono em todos os setores.

3.3 O pensamento desenvolvimentista sobre a Amazônia

A região Amazônica continua no longo processo de exploração dos bens naturais devido a significativa procura por commodities no âmbito do comércio internacional, como destacado pelo Banco Mundial (Bank, 2008) e por (Black, 2015), desempenhando uma função que é crucial para muitas nações em desenvolvimento que dependem da exportação de produtos primários. O Brasil, por exemplo, surgiu no início do século XXI como um importante protagonista no comércio global de commodities agrícolas (Embrapa, 2018), (IBGE, 2022). Um exemplo dessa fronteira de expansão de monoculturas, Mato Grosso, alcançou maior sofisticação na sua atividade produtiva devido à crescente retenção de capital pelo próprio Estado, assim como as ações de antecipação dos interessados (sojeiro), provocado por iniciativa própria ou de terceiros numa escalada que extrapola qualquer controle e conseqüentemente seguem as ações de desmatamento, especulação, grilagem, ilegalidade e violência. É importante pontuar que esses atributos não são específicos da soja, são as regras de um avanço desordenado, sobretudo das frentes nacionais onde tudo é direcionado às pressas para obtenção de lucros, e tem sido reproduzido com irracionalidade.

E sob esse olhar a Amazônia segue ainda sendo o terceiro Brasil, um pensamento de um modelo desenvolvimentista empregado pela visão ideológica durante o período militar através do chamado Plano de Desenvolvimento para Amazônia (PDA), sendo aquele que serve commodities, riquezas minerais e energia. Hoje é possível acompanhar remotamente as transformações de uso do solo e a frente de expansão agrícola que vem ocorrendo de forma intensiva. O Anexo (Figura L.1) desenvolvida com base nos dados espacializados produzidos por (F. G. Assis *et al.*, 2019) mostra o desmatamento acumulado durante 2002-2022, com o crescente avanço atual sobre os territórios indígenas. O Parque Indígena do Xingu protege uma das últimas áreas remanescentes de floresta tropical no chamado arco do desmatamento assim como a perda expresiva de outros ecossistemas como a Floresta Estacional Semidecidual (Anexo I, área em verde claro), devido ao intenso processo de expansão da frente agrícola. Esse ecossistema é o último registro florestal localizado no ecótono Amazônia-Cerrado, que guarda não só o registro evolutivo da conexão entre esses biomas como também a biodiversidade e suas funções ecossistêmicas. Manter a biodiversidade tem sido um dos grandes desafios perante uma economia de grande escala.

A Amazônia, diferente das décadas de 70 e 80, ganha uma maior complexidade com o aumento da população, e uma enorme teia de negócios. Além de todas essas pressões sobre o bioma, a precificação do carbono também ganha força e ampliação sobre diversas áreas. No Estado do Mato Grosso os projetos REM Mato Grosso, Propriedades Rurais (APROSOJA/MT), Programa Produzir, Conservar e Incluir (PCI) são exemplos dessa investida. Esses projetos não apresentam de que forma estão realizando as medidas e contabilização dos estoques e fluxos de CO₂ para posteriormente comercializá-los.

Essa forma de ver e se relacionar com o meio natural faz parte da dinâmica do modelo econômico global, cuja nova era geológica chamada antropoceno (Crutzen, 2002) mostra além da degradação ambiental, uma vasta sintomatologia, cultura no qual a humanidade está imersa, sinalizando o mal-estar na civilização quanto as desesperanças de um sujeito desnorteado, onde grandes corporações detentoras das maiores riquezas planetárias tomam as decisões políticas e econômicas.

3.3.1 O sequestro de CO₂ como prática de crédito de carbono

O uso da palavra “sequestro” entra no contexto de “sequestro de carbono” sendo usada como captura e armazenamento. Refere-se à captura ou retirada de CO₂ da atmosfera

e ao seu armazenamento em reservatórios naturais, como florestas, solos ou oceano, e mais recentemente, às tecnologias desenvolvidas para captura e armazenamento de carbono. O termo “sequestro de carbono” tem ascendência na esfera da ciência e da política ambiental e se tornou mais proeminente à medida que as preocupações com as mudanças climáticas e o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera ganharam ainda mais importância e destaque. O sequestro de carbono tem sido apresentado como uma das estratégias para mitigar as mudanças climáticas, uma vez que reduz a quantidade de CO₂ na atmosfera, ajudando a diminuir o efeito estufa e o aquecimento global.

A discussão da precificação do carbono é um debate complexo e controversa que envolve diversos pontos de vista, inclusive ético. Embora haja argumentos a favor da precificação do carbono como um mecanismo eficaz na redução das emissões de GEE e atenuação dos efeitos das mudanças climáticas, também existem preocupações éticas que levam algumas pessoas a questionar tal abordagem, de que os custos relacionados a essa precificação, no caso de impostos sobre preços altos de combustíveis podem afetar grupos sociais mais vulneráveis, como pessoas de baixas renda, levando a reflexões sobre equidade social (Marques, 2016).

Segundo (Silveira; Oliveira, 2021), a tendência de projetos voltados para o mercado de carbono florestal brasileiro, em sua maioria direcionados é para o Mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) e Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+), com menores registros de projetos para obtenção de crédito por sequestro e estoque de CO₂. O estudo também aponta que os projetos mais comercializados são aqueles que estão no mercado voluntário. Isso se deve ao fato de não haver uma avaliação efetiva quanto aos riscos e incertezas na quantificação do sequestro de carbono, assim como questões que envolvem normatizações e indeterminação jurídica.

3.3.2 Caminhos factíveis para a preservação dos biomas brasileiros

Os resultados encontrados no Capítulo 2 desta pesquisa mostraram os efeitos radiativos da poluição por queimadas e seus impactos na absorção de CO₂ que é uma das funcionalidades-chave de um ecossistema. Os achados indicaram também uma acentuada diminuição nas taxas fotossintéticas (NEE) para condições de céu esfumado, com efeitos notáveis para os ótimos fisiológicos determinados por variáveis biofísicas moduladoras da troca de CO₂ na interface floresta-atmosfera. Esses resultados são representativos para o ecótono Cerrado-Floresta Amazônica, mas não podem ser expandidos ou generalizados para os demais biomas brasileiros, tão pouco para os ecossistemas adaptados sob condições diferentes daquelas encontradas no ambiente estudado. Além das incertezas encontradas nesses resultados, há ainda grandes incertezas sobre como a floresta estudada se comportaria sob condições climáticas extremas, por exemplo, intensos eventos de seca ou cheia produzidos por fenômenos como o El Niño, La Niña e outros fenômenos correlacionados como ondas de calor, falta ou excesso de cobertura de nuvens e estresse hídrico.

Embora esses resultados possam ser assimilados por sistemas numéricos como JULES-CCATT-BRAMS, WRF-CHEM, INLAND e modelos globais, com bibliotecas mais realistas para a região de estudo, seria também inadequado considerar as mesmas representações para outros tipos de floresta da Amazônia e do mundo. Como essas incertezas esbarram nas dificuldades já apontadas, isto é, nas limitações tecnológicas e teóricas acerca do funcionamento dos ecossistemas amazônicos, situações adversas de tempo e clima podem mover a capacidade da floresta em sequestrar carbono das condições de sumidouro para condições de fonte de CO₂, causando instabilidades nos sistemas normativos de negociação de créditos de carbono. Além disso, as previsões climáticas influenciariam as

próprias ações econômicas, instabilizando também o mercado de CO₂ quanto à compra e venda de ativos ambientais. Em termos práticos, o sistema normativo, consideraria tais incertezas para negociações mais arriscadas e instáveis, inibindo a fomentação das práticas de crédito de carbono no Brasil. Outro aspecto importante nesse contexto, são as incertezas associadas ao comportamento da floresta mediante o avanço das áreas degradadas, isto é, mediante a aniquilação das relações ecológicas entre as diferentes espécies de animais, plantas e microbiota que compõem os biomas brasileiros. Atualmente, inexistem simulações numéricas avançadas que possam assegurar incertezas razoáveis em relação aos impactos futuros da ausência dessas relações na capacidade de absorção de CO₂.

Fenômenos e problemas ambientais globais, naturais e antrópicos; secas extremas, ondas de calor, fenômenos meteorológicos extremos, inundações, ciclones, aquecimento dos mares, poluição, incluindo doenças fulminantes, são projeções catastróficas esperadas para o mundo “moderno”, que se confirmadas, podem dizimar a humanidade ainda no século XXI, especialmente sobre os continentes mais degradados. Essa rota de colisão tem fomentado articulações políticas e pressões internacionais sobre o Brasil, que ainda possui condições ambientais favoráveis, com as quais pode contar e se proteger em meio às adversidades previstas, tirando proveito para se desenvolver economicamente e socialmente. Por exemplo, para secas extremas; os vastos rios existentes e a transpiração das florestas podem resolver o problema. Para ondas de calor; as cordilheiras, a leste, podem ser ótima barreira e, a oeste, a vasta costa brasileira, com seu poder eólico, pode suavizar as sensações térmicas. Para fenômenos meteorológicos extremos, inundações e ciclones; vontade política, organização administrativa e social com investimentos massivos alocados à formação de recursos humanos e novas tecnologias, constituem, basicamente, as próximas tarefas. Para as doenças fulminantes; pesquisas inéditas com integração social e conhecimento local, para revelar a floresta por dentro, retirando dela as soluções mais criativas, jamais vistas.

3.4 Conclusão

É imperativo planejar cuidadosamente os programas de pesquisa readequando recursos para cobrir todas as despesas relacionadas aos projetos na Amazônia. É absolutamente aconselhável trabalhar em parceria com instituições de pesquisa locais e pesquisas em rede, focada na formação técnica e científica de comunidades indígenas e de outros povos originários; um contingente extraordinário de pessoas empoderadas, mergulhadas no conhecimento empírico-milênar, não-raro, desconsiderado pelas agências federais de financiamento. Esse conjunto de procedimentos é indispensável à qualidade e continuidade das observações e registro das amostras nos ambientes Amazônicos. Eles oxigenarão a interlocução e as experiências interculturais que são propulsores de novos conhecimentos e tecnologias desprendidas. Com isso, evita-se a perda substancial de dados e o uso de técnicas de preenchimento de falhas advindos de modelos teóricos, muitas vezes indesejáveis por serem dados sintéticos.

