Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

IMPACTOS DOS CENÁRIOS RCP4.5 E RCP8.5 NA BIOMASSA ACIMA DO SOLO EM UMA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA ATRAVÉS DO MODELO ED2.2

Impacts of scenarios RCP4.5 and RCP8.5 on above-ground biomass in a national Tapajós forest in the brazilian amazon using the ED2.2 model

Impactos de los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la biomasa aérea en un bosque nacional de Tapajós en la amazonía brasileña utilizando el modelo ED2.2

Luciana Cristina de Sousa Vieira
Bolsista de Programa de Capacitação Institucional do CNPq-Nível DA, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE
vieirameteorologia@gmail.com

Vicente de Paula Silva Filho
Pesquisador Sênior, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE
vicente.silva@inpe.br

Prakki Satyamurty
Professor visitante Nacional Senior, PPG CLIAMB, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-INPA
saty.prakki@gmail.com

Resumo: A modelagem demográfica de ecossistemas é uma ferramenta importante para determinar quais fatores podem moldar a sucessão de uma floresta após eventos climáticos extremos. Os possíveis impactos da redução das chuvas, aumento da concentração de CO_2 atmosférico e o aumento da temperatura do ar devem ser estudados para se entender o que pode ocorrer com a floresta sob um cenário de mudanças climáticas. O objetivo deste trabalho foi realizar duas simulações utilizando-se condições ambientais projetadas sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5, de aumento moderado e intenso na concentração do CO_2 atmosférico, os quais indicam mudanças simultâneas tanto de diminuição da precipitação quanto de aumento da temperatura do ar. Nas condições dos cenários de mudanças climáticas RCP4.5 e RCP8.5, a fertilização por CO_2 teve um

impacto positivo na vegetação contribuindo para o aumento da biomassa cima do solo (AGB), saturando a altas temperaturas, indicando que em um clima mais seco e mais quente a floresta tropical pode reduzir o incremento de carbono em sua biomassa, desacelerando o seu crescimento e não contribuindo como um sumidouro de CO_2 para o ambiente.
Palavas chave: Mudanças climáticas, aquecimento, sucessão, plantas

Abstract: Demographic modeling of ecosystems is an important tool for determining which factors can change a forest's succession after extreme weather events. The possible impacts of reduced rainfall, increased atmospheric CO_2 concentration and increased air temperature must be studied to understand what can happen to the forest in a climate change scenario. The objective of this research was to simulate two differentes conditions environmental (RCP4.5 and RCP8.5 scenarios), of moderate and intense increase in atmospheric CO_2 concentration, which indicate simultaneous changes of decrease and increase in precipitation and air temperature. Under the conditions of climate change scenarios RCP4.5 and RCP8.5, fertilization with CO_2 had a positive impact on vegetation, contributing to the increase of Above Ground Biomass (AGB), saturating the biomass growth at high temperatures, indicating that in an environment drier and warmer climate the tropical forest can reduce the increment of carbon in its biomass, delaying its growth and not contributing as a CO_2 sink to the environment.
Keywords: Climate change, warm, succession, plant

Resumen: El modelado demográfico de los ecosistemas es una herramienta importante para determinar qué factores pueden dar forma a la sucesión de un bosque después de eventos climáticos extremos. Los posibles impactos de la reducción de las precipitaciones, el aumento de la concentración de CO2 atmosférico y el aumento de la temperatura del aire deben estudiarse para comprender qué puede sucederle al bosque en un escenario de cambio climático. El objetivo de este trabajo fue realizar dos simulaciones utilizando condiciones ambientales proyectadas bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, de aumento moderado e intenso en la concentración de CO2 atmosférico, que indican cambios simultáneos tanto en la disminución de la precipitación como en la aumento de la temperatura del aire. Bajo las condiciones de los escenarios de cambio climático RCP4.5 y RCP8.5, la fertilización con CO_2 tuvo un impacto positivo en la vegetación contribuyendo al aumento de la biomasa aérea (BSA), saturando a altas temperaturas, indicando que en un clima más seco y cálido la selva tropical puede reducir el incremento de carbono en su biomasa, frenando su crecimiento y no contribuyendo como sumidero de CO_2 al medio ambiente.
Palabras clave: Cambio climático, calentamiento, sucesión, plantas.

Submetido em: 16/11/2022
Aceito para publicação em: 23/06/2023
Publicado em: 28/06/2023

1. INTRODUÇÃO

O clima varia naturalmente tanto na escala temporal quanto na espacial, porém observou-se nas últimas duas décadas que houve um aquecimento de 0.2° C por década, o que é considerado um aumento em um ritmo muito acelerado se comparado com as variações ocorridas nos ciclos glaciais e interglaciais (NOBRE *et al*. 2012). A melhor explicação para este aumento é devido ao acúmulo de gases do efeito estufa (GEEs) na atmosfera, principalmente o aumento da concentração de CO_2 atmosférico (NOBRE *et al*. 2012). Este aquecimento pode reduzir o crescimento da vegetação nos trópicos, onde a temperatura ideal que a vegetação precisa para sua estação de crescimento pode ser alterada (PIAO *et al.* 2007).

