



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

AVALIAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REGIONAL NO REGIME DE PRECIPITAÇÃO DA AMAZONIA

Pedro Lucas Oliveira Pinto

Relatório Final de Projeto de
Iniciação Científica (PIBIC/INPE/UNESP)
orientado por Dr. Antonio Ocimar e
Dr. Demerval Soares Moreira

UNESP
Bauru
2023

RESUMO

A floresta amazônica é uma das principais regiões vegetadas com importância para a manutenção do clima e modulação do tempo da América do Sul. Sua contribuição com os fluxos de superfície, principalmente a evapotranspiração, é importante para o regime de chuvas não só na região, mas em todo continente. Baseado nisso, este trabalho tem o intuito de avaliar o impacto do desmatamento da Amazônia no regime de chuvas do Brasil, estudando as mudanças nas propriedades da superfície da Amazônia, tais como: albedo, rugosidade, aumento da concentração de gás carbônico atmosférico, entre outras. Para avaliar estas mudanças foram realizadas simulações com o modelo numérico atmosférico regional BRAMS (Brazilian Regional Atmospheric Modeling System) utilizando-se dados da reanálise ERA5, do Centro Europeu de Previsão de Médio Termo, como condição inicial e de contorno. No modelo BRAMS, os processos de superfície são representados pelo modelo JULES (Joint UK Land Environment Simulator), que foi calibrado para a Amazônia com dados de estações micrometeorológicas do Experimento de Larga Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA). Neste trabalho, serão apresentados resultados das respostas das simulações realizadas com o modelo BRAMS com respeito a mudanças nas características da floresta, como o aumento da concentração de gás carbônico atmosférico, com ênfase na modificação da estrutura termodinâmica da atmosfera e na dinâmica do transporte de vapor de água pela atmosfera na região amazônica e no regime de chuvas.

Palavras-chave: Evapotranspiração. Modelagem Numérica. Amazonia. Precipitação.

Desmatamento.

AGRADECIMENTO

Agradeço em especial aos meus orientadores Antônio Ocimar Manzi e Demerval Soares Moreira pela paciência e aprendizado, e também ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Universidade Estadual Paulista campus Bauru pela oportunidade da realização desse projeto, agradeço também aos meus pais e amigos pelo apoio em toda minha atual graduação.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTO	II
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO.....	2
1.1.1 OBJETIVO ESPECÍFICO	2
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 GÁS CARBÔNICO (CO ₂)	3
2.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DESMATAMENTO.....	3
2.3 MODELOS NUMÉRICOS	4
3. DADOS,METODOS E METODOLOGIA.....	6
3.1 METODOLOGIA DAS SIMULAÇÕES.....	6
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	7
4.1 SIMULAÇÃO DO AUMENTO DE CO ₂ ATMOSFÉRICO	8
5. CONCLUSÃO	11
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Anomalia de Calor Sensível sendo CO2D - CONT, em W/m2.....	8
Figura 2 - Anomalia de Temperatura do ar, sendo CO2D - CONT em C°	8
Figura 3 - Anomalia de Calor Latente, sendo CO2D - CONT em W/m2	9
Figura 4 - Anomalia de Umidade Relativa, sendo CO2D - CONT, em %	9
Figura 5 - Anomalia de precipitação, sendo CO2D-CONT, em mm	10

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas é um dos fenômenos que mais vem ganhando destaque na comunidade científica, devido aos maiores impactos, previamente previstos estarem ocorrendo atualmente sobre o planeta e impactando negativamente a saúde humana e outros principais setores da sociedade (IPCC,2022), a emissão de gases do efeito estufa (GEE) geraram um aumento de quase 1,1 °C no ar. Porém, não é somente o ser humano que acaba sentindo os efeitos dessas mudanças, a biosfera por completo é afetada e principalmente a vegetação e sua interação com a atmosfera.

A florestas tropicais são as principais conversoras de gás carbônico terrestre, tanto para a absorção quanto para o armazenamento do gás, sendo uma das principais representante a floresta amazônica. A floresta amazônica tem mais de 6 milhões de quilômetros quadrados de extensão e 60,1% desta extensão pertence ao Brasil (Da Silva et al. 2005), tendo um papel fundamental para processo em diversas escalas meteorológicas, porém devido ao desmatamento que cresceu na última década, parte do clima e da diversidade biológica da região foi alterada drasticamente.