No contexto legal, as leis podem ser influenciadas pela ciência em várias áreas, como direito ambiental, saúde pública, segurança alimentar e muitas outras. O conhecimento científico pode ser usado para embasar a tomada de decisões legislativas, fornecendo informações sobre os impactos de certos comportamentos ou políticas, os riscos à saúde pública, os efeitos ambientais, entre outros. No entanto, as leis também refletem uma série de outros fatores, incluindo considerações políticas, econômicas, culturais e sociais. Os legisladores, ao criar leis, muitas vezes precisam equilibrar diversos interesses e valores da sociedade. Portanto, embora a ciência possa desempenhar um papel importante no

processo legislativo, as leis em si são o resultado de um processo democrático que envolve uma variedade de influências e considerações, nem todas exclusivamente científicas.

Embora os relatórios que se originaram nas conferências internacionais relacionados à ação climática internacional (Convenção Quadro das Nações Unidas e anualmente as Conferências das Partes-COP's) apontem os níveis alarmantes de emissão de GEE, medidas efetivas para contenção ainda não chegaram nem perto de serem concretizadas e o que se tem observado são práticas voltadas exclusivamente para o arranjo do poder na contínua investida do sistema político-econômico sobre os bens naturais planetários.

O Brasil precisa tratar efetivamente de políticas para controlar a maior fonte de emissão do país - a queima de biomassa florestal. Os registros das medidas em escala planetária revelam o grande problema (IPCC, 2022). Esses níveis de emissões elevadas, somada as passadas, produzem aquecimento. No Brasil, em 2021, os registros apontavam emissões brutas de GEE de 2,4 bilhões de toneladas de CO₂e, (SEEG, 2023) representando aproximadamente 3,5% do total na escala planetária. O problema não será resolvido apenas com a diminuição das emissões presentes e a sobrevivência das espécies resultará da habilidade de se queimar menos para atender as demandas de produção.

A natureza dentro do seu processo evolutivo vem desempenhando com maestria a melhor tecnologia custo-benefício. O melhor design são as florestas. Elas se desenvolveram e ocupam uma área total de aproximadamente 40 milhões de quilômetros quadrados distribuídas pela superfície do planeta. Estão presentes e refinando o capital ecológico por 600 milhões de anos, desenvolvendo-se com a captura da luz solar. As concentrações das emissões de GEE planetária vem mudando e o que se tem observado é mais queima e menos florestas, apontando que essas mudanças acentuam ainda mais a necessidade de florestas. E até aqui elas são a única parte desta equação que converte o efeito das emissões em grande escala. Não é precificando esse serviço de captura de CO₂, prestado gratuitamente pela natureza, que a humanidade conseguirá amenizar os impactos dos efeitos de GEE, mas com políticas de proteção e uma reconsideração do papel das compensações de carbono na mitigação climática e no caso da Amazônia, desenvolver de uma forma diferente, que resulte mais e melhor para o país, e principalmente para os povos amazônidas.

É possível que ainda exista alguma chance da Amazônia sair do ritmo do circuito exploratório que degrada irracionalmente os bens naturais. Como a Amazônia é de interesse da humanidade, e segue sendo tema muito importante depois do aquecimento global. E é lógico que nesse interesse vem junto especulação, o movimento espoliador, mas existem ações legítimas a favor da floresta. O Estado precisa estar atento e bem orientado, avaliando essas vantagens e estreitar uma solidariedade internacional entre aqueles que não querem deixar a Amazônia chegar ao nível de exploração perversa tal qual foi o destino da África e da Ásia no período colônia.

REFERÊNCIAS

- ALMENAR, J. *et al.* Environmental Law and Practice in Spain: Overview. **Clifford Chance**, p. 1–34, 2021.
- ANDREAE, M. O. *et al.* The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO): Overview of pilot measurements on ecosystem ecology, meteorology, trace gases, and aerosols. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, n. 18, p. 10723–10776, 2015. ISSN 16807324.
- Anjos, D. J. J. T. Nacionalismo, nacionalização e educação no Brasil. **Historia da Educacao**, v. 20, n. 48, p. 307–311, 2016. ISSN 22363459.
- BANK, W. **Global Economic prospects 2009: commodities at the crossroads**. [S.l.]: The World Bank, 2008.
- BLACK, C. Preços de commodities, termos de troca e crescimento econômico brasileiro nos anos 2000. **Indicadores Econômicos FEE**, v. 42, n. 3, p. 27–44, 2015. ISSN 1806-8987.
- BOTÍIA, S. *et al.* The CO₂ record at the Amazon Tall Tower Observatory: A new opportunity to study processes on seasonal and inter-annual scales. **Global Change Biology**, v. 28, n. 2, p. 588–611, 2022. ISSN 13652486.
- BROWN, I. F. *et al.* Uncertainty in the biomass of amazonian forests: an example from rondonia, brazil. **Forest Ecology and Management**, Elsevier, v. 75, n. 1-3, p. 175–189, 1995.
- CALIARI, T. *et al.* Research infrastructures in less developed countries: the Brazilian case. **Scientometrics**, Springer International Publishing, v. 122, n. 1, p. 451–475, 2020. ISSN 15882861. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11192-019-03245-2>.
- CRUTZEN, P. J. The effects of industrial and agricultural practices on atmospheric chemistry and climate during the anthropocene. **Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering**, v. 37, n. 4, p. 423–424, 2002. ISSN 10934529.
- EMBRAPA. Visão 2030 - o futuro da agricultura brasileira. **Embrapa**, p. 212, 2018. ISSN 0167-739X. Disponível em: <http://www.embrapa.br/futuro>.
- F. G. Assis, L. F. *et al.* TerraBrasilis: A Spatial Data Analytics Infrastructure for Large-Scale Thematic Mapping. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, MDPI AG, v. 8, n. 11, p. 513, nov 2019.
- FINEP. **Ministério da Ciência e Tecnologia - Último acesso em Setembro de 2023**. <http://www.finep.gov.br> p.
- FOUCAULT, M. **A Arqueologia do Saber**. [S.l.: s.n.], 2018.
- GANDOUR, C. Public Policies for the Protection of the Amazon Forest What Works and How to Improve. n. September, p. 62, 2021. Disponível em: <https://amazonia2030.org.br/wp-content/uploads/2021/11/REL-AMZ2030-EN-Protacao-Florestal-1.pdf>.
- HART, K. M. *et al.* Characteristics of free air carbon dioxide enrichment of a northern temperate mature forest. **Global Change Biology**, v. 26, n. 2, p. 1023–1037, 2020. ISSN 13652486.

HUNTINGFORD, C. *et al.* Towards quantifying uncertainty in predictions of Amazon 'dieback'. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1857–1864, 2008. ISSN 09628452.

HUNTINGFORD, C. *et al.* Simulated resilience of tropical rainforests to CO₂-induced climate change. **Nature Geoscience**, Nature Publishing Group, v. 6, n. 4, p. 268–273, 2013. ISSN 17520894. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo1741>.

IBGE. **Produção Agropecuária - Ranking - Agricultura - Valor da produção (2022)**. 2022. <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria> p. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>.

IPCC. **Summary for Policymakers Sixth Assessment Report (WG3)**. [s.n.], 2022. 1–52 p. ISBN 9781107415416. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.

JEKLIN, A. *et al.* A (in)segurança jurídica no direito ambiental e o planejamento para a sustentabilidade. **Correspondências e Análisis**, n. 15018, p. 1–23, 2016. ISSN 2224235X.

KRUIJT, B. *et al.* The robustness of eddy correlation fluxes for amazon rain forest conditions: Ecological archives a014-024-a1. **Ecological Applications**, Wiley Online Library, v. 14, n. sp4, p. 101–113, 2004.

LASSLOP, G. *et al.* Influences of observation errors in eddy flux data on inverse model parameter estimation. **Biogeosciences**, v. 5, n. 5, p. 1311–1324, 2008. ISSN 17264189.

MARENGO, J. A.; SOUZA, C. Climate Change: impacts and scenarios for the Amazon. n. December, p. 33, 2018.

MARQUES, L. **Capitalismo e colapso ambiental**. 2ª edição. ed. Campinas: [s.n.], 2016. 711 p. ISBN 978-85-268-1337-3. Disponível em: <https://editoraunicamp.com.br/produto/474/capitalismo-e-colapso-ambiental>.

MARTIN, S. T. *et al.* An overview of the Amazonian Aerosol Characterization Experiment 2008 (AMAZE-08). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 23, p. 11415–11438, 2010. ISSN 16807316.

MARTIN, S. T. *et al.* Sources and properties of Amazonian aerosol particles. **Reviews of Geophysics**, v. 48, n. 2, 2010. ISSN 87551209.

MASSARANI, L. New framework needed to thwart Brazil's crippling bureaucracy. **Nature Medicine**, Nature Publishing Group, v. 17, n. 10, p. 1171, 2011. ISSN 1546170X.

MENEFEE, D. *et al.* Unraveling the effects of management and climate on carbon fluxes of u.s. croplands using the usda long-term agroecosystem (ltar) network. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 326, p. 109154, 2022. ISSN 0168-1923. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192322003410>.

MERCADO, L. M. *et al.* Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. **Nature**, v. 458, n. 7241, p. 1014–1017, 2009. ISSN 00280836.

MOREIRA, D. S. *et al.* Modeling the radiative effects of biomass burning aerosols on carbon fluxes in the Amazon region. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, n. 23, p. 14785–14810, 2017. ISSN 16807324.

NEGRÓN-JUÁREZ, R. *et al.* Calibration, measurement, and characterization of soil moisture dynamics in a central Amazonian tropical forest. **Vadose Zone Journal**, v. 19, n. 1, p. 1–16, 2020. ISSN 15391663.

NEPSTAD, D. *et al.* Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1118–1123, 2014. ISSN 10959203.

NUNES, C. R. P. Integrating Culture of the Amazon Rainforest Indigenous Traditional Knowledge: Challenges and Good Governance Practices. **Amazon's Research and Environmental Law**, p. 10–21, 2019. Disponível em: <http://faar.edu.br/portal/revistas/ojs/index.php/arel-faar/article/view/357>.

NUNES, I. M. *et al.* Cultural intelligence, cross-cultural adaptation and expatriate performance: a study with expatriates living in Brazil. **Revista de Administração**, Departamento de Administração, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo - FEA/USP, v. 52, n. 3, p. 219–232, 2017. ISSN 00802107. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rausp.2017.05.010>.