Cenários de mudanças climáticas como os RCP4.5 e RCP8.5 (RCP, *Representation Concentration Levels*) tem sido usados em inúmeras simulações pois projetam um futuro com aumento da temperatura do ar, redução das chuvas e maior concentração do CO_2 atmosférico (LYRA *et al*. 2016; SILVEIRA *et a*l. 2016; GUIMARÃES *et al*. 2016). Resultados preliminares sobre as condições dos cenários RCP 4.5 e 8.5 sobre a floresta indicam que pode haver redução entre 9% (RCP4.5) e 50% (RCP8.5) da área de floresta (LYRA *et al*.2016).

A frequencia de eventos de seca na floresta amazônica tem sido objeto de estudo e investigação em diversas pesquisas devido a maior frequencia com que tem ocorrido e maior intensidade, deixando em aberto suposições sobre quais impactos estes eventos podem causar na floresta (ANDERSON *et al*. 2013; DAS CHAGAS *et al*. 2012; ARAGÃO *et al*. 2013).

Existem quatro possíveis efeitos que as secas podem deixar em uma: 1- embolia do xilema, afetando a capacidade de transporte de carboidratos das árvores (MCDOWELL *et al*. 2011; ANDEREGG *et al*. 2014), 2- fadiga hidráulica (ROWLAND *et al*. 2015), 3- contínua redução de reserva de carboidrato (DOUGHTY *et al*. 2015) e 4- hipótese de degradação (FRANKLIN *et al*. 1987), que supõe o aumento da fragilidade do sistema a cada seca. Apesar das secas serem consideradas parte do regime climático da Amazônia, há grandes incertezas sobre o impacto destes eventos se repetindo com maior intensidade e frequência (FELDPAUSCH *et al*. 2016). Para entender o que a seca pode causar na floresta, cientistas simularam um evento de El Nino na floresta do Tapajós em um experimento de campo chamado de “Seca Floresta” e descobriram que a disponibilidade de água para as plantas

reduziu de 80 mm a 200 mm a profundidades em até 3m, levando a redução da produtividade do dossel, índice de área foliar, deixando esta floresta mais seca e mais vulnerável a queimadas (MEIR *et al*. 2009).

Os efeitos das mudanças climáticas nas florestas também foram simulados em modelos de dinâmica da vegetação (MOORCROFT *et al*. 2001), que vem se tornando cada vez mais robustos, considerando os parâmetros biofísicos, fisiológicos e de estrutura de uma floresta interagindo com o ambiente representado pelas condições meteorológicas. A exemplo pode-se citar o modelo de biosfera terrestre ED (Ecossistem Demography) baseado em tipos funcionais de plantas, considerando a heterogeneidade do ecossistema (MOORCROFT *et al*. 2001). Resultados anteriores com o modelo ED para as secas mostraram que a diversidade funcional na floresta permite que a biomassa total acima do solo (AGB) seja resiliente às variações no regime de precipitação, apesar das mudanças na composição funcional da floresta (POWELL *et al*. 2018).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a dinâmica da vegetação em diferentes estágios de sucessão, diminuindo a precipitação e aumentando a concentração de CO_2 e a temperatura do ar em uma área florestal localizada no leste da Amazônia a fim de verificar quais mudanças podem ocorrer na dinâmica de crescimento da floresta.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo e cenários RCP's

O estudo numérico foi realizado em uma área da Floresta Nacional do Tapajós (Flona do Tapajós), no km 83 da rodovia BR 366, do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). As projeções climáticas utilizadas neste estudo foram obtidas a partir do modelo ETA forçado com as saídas do modelo global inglês HadGEM3 (CHOU *et al*.2014). O modelo ETA foi desenvolvido na Universidade de Belgrado e é utilizado pelo INPE para previsão do tempo (BUSTAMANTE *et al*. 1999) e clima (CHOU *et al*. 2005). O Modelo Climático Regional Eta-HadGEM2-ES fornece um conjunto de projeções climáticas (RCP's) para a América do Sul para o período 1960-2005 (clima atual) e 2070-2099 (projeções futuras).

Para avaliar os possíveis efeitos das mudanças climáticas futuras neste ecossistema de floresta de terra firme, foram simulados com o modelo ED2.2 dois cenários de mudanças climáticas futuras projetados pelo IPCC: RCP4.5 e RCP 8.5 (IPCC, 2007; IPCC, 2013), que representam uma forçante radiativa de 4.5 Wm^2 e 8.5 Wm^2, respectivamente, para cenários futuros de emissões antrópicas de gases de efeito estufa.

2.2. O modelo ED2.2

O modelo de Demografia de Ecossistemas (ED) é um modelo da biosfera continental que simula a dinâmica da estrutura e funcionamento do ecossistema em escala local, representando a população de árvores individualmente. O ED diferencia indivíduos em tipos funcionais de plantas (PFTs) e simula a dinâmica em escala individual e a competição entre cada estágio sucessional dos PFTs (MOORCROFT *et al*. 2001).