O desequilíbrio causado pelo desmatamento tem forte impacto em processos atmosféricos. Devido a grande quantidade e evaporação oceânica e a circulação permanente da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCIT), grande parte da Amazônia recebe fluxos de umidade e calor latente, causando precipitações sobre a bacia amazônica (Arraut et al., 2012; Ruv,Lemes et al., 2020; Penna et al., 2021), porém grande parte do calor latente que auxilia na formação dessa precipitação é oriundo da massiva evapotranspiração da vegetação, sendo uma grande fonte de energia para processos locais na atmosfera da floresta (Sampaio et al., 2007; Nobre and Borma, 2009; Satyamurty et al., 2013; Rocha et al., 2019) e o regime de chuvas em toda América do Sul é dependente dessa umidade (Penna et al., 2021).

Os modelos numéricos de previsão do tempo são aplicações computacionais que simulam todos os processos que ocorrem na atmosfera disponibilizadas por diversas instituições de pesquisa espalhadas pelo mundo, eles trabalham utilizando dados da situação da atmosfera em determinado tempo, para integrar em tempos futuros. Integrados a esses

modelos, existe os modelos de processos em superfície, que são de suma importância para uma boa simulação, já que a atmosfera e a superfície interagem com alto transporte de propriedades. Um desses modelos é o Modelo de mesoescala BRAMS (Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System), uma versão brasileira com adaptações para região tropical do modelo americano RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) mantido e fornecido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O BRAMS é integrado junto ao modelo de superfície JULES (Joint UK Land Environment Simulator) (Best et al., 2011; Clark et al., 2011), permitindo uma boa simulação em escala regional dos fenômenos atmosféricos e suas componentes que demandam dos processos em superfície.

Assim, através do uso de modelos numéricos, essa iniciação científica tem o intuito de avaliar o impacto na atmosfera do Brasil e da América latina, o constante desmatamento da floresta amazônica, que além da diminuição da produção de evapotranspiração, também contribui para o aumento da concentração de gás carbônico.

1.1 OBJETIVO

Obter resultados utilizando o modelo regional BRAMS, para o período de um ano analisando as principais variáveis atmosféricas e de superfície para entender o funcionamento do regime de chuvas com o desmatamento da Amazônia.

1.1.1 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Configurar e compilar o modelo BRAMS dentro do cluster GRID UNESP
- Realizar todas as simulações para o período de até um ano
- Realizar testes aumentando a concentração de gás carbônico na atmosfera e substituindo a vegetação da Amazônia por pastagem
- Plotar e analisar os resultados obtidos através de mapas e gráficos

2.0 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 GÁS CARBÔNICO (CO₂)

Alguns estudos realizados recentemente direcionaram seu foco para investigar como mudanças mais sutis na dinâmica das florestas podem ter potenciais impactos sobre o clima, tanto na região amazônica quanto em outros locais. A análise separada dos efeitos do aumento do dióxido de carbono atmosférico (CO₂) em sua influência fisiológica sobre a vegetação, na sensibilidade do clima e juntamente com o impacto do clima sobre a vegetação, nos permite compreender em que medida o clima futuro na Amazônia será influenciado por processos ecofisiológicos ou por processos físicos (Betts et al., 2007; Cao et al., 2010; Kooperman et al., 2018).

Por exemplo, o estudo realizado por Kooperman et al. (2018) demonstra que o efeito fisiológico do aumento da concentração de CO₂ atmosférico resulta em uma redução mais acentuada na precipitação na região amazônica (12%) em comparação com o efeito do clima sobre a vegetação (5%). Essa redução na precipitação associada ao efeito físico direto é principalmente provocada pela diminuição da condutância estomática resultante do CO₂. Portanto, mesmo com a persistência da vegetação da floresta amazônica nessas simulações, o fluxo de umidade da superfície terrestre para a atmosfera é consideravelmente modificado.