OECD. **Evaluating Brazil's progress in implementing Environmental Performance Review recommendations and promoting its alignment with OECD core acquis on the environment.** [S.l.], 2021. 76 p.

RAP, A. Fires increase Amazon forest productivity. **Geophysical Research Letters**, n. June, p. 4654–4662, 2015. ISSN 00948276.

RAP, A. *et al.* Enhanced global primary production by biogenic aerosol via diffuse radiation fertilization. **Nature Geoscience**, Springer US, v. 11, n. 9, p. 640–644, 2018. ISSN 17520908. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41561-018-0208-3>.

SANTOS, M. **A Natureza do Espaço. Técnica e tempo, razão e emoção.** [S.l.: s.n.], 2008. v. 1. 151 p. ISSN 1517-7793. ISBN 8531407133.

SANTOS, M. **Da totalidade ao lugar.** Edusp. São Paulo: 2014, 2014. 170 p. ISBN 978-85-314-0882-3.

SEEA. Discussion paper 6: Defining and valuing carbon related services in the SEEA EEA. Paper submitted to the Expert Meeting on Advancing the Measurement of Ecosystem Services for Ecosystem Accounting, New York, 22-24 January 2019 and subsequently revised. Ver. n. January, p. 22–24, 2019. Disponível em: <https://seea.un.org/events/expert-meeting-advancing-measurement-ecosystem-services-ecosystem-accounting>.

SEEA. System of Environmental-Economic Accounting— Ecosystem Accounting (SEEA EA). White cover publication. p. 362, 2021. Disponível em: <https://seea.un.org/ecosystem-accounting>.

SEEG. Análise da emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970-2021. **Seeg**, p. 46, 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2023/03/SEEG-10-anos-v4.pdf>.

SILVA, S. N. R. *et al.* Enhanced net CO₂ exchange of a semi-deciduous forest in the southern Amazon due to diffuse radiation from biomass burning. v. 20, n. April, p. 1–34, 2023.

SILVEIRA, C.; OLIVEIRA, L. Análise do mercado de carbono no Brasil: histórico e desenvolvimento. **Novos Cadernos NAEA**, v. 24, n. 3, p. 11–31, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/238112>.

SPA. Science Panel for the Amazon. p. 48, 2021.

TRENNEPOHL, N. Mercado de carbono e sustentabilidade: desafios regulatórios e oportunidades. In: . *[S.l.: s.n.]*, 2022. v. 6. ISBN 9786021018187.

WUTZLER, T. *et al.* Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc. **Biogeosciences**, v. 15, n. 16, p. 5015–5030, 2018. ISSN 17264189.

YAMAMOTO, O. H. Financiamento da pesquisa no Brasil: distorções e desigualdades. **Estudos de Psicologia (Natal)**, v. 5, n. 2, p. 279–287, 2000.

4 CONCLUSÃO GERAL

4.1 Considerações Finais

Esta pesquisa avaliou os impactos radiativos das queimadas sobre a capacidade fotossintética de uma Floresta Estacional Semidecidual, localizada no sul da Amazônia. Estimativas por sensoriamento remoto e medidas micrometeorológicas de alta e baixa frequência constituíram a base fundamental dos dados utilizados. Limitações teóricas e incertezas de medição foram usadas para embasar reflexões ensaísticas sobre o mercado de crédito de carbono no Brasil.

Para avaliar o impacto na absorção líquida de CO_2 devido às queimadas, uma longa série de medidas AOD foi usada para determinar um algoritmo de irradiância solar de céu claro. Este algoritmo, ajustado às condições ambientes do local estudado, determinou satisfatoriamente a irradiância relativa (f), usada como base de comparação dos efeitos radiativos da poluição sobre o fluxo de CO_2 (NEE), na interface-planta-atmosfera. Essas análises também foram avaliadas para temperatura foliar (LC_T), déficit de pressão do vapor (VPD) e fração difusa da radiação fotossinteticamente ativa ($PAR(D)_f$), na interface-planta-atmosfera. Um aumento líquido de 35-70% no saldo de CO_2 ($\%NEE$) foi observado quando os níveis de fumaça - AOD variaram de 0,1 para 5,0, produzindo reduções de $\sim 40\%$ no parâmetro f . Para valores de f abaixo de 0,6-0,7, reduções estatisticamente significativas foram computadas nas taxas de absorção de CO_2 , até a interrupção completa da fotossíntese para $f \sim 0,20$. O aumento no NEE , pelo ecossistema, foi atribuído majoritariamente ao aumento médio de $\sim 40-60\%$ na fração $PAR(D)_f$.

Sobre as demais variáveis, reduções de $\sim 3,0$ °C e de 2-3 hPa foram observadas para LC_T e VPD , respectivamente. Aumentos de $\sim 1-3\%$ na eficiência de uso da luz (LUE) também foram computados. Esses resultados foram atribuídas não só à carga de poluição ($AOD \geq 0,10$) emitida local e transportada regionalmente pelas correntes de ar, mas também, à composição florística do sub-bosque e de certos tipos de espécies florestais adaptadas a condições de pouca luminosidade, com caminhos fotossintéticos mais eficientes para captação de luz difusa. Incertezas, devido à possível contaminação por nuvens, não puderam ser calculadas devido à falta de observação direta das condições de céu durante as análises, mas foram minimizadas satisfatoriamente, considerando o nível de qualidade AOD pelo sistema AERONET (nível 2, versão no. 3), desenvolvido pela NASA para filtrar contaminação por nuvens do conjunto amostral.

Os resultados apresentados no capítulo 2, melhoram nossa compreensão atual sobre a ciclagem do carbono na Amazônia e servem de base para o aprimoramento efetivo de sistemas numéricos (modelos de vegetação dinâmica - DVGs e de previsão, regionais ou globais), desde que calibrados adequadamente sobre áreas compatíveis com a área estudada, considerando ainda as condições ambientes tipicamente encontradas no período das análises apresentadas nesta pesquisa. Outra implicação importante e inovadora dos resultados aqui obtidos, refere-se às estimativas dos ótimos-fisiológicos, no ecótono Cerrado-Floresta Amazônica. Estes ótimos foram atrelados satisfatória e estatisticamente às cargas de poluição, radiação, temperatura LC_T e déficit de pressão VPD . Políticas globais de preservação e mitigação dos ecossistemas pantropicais podem se beneficiar das descobertas e análises apresentadas neste capítulo.

Limitações teóricas e incertezas de medição na Amazônia serviram também, neste estudo, para lançar-mão de reflexões críticas concernentes ao mercado de carbono no Brasil.

Ensaaiaram-se reflexões, centradas na lei no. 2.187/2009 (Política Nacional de Mudança do Clima) e PL 528-A/2021, arrançadas de argumentos unidos de factualidade, assegurada pelo conhecimento científico existente na região, e princípios constitucionais básicos. Neste sentido, foi possível apontar caminhos alternativos e factíveis, com vista para práticas de exploração pouco invasivas, mais inclusivas e éticas, dos recursos naturais brasileiros. Dessa forma, refutaram-se alguns aspectos da lei nacional 2.187/2009 e PL 528-A, esta última, considerada impraticável, sob dois aspectos: 1. cenário de instabilidade jurídica; e 2. violação de dois princípios constitucionais básicos; ética, neste caso, relacionada à exploração dos recursos naturais e, razoabilidade (proporcionalidade), aspecto contractual perante ao próprio mercado global do carbono, o qual não considera as fragilidades e as peculiaridades dos ecossistemas amazônicos, e tão pouco apresenta arcabouço metodológico claro, com abordagens robustas defensáveis.

Reflexões ensaísticas sobre os modelos desenvolvimentistas para a Amazônia, atualmente encontrado também sob a forma de "mercado de carbono", fomenta discussões, realça nossas memórias e nos lembra o insucesso e o fracasso dos principais modelos desenvolvimentistas até então apresentados ao longo da história do Brasil. Esses modelos, atravessam marcantemente o tempo e os espaços brasileiros, sem deixar avanços civilizatórios claros. Norteados por reflexões de alguns dos mais importantes intelectuais brasileiros, analisando a compreensão do passado, ensaiou-se também o pensamento e a predominância do sistema econômico-político brasileiro, onde é possível identificar as suas formas presentes no espaço geográfico construído (hidrelétricas, mineradoras, empresas multinacionais) e, agora, novamente no presente, o pensamento sobre o desejo de comercializar os bens naturais (carbono, ar, água). Essa forma de pensar das sociedades capitalistas se transveste recorrentemente no tempo sob múltiplas formas, moldando a ética, os valores e os princípios morais, erradicando a diversidade intelectual e a criatividade das culturas e dos povos tradicionais, os fazendo almejar valores ocidentais que aniquilam outras formas de pensar economia, desenvolvimento e exploração de recursos. Estas práticas, subutilizam os conhecimentos tradicionais dos que vivem na e para a Amazônia numa relação profunda de vínculo com a natureza.

O ensaio apresentado no capítulo 3, portanto, prever modificações e adequações substanciais e inúmeros adendos à Política Nacional de Mudança do Clima, e aponta para propostas de exploração baseadas na bio-economia, com dispositivos éticos e legais que assegurem a participação efetiva de povos originários nas pesquisas correntes e futuras na Amazônia, empoderados de conhecimentos milenares e científicos, essenciais nas decisões nacionais e globais sobre o futuro de nossos biomas. Nesse sentido, discussões maiores sobre a ética de pesquisas que possam interferir negativamente na organização social das mais diversas etnias existentes em nosso território, são ainda necessárias, e devem compor com afinco a agenda política brasileira nos próximos anos, independentemente de legendas partidárias.

4.2 Desafios futuros

Os resultados apresentados nesta pesquisa podem integrar o referencial teórico dos próximos relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) e brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC), os quais tem a função de reunir, sintetizar e avaliar informações científicas sobre os impactos das mudanças do clima nas sociedades. As descobertas e reflexões levantadas, são úteis também para os Projetos de Lei ambiental no Brasil. Além disso, políticas globais de preservação dos ecossistemas pantropicais podem e devem se beneficiar dos resultados científicos aqui apresentados. Experimentos

de longo-período, *in-situ*, incluindo um conjunto maior de medidas e técnicas de análise, poderá ser usado para melhorar os sistemas numéricos atualmente usados. Dessa forma, modelos numéricos auxiliarão sobremaneira as tomadas de decisão no âmbito das políticas brasileiras.