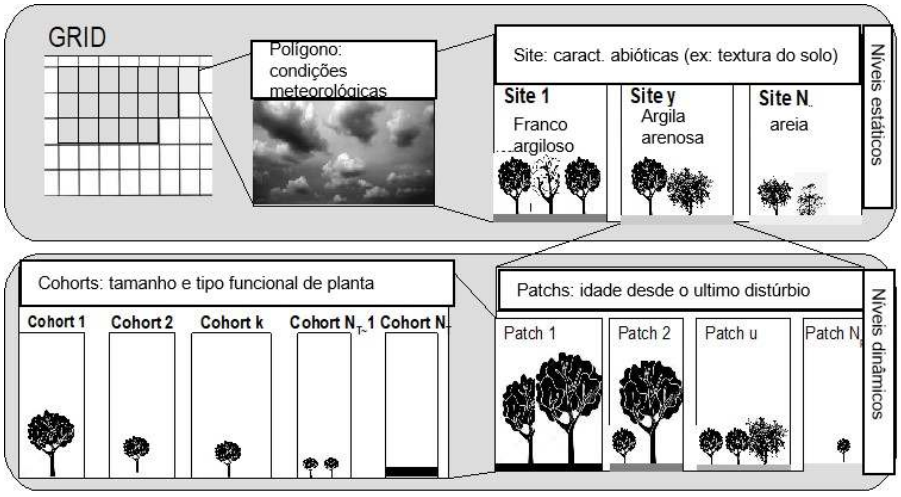
O modelo foi construído com uma estrutura hierárquica que representa a heterogeneidade física e biológica do ecossistema, dividindo o domínio de interesse em polígonos (LONGO *et al.* 2018). Em cada polígono do modelo a forçante meteorológica acima do dossel é espacialmente uniforme. O número de polígonos é determinado no início da simulação e é fixo no tempo. Cada polígono é subdividido no que o modelo descreve como "Site". Cada "Site" é subdividido em "Patchs". Dentro de cada "Patch" existem estruturas chamadas de "Cohorts", que são conjuntos de plantas com diferentes tamanhos e densidade demográfica. Os Cohorts são diferentes tipos funcionais de plantas que o modelo agrupa de acordo com o tamanho, idade, altura e diâmetro à altura do peito (DAP) e são classificados em plantas nos estágios iniciais, intermediárias e avançadas. Durante as simulações, o número de Patchs e Cohorts podem mudar de acordo com a dinâmica do ecossistema (LONGO *et al.* 2019).

O modelo estabelece diferenças entre os três tipos funcionais de plantas (pioneiras: primeiras a povoar a área de floresta; secundárias: crescem em um ambiente já florestado por pioneiras; avançadas: floresta madura estabelecida, (MULLER, 2005)), que variam em área foliar e densidade da madeira. As pioneiras têm alta área específica foliar e baixa densidade da madeira, permitindo que tenham uma rápida acumulação de carbono e rápido crescimento, enquanto que as avançadas têm baixa área específica foliar e alta densidade da

madeira. As avançadas acumulam carbono mais lentamente e consequentemente têm um crescimento mais lento (MOORCROFT *et al*. 2001). No modelo, todas as árvores começam a perder folhas quando o conteúdo de água das camadas do solo, onde encontram-se as raízes, começa a diminuir, reduzindo assim a área foliar de todos os PFTs (XU *et al*. 2016).

A estrutura do modelo ED é ilustrada de forma simples na Figura 1.

Figura 1 - Ilustração simplificada dos múltiplos níveis hierárquicos no ED2.2, organizados por níveis estáticos (grade, polígonos e sites) e níveis dinâmicos (patches e coortes). Figura adaptada de LONGO *et al*. (2019).



Fonte: Adaptado de LONGO *et al*. (2019).

2.3. Dados de entrada

Para iniciar as simulações, foi necessário configurar três condições fundamentais para o bom desempenho do modelo: condições atmosféricas, condições edáficas e estado inicial de vegetação. Para isto, o modelo requer um conjunto de dados meteorológicos, dados de propriedades do solo e dados de inventário florestal, além de dados de temperatura e conteúdo de água no solo.

Os dados meteorológicos necessários são: Temperatura específica do ar (K) e umidade (kg kg^{-1}), fração molar de CO_2 (µmol mol^{-1}), pressão do ar (Pa) acima da copa, taxa de precipitação (kg m^2 s^{-1}), radiação solar fluxo e radiação de ondas longas incidentes na superfície (W m^{-2}) e velocidade horizontal do vento (m s^{-1}). Estes dados foram obtidos da estação micrometeorológica K67 (dados horários) localizada na Flona Tapajós para 2002-2009.

Os dados de inventário florestal são importantes para definir o estádio inicial da vegetação na simulação. Este inventário deve fornecer informações do diâmetro a altura do peito (DAP), densidade do caule e tipo funcional da planta. Foram utilizados dados originários de um inventário da floresta no Tapajós (FNT/K67) publicado por (ESPÍRITO-SANTO *et al*. 2005).

As propriedades físicas do solo definidas no modelo como textura argilosa arenosa, percentual de argila de 0,59 e de areia de 0,39 foram informações obtidas para o mesmo local deste experimento por NEPSTAD *et al*. (2002). Os dados de porosidade do solo (ϕ, umidade do solo à saturação em $m^{-3}.m^{-3}$), umidade residual (θre, ponto de murcha permanente em $m^{-3}.m^{-3}$) e capacidade de campo (θFC, em $m^{-3}.m^{-3}$) para FNT/K67 foram obtidos de BRUNO *et al*. (2006).

As camadas de solo no modelo são distribuídas com espessuras, da camada mais profunda (8 m de profundidade) para a mais rasa (0.020 m profundidade) totalizando oito metros distribuídos entre 8 camadas. Os valores das propriedades do solo como o potencial mátrico a saturação e a umidade do solo a saturação oscilam tanto sazonalmente quanto no perfil de profundidade do solo.