2.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DESMATAMENTO

A quantificação da evapotranspiração regional no regime de chuvas da Amazônia é um tema que desafia a comunidade científica há mais de meio século. Lettau et al. (1979) estimaram que a reciclagem da precipitação pela evapotranspiração varia de 16% no leste a 47% no oeste da região, enquanto Salati e Vose (1984) estimaram que a evapotranspiração regional contribui com mais de 50% da precipitação sobre a região, enquanto Elthair e Bras (1994) estimaram essa contribuição em 25%. Por outro lado, Angelini et al. (2011) afirmam que a evapotranspiração regional tem papel secundário no regime de chuvas da Amazônia. Trabalhos observacionais, como o de Randow et al. (2004), mostram uma redução de 20% na estação chuvosa, de janeiro a março, e de 40%

na estação seca, de julho a setembro, da evapotranspiração da pastagem em comparação com a evapotranspiração da floresta no Sudoeste da Amazônia. Entretanto, estudos feitos com modelos meteorológicos estimam que a precipitação regional aumenta até um certo limiar de área desmatada e, com o aumento do desmatamento, é reduzida em relação à climatologia atual (Avissar et al., 2002; Oliveira, 2007; Correia et al., 2008).

Trabalhos observacionais, como o de Randow et al. (2004), mostram uma redução de 20% na estação chuvosa, de janeiro a março, e de 40% na estação seca, de julho a setembro, da evapotranspiração da pastagem em comparação com a evapotranspiração da floresta no Sudoeste da Amazônia.

Alterações causadas pelo desmatamento para a implantação de pastagens ou cultivos de culturas agrícolas na Amazônia podem afetar diretamente o clima regional através das alterações das propriedades biofísicas da cobertura superficial. Quatro características da superfície são modificadas: o albedo, a profundidade das raízes, a rugosidade e o índice de área foliar (Costa, 2005). Segundo (Oliveira et al., 2007), se a floresta amazônica for totalmente substituída por pastagem, haverá uma redução na precipitação de cerca de 5 a 20%, e uma diminuição na evapotranspiração de cerca de 30%, aumentando assim a temperatura de 0,3 a 3°C, além de um período de seca mais prolongada na região amazônica, demonstrando assim, um impacto local e regional no clima.

2.3 MODELOS NUMÉRICOS

O modelo regional BRAMS (Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System) teve sua origem na colaboração entre as instituições ATMET/USA, IME/USP, IAG/USP e CPTEC/INPE, com apoio financeiro da agência brasileira Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). A base do sistema atual, o CCATT-BRAMS, foi desenvolvida no Instituto de Física da Universidade de São Paulo, sob a orientação dos Professores Maria A. S. Dias e Pedro L. S. Dias. Posteriormente, aprimoramentos significativos foram realizados no Centro de Pesquisa da NASA Ames/USA, na Universidade de Orleans/França e na Administração Nacional Oceânica e Atmosférica/USA. Atualmente, o projeto é conduzido e mantido por uma equipe no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas

Espaciais do Brasil (CPTEC/INPE), em estreita colaboração com diversas instituições no Brasil e no exterior.

Ele conta com diversas funcionalidades de simulação atmosférica, desde circulações sinóticas, a simulações de comportamento em microescala, como a dinâmica na camada limite planetária, e novas implementações foram feitas nas últimas versões do modelo, como a própria integração com processos em superfície considerando a troca de água, energia, momento, carbono e outros elementos biogeoquímicos (Moreira et al., 2013) e um módulo completo para química atmosférica e processos de aerossóis (Longo et al., 2013).

O ERA5, sucessor do ERA-Interim, representa um avanço notável na modelagem e assimilação de dados para a compreensão das condições atmosféricas, oceânicas e de superfície terrestre em escala global. Produzido pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo (ECMWF) em nome do Serviço de Mudanças Climáticas Copernicus da União Europeia (C3S). O ERA5 é uma ferramenta fundamental para a pesquisa climática e a previsão meteorológica, fornecendo estimativas de variáveis atmosféricas, oceânicas e terrestres em todo o mundo. Com uma resolução horizontal de 25 km e 137 níveis verticais, este conjunto de dados abrange um período que se estende desde 1940 até os dias atuais. Cada dia, uma nova parcela de informações é adicionada, permitindo um acompanhamento atemporal das condições climáticas. Além disso, o ERA5 é usado em uma variedade de contextos, desde o estudo de eventos históricos até a pesquisa sobre a variabilidade de baixa frequência e extremos climáticos. Também é uma fonte de dados valiosa para aplicações de aprendizado de máquina.