REFERÊNCIAS

- ABAKUMOVA, G. Evaluation of long-term changes in radiation, cloudiness, and surface temperature on the territory of the former sovietunion. 1996.
- ACHARD, F. *et al.* Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 18, n. 2, p. 1–12, 2004. ISSN 08866236.
- AKRAM, M. *et al.* Global Research Funding and Development. **IPS Interdisciplinary Journal of Biological Sciences**, v. 1, n. 1, p. 11–18, 2022.
- ANSHARI, G. Z. *et al.* IPCC, Cross Chapter Paper7: Tropical Forests. **IPCC WGII Sixth Assessment Report**, v. 1, p. 1–63, 2021.
- ARAÚJO, A. C. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. 1–20, 2002. ISSN 0148-0227.
- ARTAXO, P. *et al.* Tropical and Boreal Forest – Atmosphere Interactions: A Review. **Tellus B: Chemical and Physical Meteorology**, Stockholm University Press, v. 74, n. 2022, p. 24–163, 3 2022. ISSN 1600-0889. Disponível em: <http://b.tellusjournals.se/articles/10.16993/tellusb.34/>.
- ARTAXO, P. *et al.* Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: From natural biogenic to biomass burning conditions. **Faraday Discussions**, v. 165, n. February 2014, p. 203–235, 2013. ISSN 13596640.
- AVITABILE, V. *et al.* An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets. **Global Change Biology**, v. 22, n. 4, p. 1406–1420, 2016. ISSN 13652486.
- BEER, C. *et al.* Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. **Science**, v. 329, n. 5993, p. 834–838, 2010. ISSN 00368075.
- BOULTON, C. A. *et al.* Pronounced loss of amazon rainforest resilience since the early 2000s. **Nature Climate Change**, v. 12, n. 3, p. 271–278, Mar 2022. ISSN 1758-6798. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01287-8>.
- BRITO, J. *et al.* Ground-based aerosol characterization during the South American Biomass Burning Analysis (SAMBBA) field experiment. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, n. 22, p. 12069–12083, 2014. ISSN 16807324.
- BROOKHOUSE, M. *et al.* **Green Carbon Part 2. : The role of natural forests in carbon storage.** [S.l.: s.n.], 2010. 1–48 p. ISBN 9781921313875.
- CANADELL, J. *et al.* Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks. In: _____. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. p. 673–816.

Carvalho, J. C. *et al.* Potential of soil carbon sequestration in different biomes of Brazil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 2, p. 277–289, 2010. ISSN 18069657.

CHAMBERS, J. Q. *et al.* Respiration from a tropical forest ecosystem: Partitioning of sources and low carbon use efficiency. **Ecological Applications**, Ecological Society of America, v. 14, n. 4, p. S72–S88, 2004. ISSN 10510761. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/4493631>.

CIAIS, P. *et al.* Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Change, IPCC Climate**, p. 465–570, 2013. ISSN 1098-6596.

CIRINO, G. G. *et al.* The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in the Amazon. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, n. 13, p. 6523–6543, 2014. ISSN 16807324.

COLE, J. J. *et al.* Chapter 7 - the carbon cycle: With a brief introduction to global biogeochemistry. In: WEATHERS, K. C. *et al.* (Ed.). **Fundamentals of Ecosystem Science (Second Edition)**. Second edition. Academic Press, 2021. p. 131–160. ISBN 978-0-12-812762-9. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128127629000071>.

COPPOLA, A. I. *et al.* The black carbon cycle and its role in the earth system. **Nature Reviews Earth & Environment**, Jul 2022. ISSN 2662-138X. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00316-6>.

CRAMER, W. *et al.* Tropical forests and the global carbon cycle: Impacts of atmospheric carbon dioxide, climate change and rate of deforestation. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 359, n. 1443, p. 331–343, 2004. ISSN 09628436.

DOUGHTY, C. E. *et al.* Effect of smoke on subcanopy shaded light, canopy temperature, and carbon dioxide uptake in an Amazon rainforest. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 24, n. 3, p. 1–10, 2010. ISSN 08866236.

ECK, T. F. *et al.* High aerosol optical depth biomass burning events: A comparison of optical properties for different source regions. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 20, p. 2–5, 2003. ISSN 00948276.

FOLEY, J. A. *et al.* Amazonia revealed: forest degradation and loss of ecosystem goods and services in the amazon basin. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 5, n. 1, p. 25–32, 2007.

FRANGETTO, F. W. *et al.* **Legado do MDL: Lições aprendidas a partir da implementação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no Brasil como subsídios para novos mecanismos.** [S.l.: s.n.], 2018. v. 1. 426 p. ISBN 9788578113438.

FU, Z. *et al.* The surface-atmosphere exchange of carbon dioxide in tropical rainforests: Sensitivity to environmental drivers and flux measurement methodology. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 263, n. December 2017, p. 292–307, 2018. ISSN 01681923. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.001>.

GATTI, L. V. *et al.* Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 506, n. 7486, p. 76–80, 2014. ISSN 00280836. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/nature12957>.

GOULDEN, M. L. *et al.* Diel and seasonal patterns of tropical forest CO₂ exchange. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4 SUPPL., p. 42–54, 2004. ISSN 10510761.

GOULDEN, M. L. *et al.* Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy. **Global Change Biology**, v. 2, n. 3, p. 169–182, 1996. ISSN 13541013.

GREEN, C.; BYRNE, K. A. Biomass: Impact on Carbon Cycle and Greenhouse Gas Emissions. **Encyclopedia of Energy**, p. 223–236, 2004.

GU, L. *et al.* Responses of net ecosystem exchanges of carbon dioxide to changes in cloudiness: Results from two North American deciduous forests. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 104, n. D24, p. 31421–31434, 1999. ISSN 01480227.

HARVEY, D. **O enigma do capital e as crises do capitalismo**. [*S.l.: s.n.*], 2011. 235 p. ISBN 9788575591840.

HOUGHTON, R. A. *et al.* Amazonia: The regional carbon budget. **Amazonia and Climate Change**, p. 409–428, 2009.

HOUGHTON, R. A. *et al.* Carbon emissions from land use and land-cover change. **Biogeosciences**, v. 9, n. 12, p. 5125–5142, 2012. ISSN 17264170.

INTERDISCIPLINARY-RESEARCH, F. **National Academy of Sciences, National Academy of Engineering and Institute of Medicine**. Washington, DC: The National Academies Press, 2005. ISBN 978-0-309-09435-1. Disponível em: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/11153/facilitating-interdisciplinary-research>.

JING, X. *et al.* The effects of clouds and aerosols on net ecosystem CO₂ exchange over semi-arid Loess Plateau of Northwest China. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 17, p. 8205–8218, 2010. ISSN 16807316.

KEELING, C. D. *et al.* **Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements**. 1996. 146–148 p.

LAW, B. E. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. 2002.

MALHI, Y. The carbon balance of tropical forest regions, 1990-2005. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, Elsevier B.V., v. 2, n. 4, p. 237–244, 2010. ISSN 18773435. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2010.08.002>.

MALHI, Y. The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation. **Journal of Ecology**, v. 100, n. 1, p. 65–75, 2012. ISSN 00220477.

MALHI, Y.; GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 15, n. 8, p. 332–337, 2000. ISSN 01695347.

MARQUES, L. **Capitalismo e colapso ambiental**. 2^a edição. ed. Campinas: [*s.n.*], 2016. 711 p. ISBN 978-85-268-1337-3. Disponível em: <https://editoraunicamp.com.br/produto/474/capitalismo-e-colapso-ambiental>.

MARTIN, S. T. *et al.* An overview of the Amazonian Aerosol Characterization Experiment 2008 (AMAZE-08). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 10, n. 23, p. 11415–11438, 2010. ISSN 16807316.

- MARTIN, S. T. *et al.* The green ocean amazon experiment (GOAMAZON2014/5) observes pollution affecting gases, aerosols, clouds, and rainfall over the rain forest. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 5, p. 981–997, 2017. ISSN 00030007.
- MARTIN, S. T. *et al.* Introduction: Observations and Modeling of the Green Ocean Amazon (GoAmazon2014/5). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 16, n. 8, p. 4785–4797, 2016. ISSN 16807324.
- MENEGHETTI, F. K. O que é um ensaio-teórico? **Revista de Administração Contemporânea**, v. 15, n. 2, p. 320–332, 2011.
- MERCADO, L. M. *et al.* Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. **Nature**, v. 458, n. 7241, p. 1014–1017, 2009. ISSN 00280836.
- MOREIRA, D. S. *et al.* Coupling between the JULES land-surface scheme and the CCATT-BRAMS atmospheric chemistry model (JULES-CCATT-BRAMS1.0): Applications to numerical weather forecasting and the CO₂ budget in South America. **Geoscientific Model Development**, v. 6, n. 4, p. 1243–1259, 2013. ISSN 1991959X.
- MOREIRA, D. S. *et al.* Modeling the radiative effects of biomass burning aerosols on carbon fluxes in the Amazon region. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, n. 23, p. 14785–14810, 2017. ISSN 16807324.
- MYNENI, R. B. *et al.* **Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991**. 1997. 698–702 p.
- NAGY, L. *et al.* **Interactions Between Biosphere, Atmosphere, and Human Land Use in the Amazon Basin: An Introduction**. [*S.l.: s.n.*], 2016. 3–15 p. ISBN 9783662499009.
- OLIVEIRA, P. H. *et al.* The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO₂ flux in Amazonia. **Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology**, v. 59, n. 3, p. 338–349, 2007. ISSN 02806509.
- OMETTO, J. P. H. *et al.* Amazonia and the modern carbon cycle: Lessons learned. **Oecologia**, v. 143, n. 4, p. 483–500, 2005. ISSN 00298549.
- PAN, Y. A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v. 333, n. August, p. 988–993, 2011.
- PÖRTNER, H. O. *et al.* Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change. **IPEBS secretariat, Bonn, Germany**, 2021. Disponível em: <https://zenodo.org/record/5101125>.
- PROCOPIO, A. S. *et al.* Multiyear analysis of amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 3, p. 1–4, 2004. ISSN 00948276.
- RÄDEL, G. *et al.* Amplification of el niño by cloud longwave coupling to atmospheric circulation. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 2, p. 106–110, Feb 2016. ISSN 1752-0908. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ngeo2630>.
- RANDOW, C. *et al.* Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, n. 1-3, p. 5–26, 2004. ISSN 0177798X.