Os parâmetros hidráulicos do solo, porosidade, potencial matricial, ponto de murcha, inclinação logarítmica da curva de retenção de água e condutividade hidráulica, foram derivados de funções de pedotransferência baseadas na granulometria do solo (COSBY *et al*. 1984). O fluxo de água entre as camadas do solo ocorre na fase líquida e é determinado pela lei de Darcy (BONAN 1996). A capacidade de campo no modelo foi calculada com base na equação de CLAPP e HORNBERGER (1978). O ponto de murcha permanente e a umidade residual do solo foram definidos como a umidade do solo na qual o potencial matricial do solo é equivalente a -1,5 e -3,1 Mpa, respectivamente (LONGO *et al*. 2018).

Os valores do potencial da matriz na saturação e da umidade do solo na saturação variam tanto sazonalmente quanto com a profundidade do solo de acordo com o volume de chuva que recarrega o sistema. Apesar de definir um valor de umidade no início das simulações, o valor desses parâmetros irá variar comforme a sazonalidade e quantidade de chuva do modelo (única entrada de água no sistema).

2.4. Assimilação de CO_2

No modelo, o tamanho mínimo da vegetação ocupando uma área é de $0.005 m^2_{folha+madeira} m^{-2}$, tamanho mínimo que um *cohort* precisa para ser calculado como um sistema termodinâmico. Este tamanho mínimo é ajustável (LONGO *et a*l. 2019).

Os mecanismos que controlam a fisiologia da folha no modelo são baseados nos trabalhos desenvolvidos por FARQUHAR *et al*. (1980) and COLLATZ *et al.* (1991) e a condutância estomatal utilizada é baseada na equação de LEUNING (1995).

A taxa de absorção de CO_2 de cada *cohort* k (A_k,mol_C m^{-2} folha s^{-1}) é controlada pelo ambiente foliar e pela correspondente perda de água através da transpiração (E_k,mol_W m^{-2}folha s^{-1}). Os estômatos e a camada limite da folha são os meios pelo qual ocorre a troca de água e CO_2 entre o espaço intercelular da folha e o espaço aéreo do dossel.

A produtividade primária bruta (PPB) é a capacidade da vegetação de capturar CO_2 atmosférico enquanto perde parte desse CO_2 é assimilado por meio da respiração autotrófica (SILVA, 2013). No modelo ED2.2, GPP (kg C planta^{-1} s^{-1}) é calculado usando a equação 1.

(1)

$$GPP_m = \frac{M_c \#_m \Lambda_m}{n_m} . \left[(1 - 0_{g,\pi_m}) \dot{A}_{0,m} + 0_{g,\pi_m} \dot{A}_{l^*,m} + \dot{D}_m \right]$$

Onde M_c é a massa molar do carbono; n_m = densidade da população (planta m^{-2}); $\#_m$=1 para plantas com os estomatos de um lado da folha; Λ_m= índice de área foliar ($m^{-2}m^{-2}$); $0_{g,\pi m}$ = ponderação entre estômatos fechados e abertos; $A_{0,m}$=fotossíntese para quando os estomatos estão fechados; D_m=fotossíntese para quando os estomatos estão abertos.

A respiração da planta (kg C planta$^{-1}s^{-1}$) é calculada de acordo com a equação 2.

(2)

$$R_{\lambda m} = \frac{M_c \#_m \Lambda_m}{n_m} . D_m$$

A condutancia estomatal (gs) é calculada de acordo com a equação de LEUNNING (1995) através da equação 3. A gs controla a perda de água e taxa de assimilação de CO_2 (ms^{-1}).

(3)

$$g_s = \begin{cases} \dfrac{MA_o}{(C_s - t) \quad \left(1 + \frac{D_s}{D_o}\right)} + b & for\ open\ stomata \\ b & for\ closed\ stomata \end{cases}$$

Onde M e D0 são constantes empíricas e b é a condutancia cuticular. Ds representa o déficit de vapor de água Ds=eL-eS e, eL é a concentração de vapor de água intercelular (MEDVIGY *et al*.2009).

A limitação de água no modelo é calculada de acordo com as equações 4 e 5 (MEDVIGY *et al*.2009).

(4)

$$A_{net} = f_{o,w} A_o + \left(1 - O_{g,\pi_m}\right) A_c$$

(5)

$$\psi_{net} = f_{o,w} \psi_o + (1 - O_{g,\pi_m}) \psi_c$$

Onde A_{net} =taxa de fotossíntese (mol.m^{-2} folha^{-1}); ψ_{net}=evapotranspiração (mol$_w$ m^{-2} folha^{-1}); $f_{0,w}$ é a ponderação para estômatos abertos; A_0 e A_c representam a fotossíntese para estômatos abertos e para estômatos fechados, respectivamente. A_{net} e ψ_{net} são considerados linear sob condições de estômato aberto (A_0, ψ_0) e estômatos fechados (A_c, ψ_c) ponderada pela disponibilidade de água da planta (oferta) em relação à sua demanda total de água.

O ponderamento que determina quando os estômatos estão abertos ($0_{(g,\pi m}$)) é dado pela equação 5.

(5)

$$O_{g,\pi_m} = \frac{1}{1 + \frac{demand}{supply}}$$

Onde a demanda = ψ_0 SLA Bleaf; SLA=área específica da folha; Bleaf=biomassa de folhas; demanda(supply)=K_wWbroot; onde W =quantidade de água total acessível para a vegetação; Broot=raízes finas e K_w=constante.