O modelo Joint UK Land Environment Simulator (JULES - BEST et al., 2011; CLARK et al., 2011) é um modelo de superfície terrestre que evoluiu a partir Met Office Surface Exchange Scheme (MOSES) contando com diversas atividades em superfície como balanço de energia, ciclo hidrológico, ciclo do carbono, vegetação dinâmica, etc. (MOREIRA et al., 2013).. O JULES foi incorporado a um modelo de superfície terrestre comunitário que pode ser usado de forma independente, mas também é o novo modelo de superfície terrestre que pode ser unificado com demais processos de simulação numérica, principalmente modelos atmosféricos de previsão climática e do tempo. Isso fornece uma ferramenta para a comunidade de pesquisa do Reino Unido estudar os processos da

superfície terrestre de maneira flexível e contribuir para o desenvolvimento de um modelo de última geração. Como o JULES pode ser facilmente operado dentro de outros modelos, o impacto da superfície terrestre na previsão do tempo e no clima pode ser prontamente avaliado.

As melhorias constantes no JULES permitirão aprimoramentos nas projeções de mudanças climáticas, desde a escala global (por exemplo, devido à representação aprimorada de vegetação e retroalimentações do ciclo do carbono) até a escala local (por exemplo, através da representação aprimorada dos efeitos das áreas urbanas em seu próprio clima local). Isso é importante para fornecer avaliações mais robustas da magnitude das mudanças climáticas e seus impactos, e para informar a tomada de decisões sobre reduções de emissões e adaptação.

3.0 DADOS, METODOS E METODOLOGIA

Como método do projeto, foi utilizado o modelo BRAMS (Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System) acoplado ao modelo de superfície JULES (Joint UK Land Environment Simulator), disponibilizado pelo Instituto Nacional de pesquisas Espaciais (INPE), o modelo foi utilizado com uma grade horizontal de $0.4^\circ \times 0.4^\circ$ (40km por 40km) com 32 níveis verticais e saídas a cada uma hora para uma região inicial de 8N a 15S e de -77°O a -35°O . Como condição de contorno e condição inicial foi utilizado dados da quinta versão do modelo de reanálise europeu ECMWF ERA5 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) na resolução de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (25km por 25km) para os principais horários sinóticos 00Z, 06Z, 12Z e 18Z. O tempo das simulações será de um ano, começando do dia 01/01/2000 até o dia 31/12/2000.

3.1 METODOLOGIA DAS SIMULAÇÕES

As simulações realizadas foram realizadas no GridUnesp um servidor mantido pelo Núcleo de Computação Científica da Unesp, contando com alto poder de processamento e uma grande quantidade de armazenamento. Com isso, foram realizados testes para três cenários: Uma simulação de controle com todas as configurações padrões, uma simulação dobrando a concentração de ppm de gás carbônico atmosférico presente como padrão no modelo de superfície para 782 ppm e uma simulação trocando totalmente a vegetação da

Amazônia para pastagem, gerando mapas através do GRADS (Grid Analysis and Display System) para analisar os resultados obtidos. Para o modelo atmosférico foi utilizado as seguintes variáveis presentes na tabela 3.1 do modelo ERA5:

Tabela 3.1 – Variáveis de forçamento necessárias para gerar as simulações no modelo BRAMS.