REGNIER, P. *et al.* The land-to-ocean loops of the global carbon cycle. **Nature**, v. 603, n. 7901, p. 401–410, Mar 2022. ISSN 1476-4687. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04339-9>.

RIDELENSKY, J. d. C. F.; SANTOS, A. R. Clean development mechanism projects – cdm a collection of projects approved in brazil in the last decade. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 4, p. e38711427087, Mar 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/27087>.

ROCHA, H. D. *et al.* Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in brazil. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 114, n. 1, p. 1–8, 2009. ISSN 01480227.

SAATCHI, S. S. *et al.* Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 108, n. 24, p. 9899–9904, 2011. ISSN 00278424.

SCHIMMEL, D. S. Special issue: The large-scale biosphere-atmosphere experiment in the amazon. **Ecological Applications**, Ecological Society of America, v. 14, n. 4, p. S1–S2, 2004. ISSN 10510761. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/4493624>.

TEULING, A. J. *et al.* Observational evidence for cloud cover enhancement over western european forests. **Nature Communications**, v. 8, n. 1, p. 14065, Jan 2017. ISSN 2041-1723. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ncomms14065>.

YAMASOE, M. A. *et al.* Effect of smoke and clouds on the transmissivity of photosynthetically active radiation inside the canopy. p. 1645–1656, 2006.

ZHANG, M. *et al.* Impact of cloudiness on net ecosystem exchange of carbon dioxide in different types of forest ecosystems in China. **Biogeosciences**, v. 7, n. 2, p. 711–722, 2010. ISSN 17264189.

APÊNDICE A –

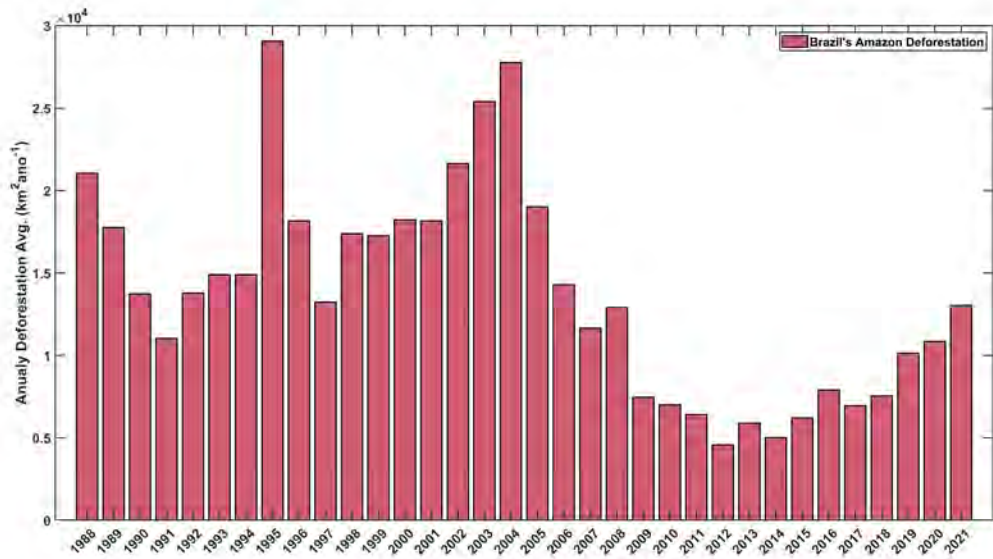


Figura A.1 – (a) Série histórica do desmatamento raso na Amazônia Legal (1988-2021). Dados originados do projeto PRODES. Os dados foram coletados no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), ver link Tabela I.3.

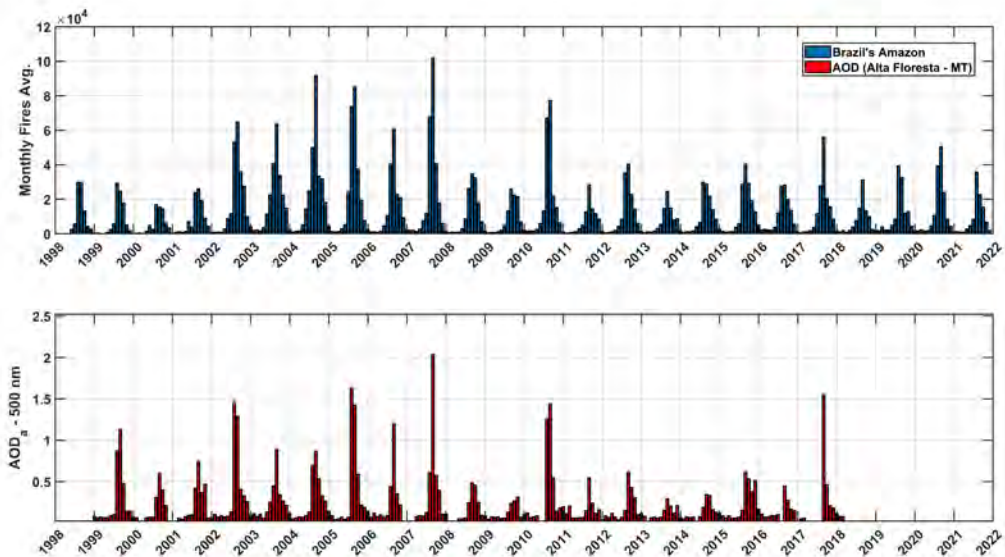


Figura A.2 – (a) Série histórica de queimadas na Amazônia Legal entre 1998 e 2022. Dados originados do projeto PRODES (link na Tabela S5). (b) Longa série temporal de AOD (500 nm) para a Amazônia Legal (1999-2017). Medições remotas de superfície, gerenciadas pela rede AERONET/NASA (Tabela I.3).

APÊNDICE B –

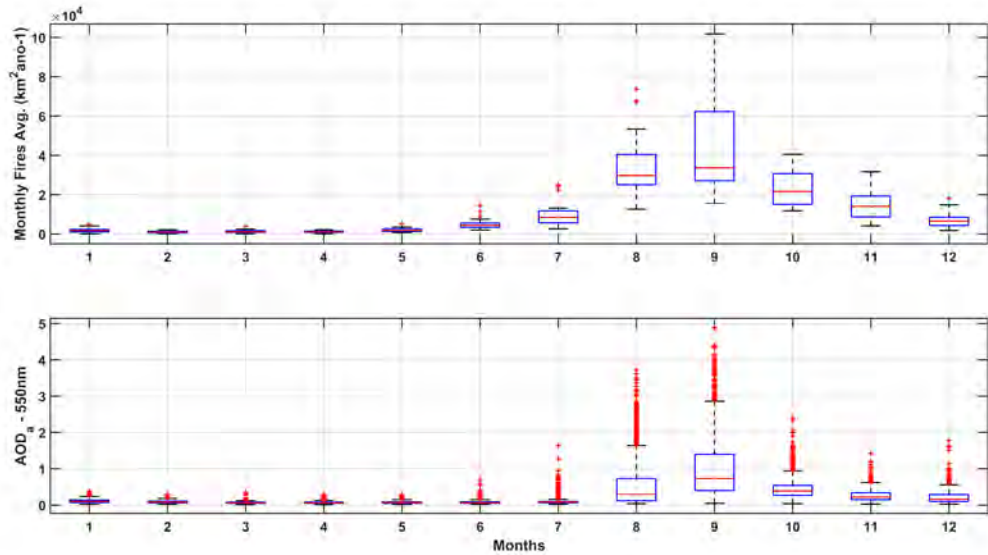


Figura B.1 – (a) Boxplot do ciclo médio mensal de queimadas na Amazônia Legal (1998-2022), destacando recorrentes picos de incêndios entre agosto e novembro. (b) Boxplot do ciclo médio mensal de AOD a 500 nm, modulado pelas queimadas regionais na Amazônia (Tabela I.3).

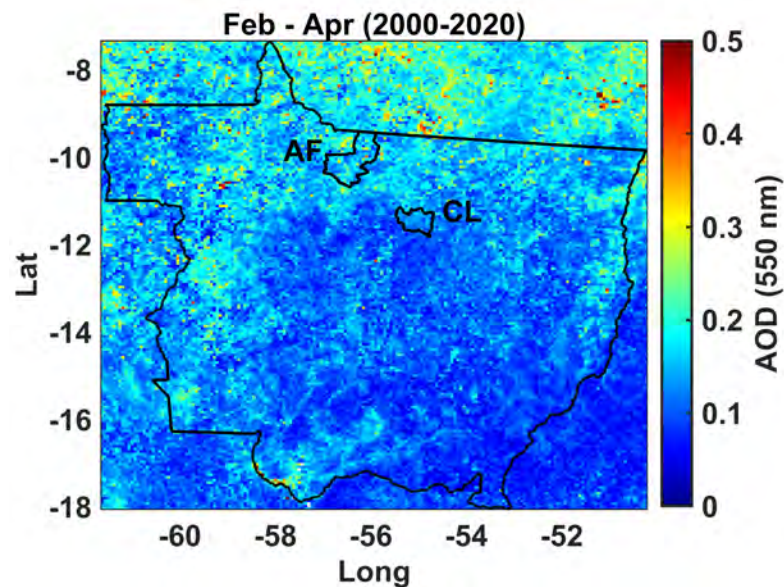


Figura B.2 – Comportamento espacial da profundidade óptica de aerossóis (AOD) sobre o Estado de Mato Grosso (área intensa do arco de desmatamento). Na imagem acima está o comportamento do AOD durante a estação chuvosa (fevereiro a abril) para o período de dados de 2000 a 2020, obtido dos satélites AQUA e TERRA (Tabela I.3).