A equação alométrica que define a profundidade da raiz em relação à altura da árvore em ED2.2 é dada pela função exponencial simplificada (equação 6):

(6)

$$z\rho = -1.114 DBH^{0.422}$$

Onde DBH =diametro a altura do peito (cm).

A biomassa no modelo ED2.2 (AGB) é calculada com base nos dados de Bleaf e Bwood biomassa de folhas e biomassa da madeira em Kg C.planta^{-1}, respectivamente (equação 7).

(7)

$$ed_{biomass}(AGB) = Bleaf + Bwood$$

O Bwood é calculado usando-se os parâmetros Bsapwood (biomassa do alburno), Bdead (biomassa estrutural morta (Kg C.planta^{-1}) e agf_bs (ipft) (fração do tronco estrutural que está acima do solo) que tem um valor constante de 0.7, (equação 8)

(8)

$$Bwood = Bsapwood + (Bdead * agf_{bs(ipft)})$$

Bleaf é a biomassa de folha que é definida no modelo pela equação 9.

(9)

$$B_{leaf} = \frac{e(t)Ba}{1 + q + q_{sw}h}$$

Onde e(t) é um fator que varia entre 0 e 1 que explica o estado fenológico da planta , onde t_0 é a média, b é a inclinação e t é o dia juliano, q é a alocação de raízes finas em

$$e(t) = \frac{1}{1+\left(\frac{t}{t_0}\right)b}$$

relação a raízes de folhas, B_a é o reservatório de biomassa viva de cada camada da vegetação que consiste em biomassa de folhas, raízes finas e alburno.

2.5. Simulações para os cenários RCP4.5 e RCP 8.5

Para avaliar o estado de equilíbrio da biomassa vegetal, foram realizadas simulações para ajustar as condições iniciais às equações do modelo, em um processo denominado spin-up (YANG *et al.* 1995). O modelo funcionou por um período de spin-up de 300 anos. Assumimos que os últimos 30 anos de simulação corresponderam a condições de quase-equilíbrio. A não instabilidade do modelo foi avaliada através da análise da sazonalidade da umidade do solo, GPP e gs em relação às observações de campo (RESTREPO-COUPE *et al*. 2013; NEPSTAD *et al*. 2013; ROCHA *et al.* 2004). Após as simulações para o cenário controle, os cenários RCP4.5 e RCP8.5 foram simulados no modelo.

Para simular as condições de chuva e temperatura do ar para a Flona Tapajós projetada pelos cenários RCP, foi realizada uma análise estatística descritiva comparando dois intervalos de tempo do modelo Eta-HadGEM2-ES: 1960-2005 (dados históricos) e 2070-2099 (projeções do modelo). A comparação mostrou um aumento da temperatura do ar e uma redução das chuvas (Tabela 1).

Tabela 1- Configurações de radiação de ondas longas e concentração atmosférica de CO_2 para os dois cenários de mudanças climáticas e projeção da variação nos parâmetros meteorológicos em 2070-2099 em relação a 1960-2000. Temperatura do ar (T_ar = temperatura do ar; LWR = radiação de onda longa; PRP = chuva; q = umidade específica; e concentração de CO_2. O sinal + indica aumento, e - indica diminuição em relação a 1960-2005.

Scenario	T_ar (º C)	PRP (%)	q (%)	CO_2 (ppm)	LWR (W m^{-2})
RCP4.5	+4	-17	+13	650	22.40
RCP8.5	+7.5	-30	+7	1100	41.40

O tempo de execução escolhido para as simulações com os cenários RCP4.5 e RCP8.5 foi de nove anos, com base nos dados de equilíbrio simulados, gerando novos dados para o intervalo de 2002 a 2010. A condição inicial de distribuição de umidade do solo foi utilizada como controle de simulações para dinâmica da vegetação. A validação foi realizada com dados de umidade do solo obtidos em campo por (NEPSTAD *et al*. 2013) para o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2004.

Após definir os valores da Tabela 1, eles foram utilizados para alterar os dados de entrada do modelo. Por exemplo, para o cenário RCP4.5, a estimativa é de um aumento da

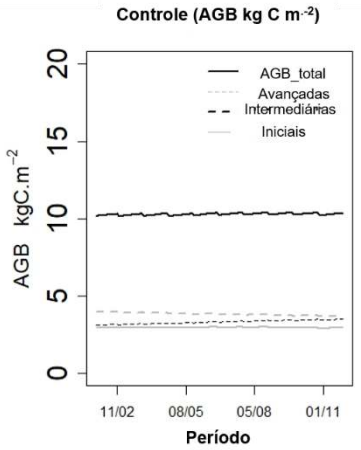
temperatura do ar de 4°C, então adicionamos 4°C aos valores mensais. Para chuva e umidade específica, os dados também foram modificados conforme aumento (+) ou diminuição (-). No RCP4.5 mantivemos a concentração de CO_2 em 650 ppm e no RCP8.5 mantivemos em 1100 ppm para as simulações. A umidade específica (q) foi calculada com base nos valores de temperatura e umidade relativa e sua variação entre os períodos foi avaliada por meio de estatística descritiva.