Variáveis	Unidade
Componente u do vento	m/s
Componente v do vento	m/s
Altura geopotencial	m
Temperatura do ar	K
Umidade relativa do ar	%

Fonte: Autoria própria

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações envolvendo o dobro da concentração de CO₂ ocorreram como esperado fornecendo bons resultados, porém para a troca da vegetação da floresta amazônica para pastagem, é necessário um maior polimento para a realização de uma simulação de acordo com os processos termodinâmicos que ocorrem no ecossistema e abordados pela literatura, e visto que para o presente relatório as etapas iniciais serão aplicadas para somente um ano, algumas mudanças relevantes podem não ser tão nítidas devido ao curto período de tempo em relação a escala temporal climática dos eventos.

Para analisar os resultados, foi nomeado os teste em CO₂D como o teste da simulação envolvendo o dobro da concentração de gás carbônico na atmosfera e CONT o teste envolvendo o controle, onde todas as condições atmosféricas e de superfícies se mantêm as padrões de cada modelo. Com isso foi feito médias de todas as saídas horárias do modelo, obtendo um comportamento anual das variáveis: Calor latente e sensível, umidade relativa, precipitação total e temperatura do ar.

Assim, como resultado, temos as figuras abaixo:

4.1 SIMULAÇÃO DO AUMENTO DE CO2 ATMOSFÉRICO

Figura 1 - Anomalia de Calor Sensível sendo CO2D - CONT, em W/m²

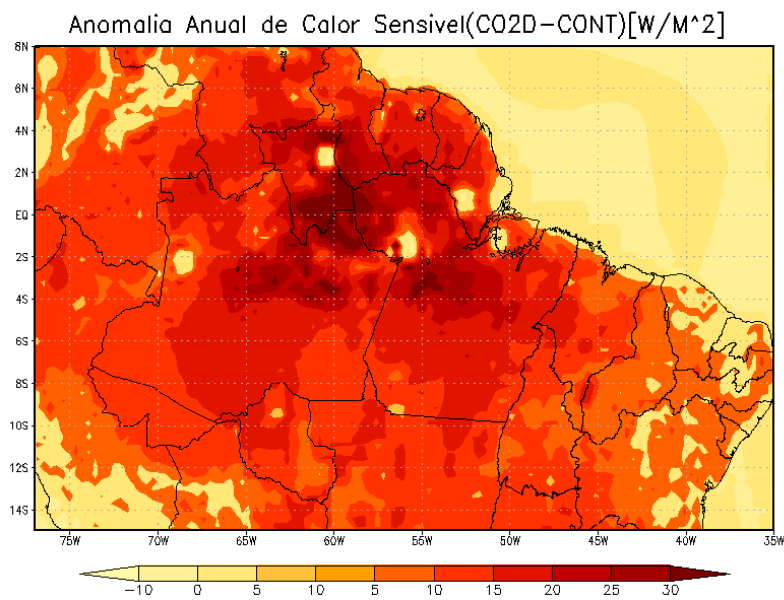
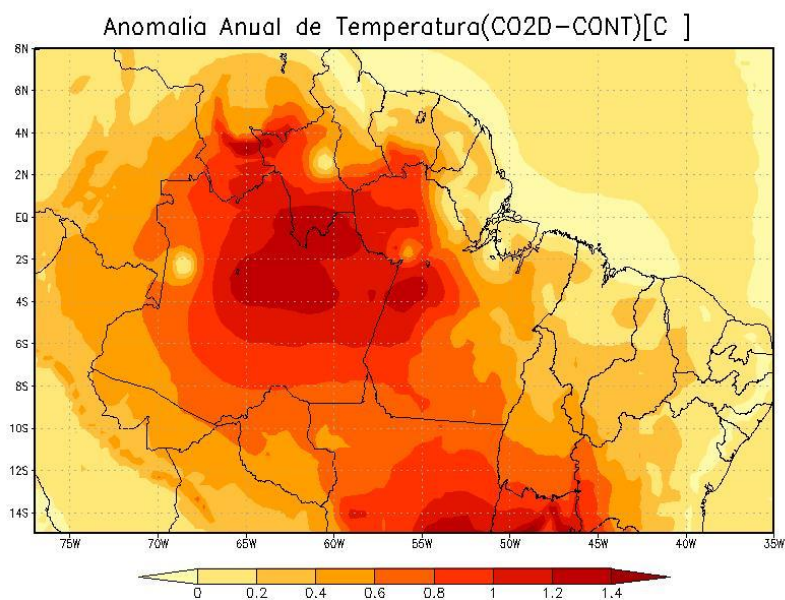
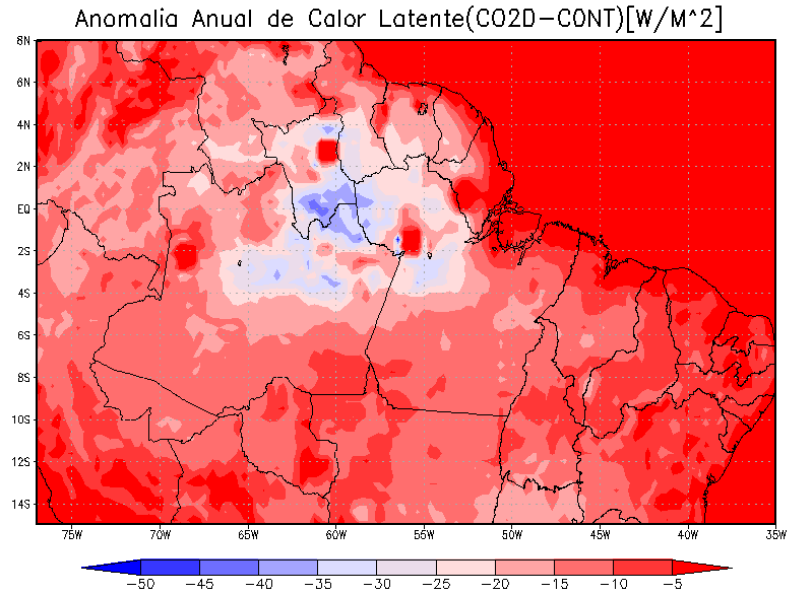