APÊNDICE C –

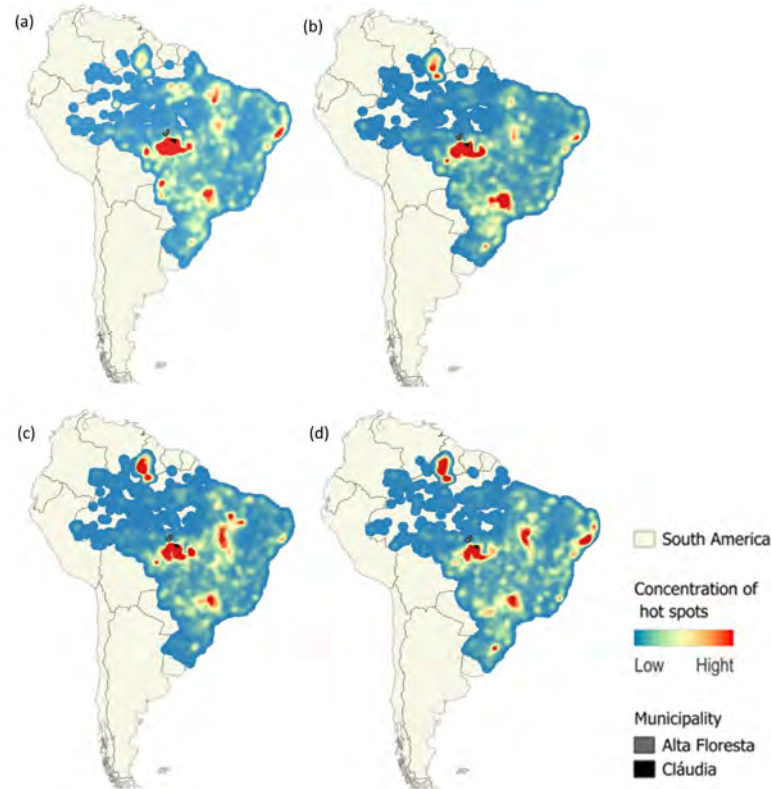


Figura C.1 – Mostra os focos de incêndio acumulados na Amazônia durante meses não-secos entre janeiro e junho (2005-2008): (b) 2005; (c) 2006; (d) 2007; (e) 2008. Satélite de Referência: MODIS, composição - Aqua + Terra. As cores representam anomalias térmicas dos incêndios florestais, na resolução de 1 km. Dados vetoriais (FIRMS V0061 NRT).

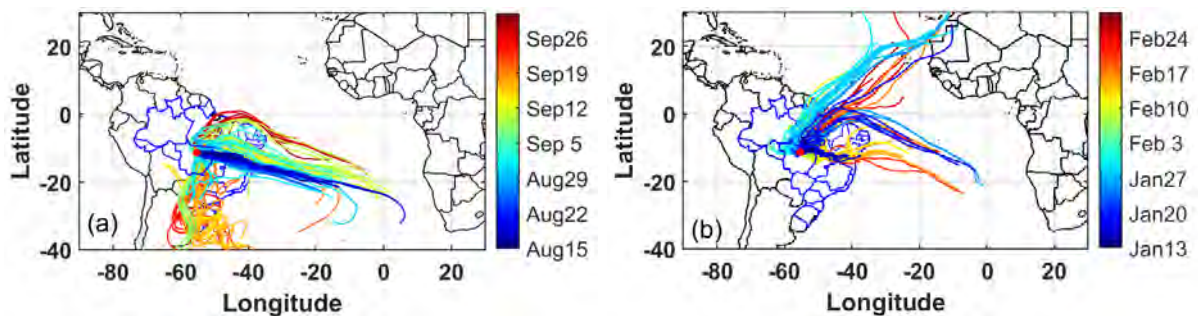


Figura C.2 – Mostra os focos de incêndio acumulados na Amazônia durante meses não-secos entre janeiro e junho (2005-2008): (b) 2005; (c) 2006; (d) 2007; (e) 2008. Satélite de Referência: MODIS, composição - Aqua + Terra. As cores representam anomalias térmicas dos incêndios florestais, na resolução de 1 km. Dados vetoriais (FIRMS V0061 NRT).

APÊNDICE D –

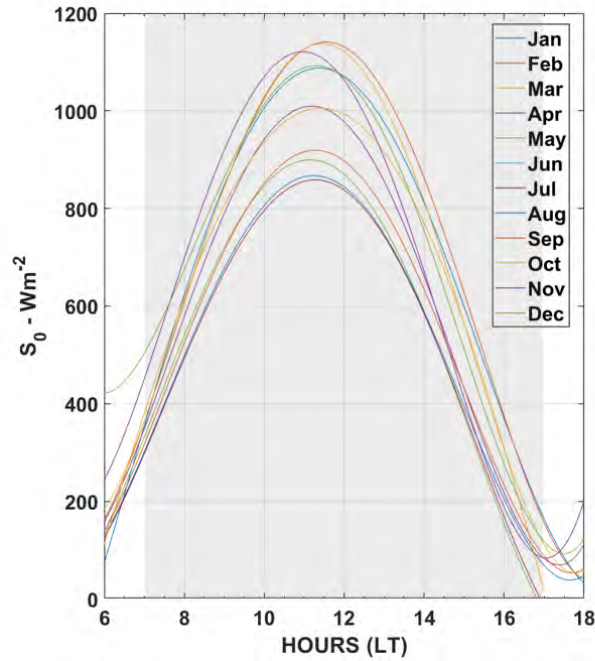


Figura D.1 – Comportamento médio horário mensal dos valores de radiação solar incidente medidos pelo piranômetro do sistema AERONET, em Alta Floresta-MT (1999-2017). O domínio das curvas utilizadas estão entre 07h e 17h (LT), ajustes polinomiais entre julho/2005 a junho/2008. Estimativas antes das 07h (LT) e após as 17h (LT) foram excluídas da base de dados.

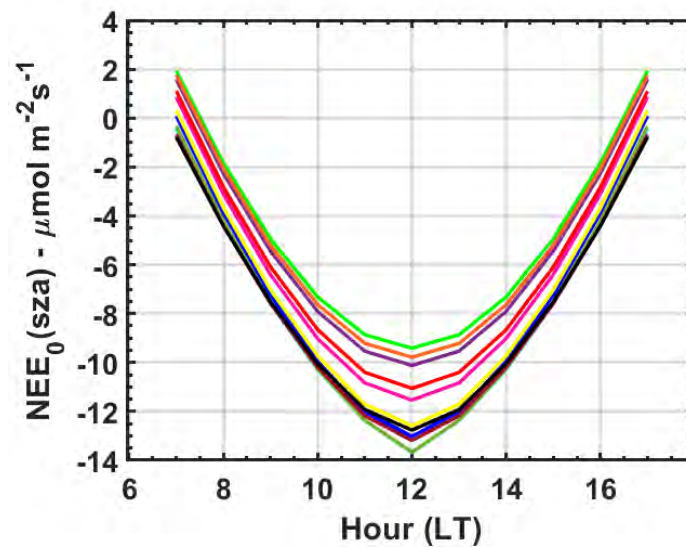


Figura D.2 – Mostra alterações do ciclo horário no $NEE_0(sza)$. Ajuste das curvas sob condições de céu claro ($f \sim 1.0$) para cada mês do ano entre jul/2005-jun/2008, 07-17h (LT).

APÊNDICE E –

Temperatura do dossel foliar (LC_{Ts}) - aplicação da equação de Stefan-Boltzmann para o cálculo da temperatura foliar do dossel (Equação (E.1)):

$$LC_{Ts} = \sqrt[4]{\left(\frac{SWi(1 - \alpha + LWa - Rn)}{\epsilon\sigma}\right)} \quad (E.1)$$

Onde: Rn é o saldo de radiação medido na área experimental (Wm^{-2}); α é a albedo médio da copa foliar durante as estações seca e chuvosa, respectivamente iguais a 0,079 e 0,126 (Marques et al., 2017); LW_a é a radiação atmosférica de ondas longas em Wm^{-2} (Idson e Jackson, 1963), ajustada para as condições atmosféricas poluídas de Mato Grosso durante a estação seca (von Randow et al., 2006); ϵ é a emissividade, assumida 0,98 (Monteith, 1990) e, σ , a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$). Este método, tem sido amplamente aplicado na ausência de medidas diretas de temperatura foliar na Amazônia (Doughthy et al., 2010; Cirino et al., 2014; Aguiar et al., 2012; Andrade et al., 2021).

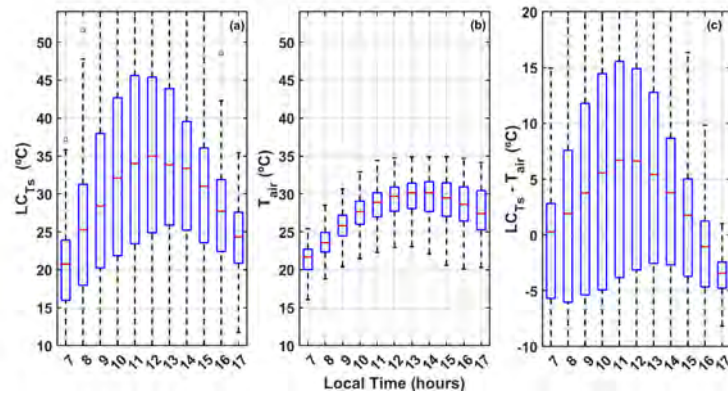


Figura E.1 – Mostra (a) o ciclo horário da LC_{Ts} ; (b) ciclo horário da temperatura do ar; e (c) diferença encontrada entre LC_{Ts} e T_{air} , em ($^{\circ}C$).

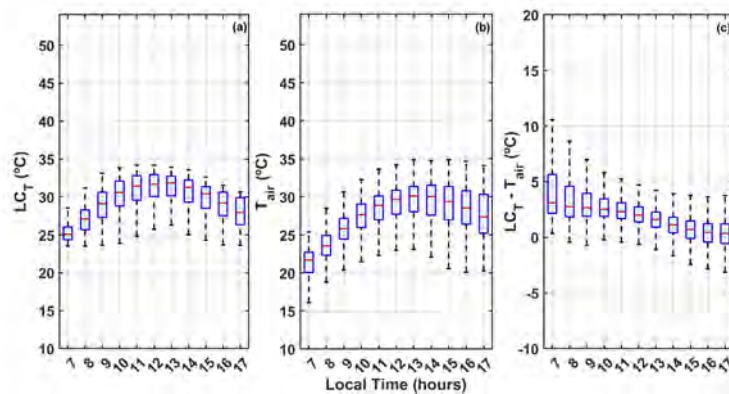


Figura E.2 – Mostra (a) o ciclo horário da LC_T ; (b) ciclo horário da temperatura do ar; e (c) diferença encontrada entre LC_T e T_{air} , em ($^{\circ}C$).