3. Resultados e discussão.

3.1. Resultados para o cenário controle.

O resultado para a simulação controle (Figura 2) manteve a AGB (sigla em inglês para Above Ground Biomass) total em torno de 10.5 ± 1.47 $kgC.m^{-2}$. Os valores de AGB no equilíbrio são semelhantes aos valores encontrados por POWELL *et al*. (2015) para o mesmo local de estudo. Os dados de campo de índice de área foliar (LAI, sigla em inglês para *Leaf Area Index*) resultantes do experimento controle (IAF=6 $m^2.m^{-2}$) foram semelhantes aos valores de campo publicados por (NEPSTAD *et al*. 2013) de 1998 a 2006 para o Tapajós, com um R^2=0,86.

Figura 2. Série temporal da média mensal de biomassa aérea (AGB) para o cenário controle para 10 anos. As cores indicam os diferentes tipos funcionais de plantas: verde (iniciais), vermelho (intermediária), azul (avançada) e a linha preta corresponde ao total de AGB.

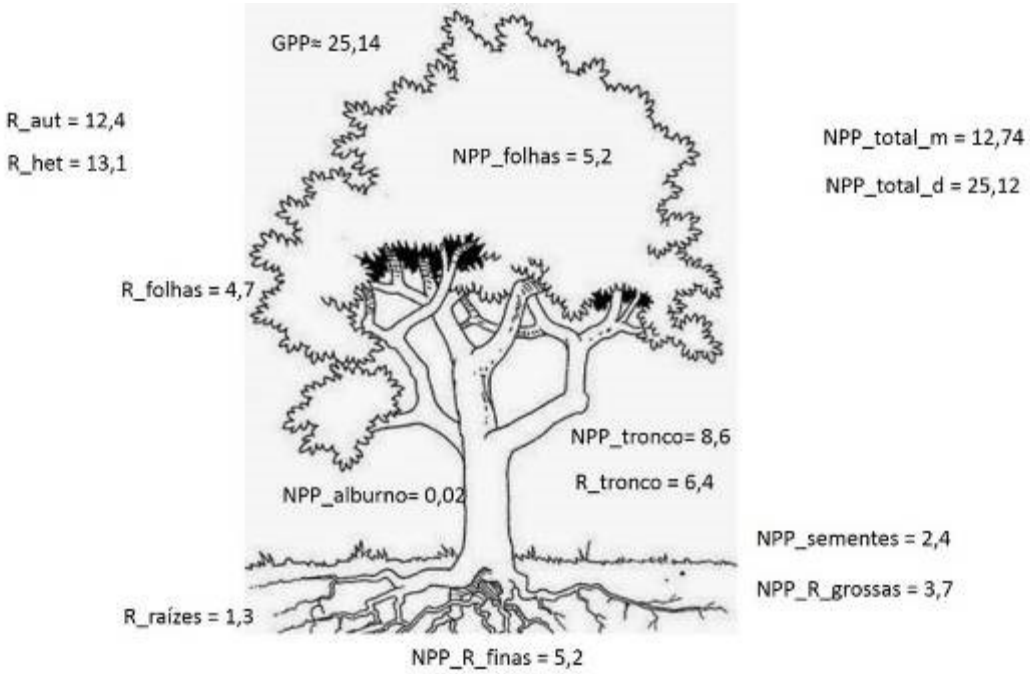


Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Os componentes da produtividade da floresta em unidades de Mg $C.ha^{-1}.ano^{-1}$ são

apresentados no diagrama da Figura 3.

Figura 3. Diagrama do particionamento da produtividade primária bruta (Gross Primary Production, GPP) nos componentes da produtividade primária líquida (Net Primary Productivity, NPP_total_m) e respiração autotrófica (R_aut).



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

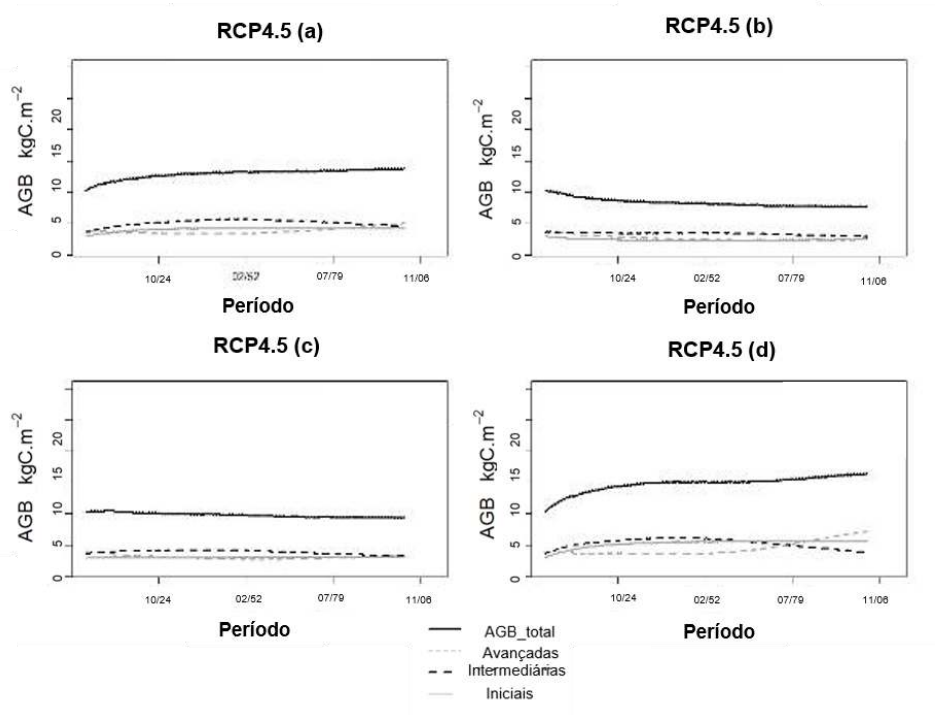
Quando a umidade do solo é suficientemente baixa pode haver diminuição da GPP, que irá diminuir a absorção de CO_2, ou diminuir a respiração heterotrófica, diminuindo a fonte de CO_2 para a atmosfera, ou ambos(MEIR *et al*., 2008). As séries temporais de GPP calculadas por RESTREPO-COUPE para o período de 2000 a 2004 foram em média 25,6 Mg C ha $^{-1}$ ano $^{-1}$ (RESTREPO-COUPE *et al*.(2013). O resultado desta simulação para a GPP para o período de 2002 a 2010 foi de 25 Mg C ha $^{-1}$ ano $^{-1}$. Este resultado para a saída GPP do modelo quando comparada ao valor de campo para o mesmo local mostra que o modelo foi devidamente calibrado.