Figura 2 - Anomalia de Temperatura do ar, sendo CO2D - CONT em C°



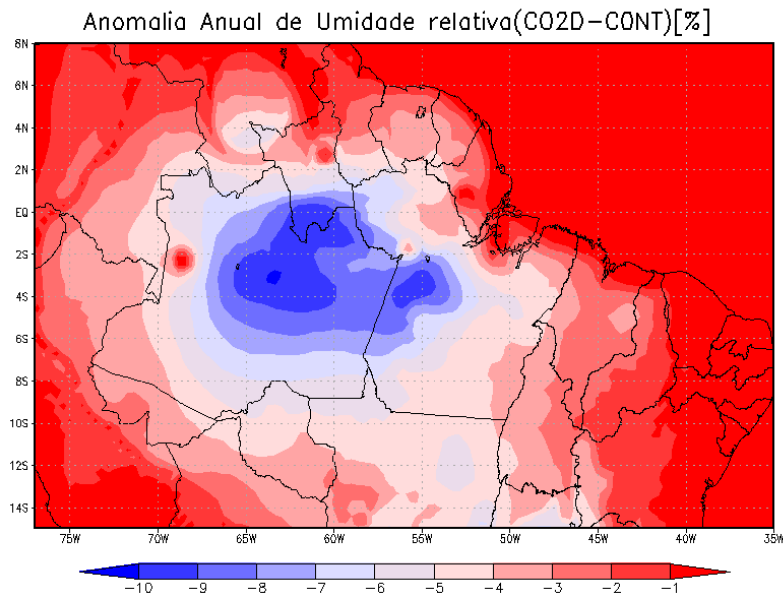
Fonte: Aatoria Própria

Figura 3 - Anomalia de Calor Latente, sendo CO2D - CONT em W/m^2



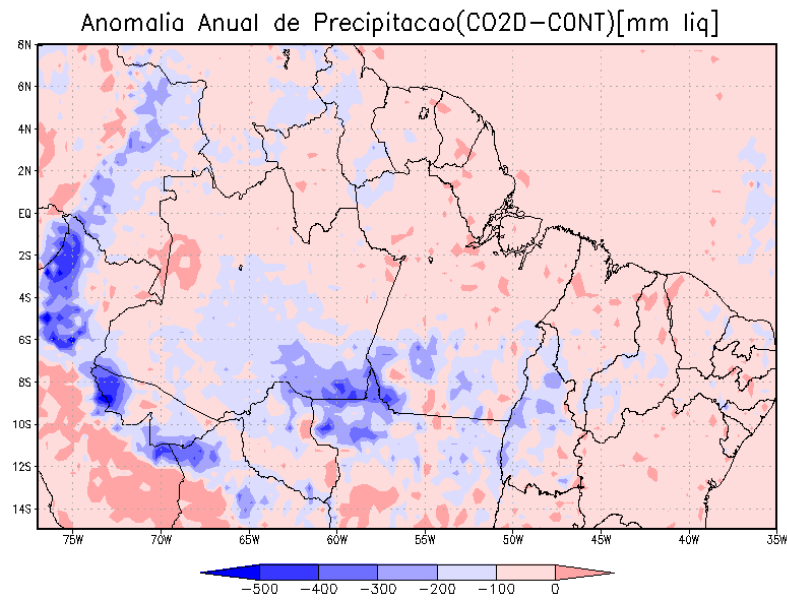
Fonte: Aatoria Própria

Figura 4 - Anomalia de Umidade Relativa, sendo CO2D - CONT, em %



Fonte: Aatoria Própria

Figura 5 - Anomalia de precipitação, sendo CO2D-C0NT, em mm



Fonte: Aatoria Própria

Analisando a figura 1, é possível perceber que boa parte do território teve diminuições no fluxo de calor latente, sendo as maiores diminuições sobre o norte do Amazonas e sul de Roraima, chegando a valores de até -50 W/m^2 , e como a evapotranspiração é uma das componentes dos fluxos de calor latente e da umidade do ar, a figura 4 aponta sobre a mesma região uma diminuição de 9 a 10% da umidade relativa e sobre todo o norte do Brasil um redução de 5 a 4%, devido a diminuição da condução estomática da vegetação, o que impactou sobre a precipitação seguindo o resultado da figura 5, uma diminuição de cerca de 300 milímetros de precipitação total sobre as regiões centrais do Amazonas. Já sobre o sudeste do Amazonas, nordeste de Rondônia, norte do Mato Grosso, noroeste e sudeste do Acre, noroeste do Peru e sul da Colômbia a diminuição chega a 500 milímetros totais.

Em relação a temperatura, a figura 1 e figura 2 apresentam resultados complementares, visto que com menor calor latente na região, pelo balanço dos fluxos de superfície, nas regiões norte e nordeste do Amazonas, Roraima, Guiana e Suriname a temperatura do ar aumentou, devido ao aumento de 30 W/m^2 do calor sensível, provocando um aumento de 1°C em todo o Amazonas, especialmente sobre o norte e nordeste onde as temperaturas ficaram 1.4°C mais quentes, nas demais regiões do Brasil norte e centro-oeste com exceção do nordeste Brasileiro, apresentaram um aumento segundo o modelo de 0.6 a 1°C .

5.0 CONCLUSÃO

Portanto, é possível observar pelo resultado das simulações, que o aumento da concentração de gás carbônico pode influenciar diminuindo a precipitação e alterando o regime de chuva da região norte em um período de um ano, como também causou um aumento significativo da temperatura do ar em um tempo curto em relação aos resultados climatológicos de outros estudos, mas com esses resultados é nítido que com as maiores emissões de gás carbônico pode afetar no regime de chuvas e a dinâmica atmosférica com a vegetação. O aumento de CO_2 não é exclusivo da industrialização e a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento da Amazônia também contribui para esse aumento, modificando toda interação climática da floresta tropical brasileira.