APÊNDICE F –

Produtividade Primária Bruta (GPP) - calculada de Wutzler et al. (2018) através do sistema REddyProc. O código-fonte está disponível através do sistema de revisão *git* (Max Planck Institute - BGI). O código recebe informações de variáveis meteorológicas e de fluxo, como SW_i , T_{air} , VPD , NEE , H , LE e u^* , das quais são aplicadas métodos de filtragem $u^* > 0,28$ (Papale et al., 2006; Borr et al., 2013) para corrigir subestimações no período noturno R_{eco} . Além disso, o sistema estima a distribuição de limites para u^* para preencher lacunas nos dados de entrada e então particiona os fluxos em NEE , GPP e R_{eco} . As técnicas Look-up Tables – LUT, Mean Diurnal Course – MDC e Marginal Distribution Sampling – MDS são aplicadas aos fluxos de partição com base nas condições meteorológicas e nos fluxos de dióxido de carbono e água.

O sistema REddyProc aproveita essas medições para estimar a incerteza dos fluxos horários de nosso banco de dados. A partir da Equação S.2, avaliamos o GPP e, por fim, o R_{eco} , calculado conforme a Equação S.3. Para o particionamento de fluxos, três métodos são considerados: o método Look-Up Table (LUT), Mean Diurnal Course (MDC) e o método de preenchimento de lacunas Marginal Distribution Sampling (MDS), que atualmente é a abordagem mais comumente empregada (Wutzler et al., 2018).

$$GPP = NEE - R_{eco} \quad (F.1)$$

Onde: GPP e R_{eco} são a Produtividade Primária Bruta e a respiração do ecossistema ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), respectivamente (Wutzler et al., 2018).

$$R_{eco} = R_{ref} \cdot \exp \left[E_0 \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T - T_0} \right) \right] \quad (F.2)$$

Onde: R_{eco} é dado em função da sensibilidade à temperatura (E_0), T_0 é mantido constante em $-46,02$ °C, e a referência temperatura T_{ref} a 15 °C. A respiração na temperatura de referência (R_{ref}) é recalculada com base em dados noturnos usando a estimativa anual de sensibilidade à temperatura E_0 . Esta estimativa é realizada em janelas de 7 dias alteradas sequencialmente ao longo de um período de 4 dias (Wutzler et al., 2018). Os dados horários NEE que preenchem lacunas são essenciais para obter uma série temporal completa para calcular médias ou saldos diários, como somas mensais ou sazonais. As figuras abaixo mostram os preenchimentos de falhas realizados pelo sistema REddyProc.

APÊNDICE G –

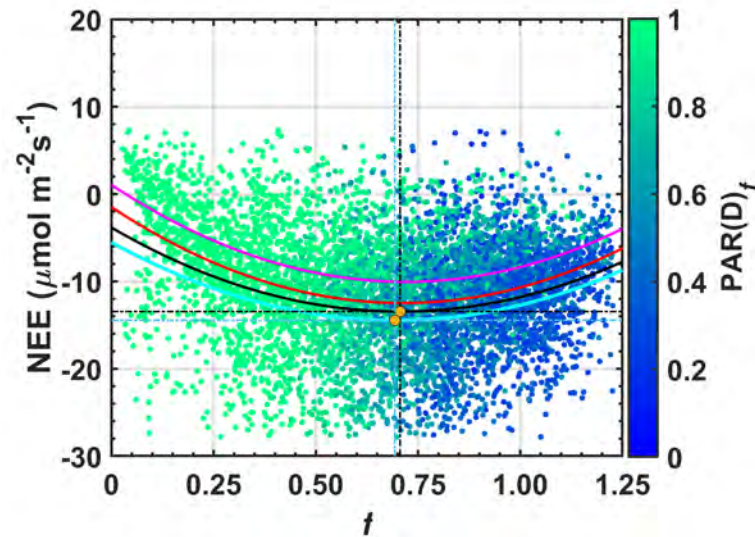


Figura G.1 – Variabilidade do NEE para diversas faixas de SZA (graus) durante todo o ano (jan-dez/2005-2008), em Cláudia, Mato Grosso: 0-20 (ciano), 20-40 (preto), 40-60 (magenta) e 0-60 (vermelho).

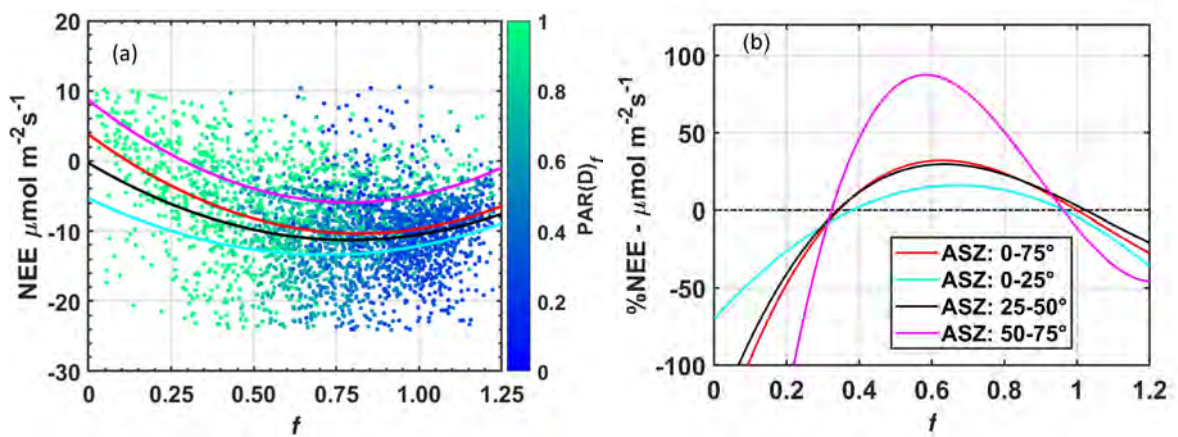


Figura G.2 – (a) Variabilidade do NEE para diversas faixas de SZA (graus) durante a temporada de incêndios florestais (julho-novembro/2005-2008), em Cláudia, Mato Grosso: 0-20 (ciano), 20-40 (preto), 40-60 (magenta) e 0-60 (vermelho). (b) Apresenta variação relativa $\%NEE$ para o mesmo período (julho-novembro/2005-2008).

APÊNDICE H –

Tabela H.1 – Coeficientes das curvas ajustadas dos dados médios horários (mensais) dos valores de radiação solar incidente medidos pela AERONET em Alta Floresta-MT. Os valores horários analisados são entre 07h e 17h (LT) para o período de julho de 2005 a junho de 2008.

4th degree polynomial curves					
Months	$p1$	$p2$	$p3$	$p4$	$p5$
January	+0.38	-17	$+2.4 \times 10^2$	-1.1×10^3	$+1.2 \times 10^3$
February	+0.57	-26	$+4.1 \times 10^2$	-2.4×10^3	$+4.7 \times 10^3$
March	+0.69	-32	$+4.9 \times 10^2$	-3.0×10^3	$+6.2 \times 10^3$
April	+0.64	-29	$+4.3 \times 10^2$	-2.5×10^3	$+5.0 \times 10^3$
May	+0.44	-20	$+2.9 \times 10^2$	-1.6×10^3	$+2.8 \times 10^3$
June	+0.43	-20	$+3.0 \times 10^2$	-1.7×10^3	$+3.1 \times 10^3$
July	+0.49	-22	$+3.3 \times 10^2$	-1.9×10^3	$+3.6 \times 10^3$
August	+0.51	-23	$+3.5 \times 10^2$	-2.0×10^3	$+3.8 \times 10^3$
September	+0.15	-07	$+8.8 \times 10^1$	-1.4×10^2	-8.7×10^2
October	+0.77	-34	$+5.1 \times 10^2$	-2.9×10^3	$+5.8 \times 10^3$
November	+0.74	-35	$+5.5 \times 10^2$	-3.5×10^3	$+8.1 \times 10^3$
December	-0.42	+24	-5.1×10^2	$+4.9 \times 10^3$	-1.6×10^4

Tabela H.2 – Coeficientes das curvas $NEE_0(asz)$ ajustados mensalmente para condições de céu claro no município de Claudia-MT entre jun/2005 e jul/2008.

Months	$p1$	$p2$	$p3$	R^2	RMSE
January	+0.0014	+0.0826	-13.90	0.6	4.6
February	+0.0054	-0.3876	-04.60	0.4	5.6
March	+0.0011	+0.1145	-14.10	0.3	5.4
April	+0.0033	-0.0370	-13.50	0.5	5.8
May	+0.0057	-0.2150	-10.20	0.4	4.4
June	+0.0091	-0.6277	-01.00	0.2	7.2
July	+0.0039	-0.1793	-08.50	0.1	3.4
August	+0.0058	-0.2657	-08.60	0.4	5.3
September	+0.0018	+0.0045	-11.40	0.3	4.8
October	+0.0015	+0.0762	-14.10	0.4	5.4
November	+0.0026	+0.0527	-14.80	0.6	5.0
December	+0.0117	-0.7177	-03.40	0.8	4.0

APÊNDICE I –

Tabela I.1 – Ajustes polinomiais, coeficientes e estatísticas para os períodos matutino e vespertino entre (07-17h) na torre micrometeorológica a 50 km de Sinop-MT, no município de Cláudia-MT, entre 2005-2008.

Settings	Angles	Coeficientes das Equações Polinomiais			Statistic
Poly fit 2nd	SZA	a	b	c	Cp (x_v, y_v)
	0-20°	+19	-26	-5.5	(0.68, -14.39)
NEE of CO ₂	20-40°	+19	-27	-3.8	(0.71, -13.39)
	40-60°	+21	-31	+1.0	(0.73, -10.44)
	0-60°	+22	-31	-1.5	(0.70, -12.42)

Tabela I.2 – Lista o número de focos de incêndio registrados pelas plataformas espaciais AQUA-TERRA durante os meses chuvosos na área de estudo entre janeiro e junho de 2005-2008. Nota: 1 - longa temporada de incêndios; 2 - estação de incêndios curta ou equivalente à estação seca.