O resultado obtido para a NPP pelo modelo foi em média 12.74 Mg C ha $^{-1}$ ano $^{-1}$. Os dados de NPP obtidos por MALHI *et al.* (2009) foram de 14.4 Mg C ha $^{-1}$ ano $^{-1}$.

3.2. Resultados para os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

No modelo, os diferentes estágios de sucessão que compoem a floresta competem entre si, é o que observamos na Figura 4 que mostrou inicialmente o aumento das árvores de crescimento rápido (iniciais e intermediárias). Por exemplo, observamos no gráfico que as linhas que representam cada estágio sucecional aparecem em diferentes posições. As linhas pontilhadas preta ou cinza e a linha continua cinza, são três linhas que posicionam-se de acordo com o valor total da AGB. A sobreposição da linha pontilhada preta sobre a linha pontilhada cinza, por exemplo, indica qual estágio sucessional está predominando.

Figura 4. Série temporal da biomassa aérea para as quatro simulações com o cenário RCP 4.5. (a) experimento modificando os parâmetros meteorológicos de acordo com o RCP 4.5, (b) experimento com aumento da temperatura, (c) experimento com redução da precipitação, (d) experimento com aumento da concentração de CO_2.



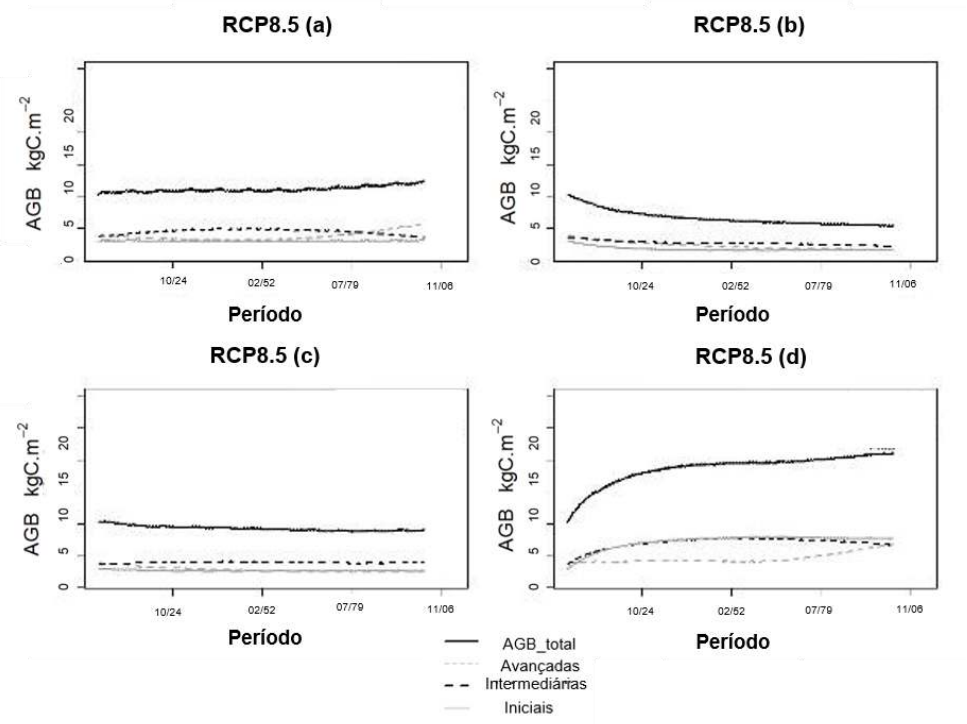
Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Para o cenário RCP 8.5, os resultados das simulações são apresentadas nas (Figura5b) para temperatura do ar, chuva (Figura5c), e aumento da concentração de CO_2 (Figura5d).