Para os próximos passos do projeto, é esperado a aplicação sobre toda a América Latina, e da troca da vegetação da floresta amazônica pela pastagem nas simulações do modelo numérico BRAMS, para compreender o impacto sobre a precipitação, realizando testes com ambos cenários ocorrendo simultaneamente (O dobro da concentração de gás carbônico atmosférico e a troca da vegetação por pastagem) simulando a condição atual da região, projetando para períodos maiores de no mínimo 30 anos, também para entender a dinâmica em microescala, sobre a camada limite planetária, e como a mudança nas simulações pode afetar a rugosidade da superfície, albedo, balanço radioativo, entre outros importantes processos importantes da interação entre a superfície e a atmosfera.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AVISSAR, Roni et al. The large- scale biosphere- atmosphere experiment in Amazonia (LBA): Insights and future research needs. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 107, n. D20, p. LBA 54-1-LBA Arraut, J.M.,
- Arraut, J.M., Nobre, C., Barbosa, H.M., Obregon, G. and Marengo, J. (2012) Aerial rivers and lakes: looking at largescale moisture transport and its relation to Amazonia and to subtropical rainfall in South America. *Journal of Climate*, 25(2), 543–556
- BEST, M. J. et al. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 1: Energy and water fluxes. *Geoscientific Model Development*, v. 4, n. 3, p. 677–699, 1 set. 2011.
- CLARK, D. B. et al. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics. *Geoscientific Model Development*, v. 4, n. 3, p. 701–722, 1 set. 2011.
- CORREIA, Francis Wagner Silva; ALVALÁ, Regina Célia dos Santos; MANZI, Antônio Ocimar. Modeling the impacts of land cover change in Amazonia: a regional climate model (RCM) simulation study. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 93, n. 3, p. 225-244, 2008.
- COSTA, M. H. 23 Large-scale hydrological impacts of tropical forest conversion. This page intentionally left blank, p. 590, 2005.
- ELTAHIR, Elfatih AB; BRAS, Rafael L. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 120, n. 518, p. 861-880, 1994.
- FREITAS, S. R. et al. The Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS 5.2): an integrated environmental model tuned for tropical areas. *Geosci. Model Dev.*, v. 10, n. 1, p. 189–222, 13 jan. 2017.
- LETTAU, Heinz; LETTAU, Katharina; MOLION, Luiz Carlos B. Amazonia's hydrologic cycle and the role of atmospheric recycling in assessing deforestation effects. *Monthly Weather Review*, v. 107, n. 3, p. 227-238, 1979.
- OLIVEIRA, Gilvan Sampaio de. Consequências climáticas da substituição gradual da floresta Tropical Amazônica por pastagem degradada ou por plantação de soja: Um estudo de modelagem. 2008. 417 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.
- FERRADA, Gonzalo Andrés Guajardo *et al.* Sensibilidade do background de aerossóis do sistema de modelagem CCATT-BRAMS na previsão de curto prazo.

2015. 9 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, 2016.

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*, 2013.

SALATI, Eneas; VOSE, Peter B. Amazon basin: a system in equilibrium. *Science*, v. 225, n. 4658, p. 129-138, 1984.

Penna, A.C., Torres, R.R., Garcia, S.R. and Marengo, J.A. (2021) Moisture flows on Southeast Brazil: present and future climate. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 41(6), E935–E951.

Sampaio, G., Borma, L.S., Cardoso, M., Alves, L.M., von Randow, C., Rodriguez, D.A., et al. (2019) Assessing the possible impacts of a 4 C or higher warming in Amazonia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 1(1), 201–218.

VON RANDOW, Celso 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, p. 5-26, 2004.

IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp.

KOOPERMAN, G. J. et al. Plant Physiological Responses to Rising CO₂ Modify Simulated Daily Runoff Intensity With Implications for Global-Scale Flood Risk Assessment. *Geophysical Research Letters*, v. 45, n. 22, p. 12,457-12,466, 2018.

Nobre, C.A. and Borma, L.D.S. (2009) ‘Tipping points’ for the Amazon forest. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(1), 28–36

BETTIS, R. A. et al. Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide. v. 448, n.

CAO, L. et al. Importance of carbon dioxide physiological forcing to future climate change. v. 107, n. 21, p. 9513–9518, 2010.

Da Silva et al. 2005. The Fate of the Amazonian Areas of Endemism. *Conservation Biology* 19 (3), 689-694

Esta pesquisa tornou-se possível graças aos recursos computacionais disponibilizados pelo Núcleo de Computação Científica (NCC/GridUNESP) da Universidade Estadual Paulista (UNESP)