Yrs	Fire Season ₁	Fire Season ₂	No-Dry ₁	No-Dry ₂	Rel. Fire ₁	Rel. Fire ₂
-	Jul-Nov	Jul-Sep	Jan-Jun&Dec	Jan-Jun&Oct-Dec	-	-
2005	320,076	223,422	42,487	139,141	13%	62%
2006	210,238	148,893	38,941	100,286	19%	67%
2007	350,885	252,236	43,030	141,679	12%	56%
2008	181,639	099,131	30,294	112,802	17%	113%
Total	1,062,838	723,682	154,752	493,908	15%	68%

Tabela I.3 – Lista com hiperlinks e Identificadores de Objetos Digitais (DOI) para acessar todos os dados utilizados nas figuras e tabelas desta publicação.

Open Research - Data Availability Statement					
Secondary Data	Repository	Hyperlink			WebPage
Remote Sensing (Satellites)	Terra-Aqua	Laads Daac	–		NASA Laads Daac
Remote Sensing (Ground)	Aeronet (Lev.2.0)	Goddard-Sfc	–		NASA Goddard
Short Wave Radiation	Aeronet (Lev.1.5)	Goddard-Sfc	–		NASA Goddard
Deforestation and fires	Prodes	Terra-Brasilis	–		INPE Prodes
Weather forecasts Models	Sol-Calculator	Solar-Calculator	–		METEO Explorat.
Primary Data	Repository	Hyperlink	DOI		Managers
Eddy Flux (CO ₂)	Mendeley Data	Brazil-EFlux-Stf	10.17632/m5h5fw872g.1		Cirino et al. (2022)
Net Eco. Exch. (NEE)	Mendeley Data	Brazil-NFlux-Stf	10.17632/m5h5fw872g.1		Cirino et al. (2022)
Meteorological Data	Mendeley Data	Brazil-AWsta-Stf	10.17632/m5h5fw872g.1		Cirino et al. (2022)

APÊNDICE J –

Tabela J.1 – Localização georreferenciada das torres de medidas de gases e partículas no Brasil.

	Torre	Latitude	Longitude	Período de Dados
1	Atto (AM)	02°28' 45.6" S	59°00' 21.6" W	2012 - Presente
2	Caxiuanã (PA)	01°42' 28.8" S	51°31' 44.4" W	1999 - Presente
3	Moju (PA)	01°58' 44.4" S	48°36' 54.0" W	N/A
4	Faz. N. Senhora (RO)	10°45' 00.0" S	62°22' 01.2" W	1999 - 2008
5	Resev. Biol. Jaru (RO)	10°04' 58.8" S	61°55' 51.6" W	1999 - 2008
6	Faz. Capuaba (MT)	13°17' 15.0" S	56°05' 17.5" W	2015 - 2019
7	Caatinga (PB)	07°58' 05.5" S	38°23' 03.1" W	2014 - 2015
8	Cuiarana (PA)	00°39' 39.6" S	47°16' 59.8" W	2015 -
9	Cuieiras ZF2 (AM)	02°36' 32.8" S	60°12' 33.5" W	1999 - Presente
10	Pantanal Norte (MT)	16°29' 52.8" S	56°24' 43.2" W	2013 - 2017
11	Paraíso Sul (MS)	29°41' 38.4" S	53°09' 01.1" W	2003 - 2004
12	Santarém F. Primária (PA)	02°51' 24.1" S	54°57' 32.0" W	2002 - 2011
13	Pantanal Sul (MS)	19°33' 54.0" S	57°01' 04.1" W	2023 - Presente
14	Tanguro (MT)	13°04' 48.0" S	52°23' 24.0" W	2013 - Presente

APÊNDICE K –



Figura K.1 – Localização espacial das redes de monitoramento ambiental no Brasil. Dados georreferenciados/Plataforma - QGis.

APÊNDICE L –

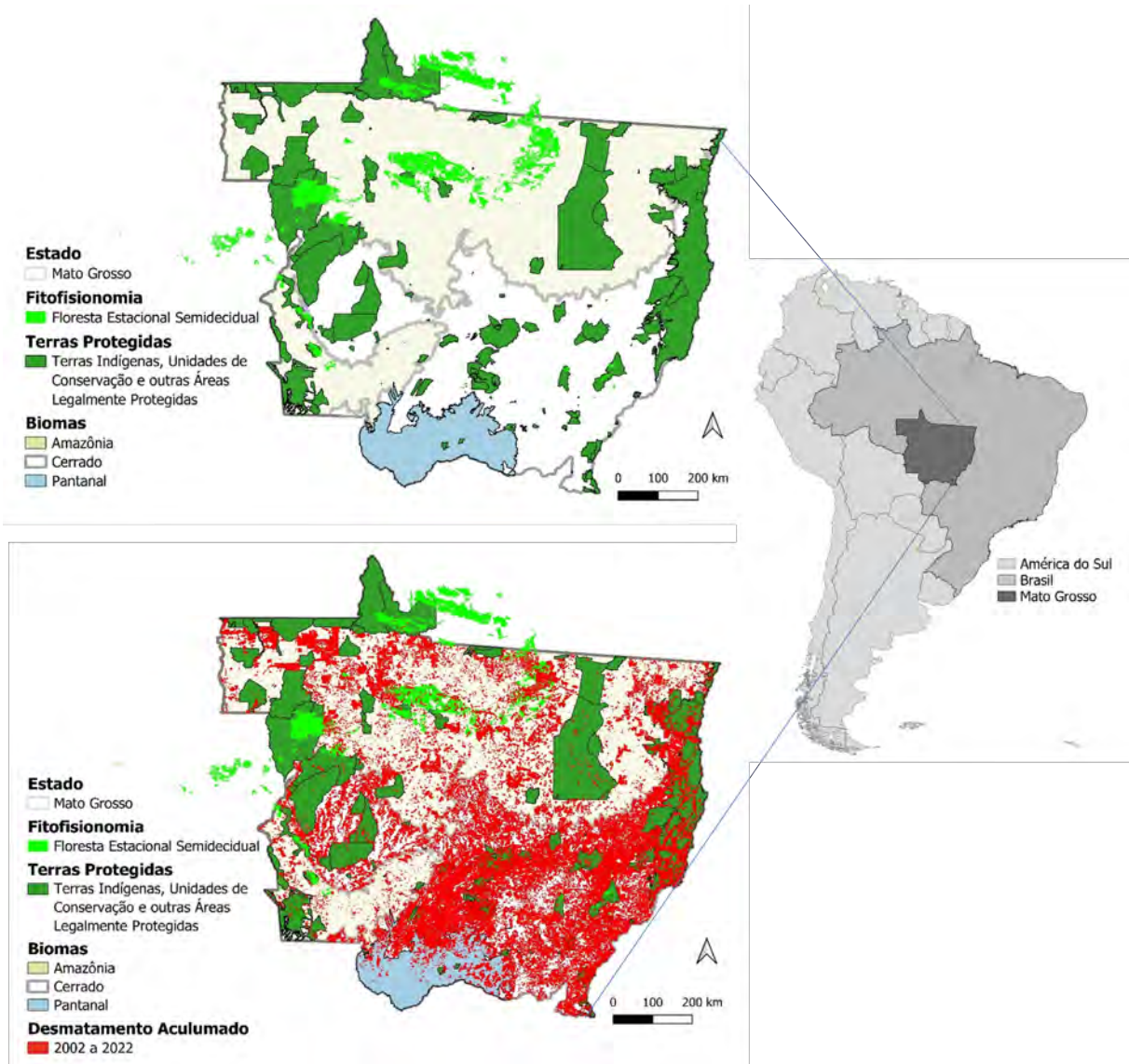


Figura L.1 – Registro acumulado do desmatamento para o Estado do Mato Grosso - Dados: 2002-2022. Inpe/terrabrazilis.(F. G. Assis *et al.*, 2019)

APÊNDICE M –

<https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-684>
 Preprint. Discussion started: 27 April 2023
 © Author(s) 2023. CC BY 4.0 License.



Enhanced net CO₂ exchange of a semi-deciduous forest in the southern Amazon due to diffuse radiation from biomass burning

Simone Rodrigues^{1,*}, Glauber Cirino^{1,3,4,*}, Demerval Moreira², Rafael Palácios^{3,4}, José Nogueira¹, Maria Isabel Vitorino^{1,3}, and George Vourlitis^{5,*}

¹Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, Brazil

²Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauró-SP, Brazil

³Instituto de Geociências, Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, Brazil

⁴Programa de Pós-Graduação em Gestão de Risco e Desastre na Amazônia, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, Brazil

⁵Department of Biological Sciences, California State University, San Marcos, CA, USA

*These authors contributed equally to this work

†Deceased

Correspondence: G. Vourlitis (georgev@csusm.edu)

Abstract. Atmospheric processes and climate are closely linked to the carbon cycle in the Amazon region as a consequence of the strong biosphere-atmosphere coupling. The radiative effects of aerosols and clouds are still unknown for a wide variety of species and types of vegetation present in Amazonian biomes. This study examines the effects of atmospheric aerosols on solar radiation and their effects on Net Ecosystem Exchange (NEE) in an area of semideciduous tropical forest in the North of Mato Grosso State. Our results show a reduction in the NEE with a decrease in incident solar radiation of $\approx 40\%$ and relative irradiance between 1.10-0.67. However, an average increase of 35-70% in NEE was observed when pollution levels (Aerosol Optical Depth) were above ≈ 1.25 . The increase NEE was attributed to the increase of up to 60% in the diffuse fraction of Photosynthetically Active Radiation. These results were mainly attributable to the biomass burning organic aerosols from fires. Important influences on temperature and relative humidity of the air, induced by the interaction between solar radiation and high aerosol load in the observation area, were also noticed; an average cooling of $\approx 3.0^\circ\text{C}$ and 10%, respectively. Given the long-distance transport of aerosols emitted by burning biomass, significant changes in CO₂ flux can occur over large areas of the Amazon, with important effects on the potential for CO₂ absorption on ecosystems of semideciduous forests distributed in the region.

1 Introduction

Carbon (C) is a key element in global biogeochemical cycles, and understanding the biosphere-atmosphere fluxes of mass and energy is essential to understanding current and future terrestrial C storage. In the context of global climate change, the potential for terrestrial ecosystems to modulate increases in anthropogenic CO₂ emissions, through the process of net ecosystems CO₂ exchange (NEE), has been widely debated Booth et al. (2012); Huntingford et al. (2013); Brienen et al. (2015), especially for Amazonian tropical forests Doughty et al. (2015); Braghieri, Kerches Renato, Akemi Yamasoe et al. (2020); Gatti et al. (2014, 2021). The result of increasing atmospheric CO₂ levels provides important feedback on the future of