Os resultados mostraram que para o primeiro cenário (Fig.5a) houve um aumento de 8% da AGB em relação a simulação controle. Isto porque, mesmo com um cenário de

aumento da T_ar em 7.5°C e redução das chuvas em 30%, o aumento da concentração de CO_2 atmosférico para 1100 ppm favoreceu o aumento da biomassa. Pesquisas feitas em laboratório já mostraram que as plantas podem responder positivamente a altas concentrações de CO_2, mostrando que para um aumento de 300 ppm para 600 ppm de CO_2, houve aumento de 30% na produtividade vegetal (IDSO *et al*, 1989, p. 8). Porém não se pode afirmar que a elevação da concentração de CO_2, em um meio que não seja laboratório, favorecerá um crescimento conforme o aumento de CO_2. Para a (Figura5 b), com o aumento da T houve uma redução de 36% da AGB e para a (Figura5 c) com a redução da precipitação houve uma redução de 10% da AGB. Para a (Figura5 d) com o aumento da concentração de CO_2 para 1100 ppm a AGB aumentou cerca de 81% em relação ao que foi observado no cenário controle.

Figura 5. Serie temporal da biomassa aérea para as quatro simulações com o cenário RCP 8.5. (a) experimento modificando os parâmetros meteorológicos de acordo com o RCP 8.5, (b) experimento com aumento da temperatura, (c) experimento com redução da precipitação, (d) experimento com aumento da concentração de CO_2.



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Comparando os dois cenários (RCP 4.5 e 8.5) para o experimento onde foram modificados todos os parâmetros meteorológicos, o modelo simulou um aumento da AGB de 25% (Figura

4a) e 8% (Figura 5a) em média para os dois cenários respectivamente. LYRA *et al*. (2016) encontraram em seus resultados uma diminuição de 9% e 50% da área de floresta tropical na região leste da Amazônia, para condições de aumento da temperatura do ar e redução das chuvas. Embora o aumento da T e redução da PRP nas simulações tenham mostrado que para estes parâmetros meteorológicos poderá haver redução do estoque de carbono na floresta, o aumento da concentração de CO_2 para o modelo ED favoreceu o crescimento das árvores durante os 100 anos simulados. Porém as condições de temperatura do ar mais elevada encontrada no cenário RCP8.5 foi o fator determinante para maior redução da AGB em relação ao cenário RCP4.5.

Na natureza, o aumento da temperatura do ar acima do valor ótimo para que ocorra o crescimento da planta pode levar a diminuição do estado de ativação da rubisco e a sua especificidade de CO_2 com relação ao O_2, o que pode resultar em grandes perdas de CO_2 pela fotorrespiração, diminuindo a assimilação líquida de CO_2 (TAIZ E ZEIGER, 2004).

Uma comparação entre três modelos realizada por CASTANHO *et al*. (2016) comparou os efeitos das mudanças climáticas nos modelos IBIS, ED2 e JULES para verificar qual o efeito da variação climática somada com a fertilização do CO_2 na atmosfera e o efeito, somente, do aumento de CO_2 na AGB. Os resultados mostraram que os modelos foram capazes de simular a redução da biomassa devido ao estresse hídrico, porém, quando a seca foi combinada com o aumento de CO_2 os modelos JULES e ED2 simularam um aumento da biomassa acima do solo e no modelo IBIS houve redução da AGB.

No modelo ED2.2, sob condições de alta concentração de CO_2, houve um aumento da AGB (Figuras 4 e 5) mostrando que somente as mudanças no clima foram insuficientes para reverter o sinal positivo da AGB devido a fertilização com CO_2.

Isto pode ser explicado devido o algorítmo da GPP no modelo ED2.2 apresentar um fator de taxa de assimilação de CO_2 que pode ignorar implicitamente a limitação de água do solo na fotossíntese, o que pode fazer com que o modelo mesmo sob condições de baixa umidade no solo continue a incrementar carbono em sua biomassa se houverem condições de alta concentração de CO_2 na atmosfera. Esta falta de saturação pode ser dominante mesmo que nas simulações o cenário seja de um clima mais quente e seco. Para simulações futuras seria importante melhorar a função de absorção de CO_2 pelo modelo para que este

esteja bem equilibrado com as condições climáticas representando com mais acurácia a dinâmica da floresta em um cenário de mudanças climáticas.

Em relação à alometria de raízes, a absorção de umidade do solo foi mais favorável as plantas com profundidade de raízes maior, favorecendo as mesmas em condições mais secas. Porém, existe a necessidade de mais medidas de campo para estabelecer melhor alometria que possa ser usada em modelos ecossistêmicos, de maneira que esta possa considerar que algumas espécies de árvores de menor estatura também podem ter raízes mais profundas.

Existem alguns experimentos ao redor do mundo (NORBY,R.J. *et al*. (2005); KARNOSKY AND PREGITZER, 2006) que tentam responder qual será o futuro da floresta sob condições de elevada concentração de CO_2 atmosférico, mas ainda não há um resultado a longo prazo para a área de floresta tropical, capaz de responder o que se pode esperar quanto a absorção de carbono sob estas condições, seria necessário maior investigação através de pesquisas de campo.

Pesquisas mostram que pode existir uma ligação entre o dióxido de carbono e o aquecimento global (JOUZEL *et al*. 2007; LÜTHI *et al.* 2008), devido à relação entre a temperatura e a solubilidade do dióxido de carbono na superfície do oceano. Dados publicados por MEINSHAUSEN *et al*. (2019) indicam que se as concentrações de CO_2 continuarem aumentando, o aquecimento global poderá triplicar neste século.

Se o cenário de triplicação do CO_2 atmosferico ocorrer, em laboratório já foi observada resposta positiva para o crescimento da planta, conforme já foi citado neste artigo. Porém, deve-se analisar que o aumento deste gás atmosférico acompanha o aumento da temperatura do ar que por sua vez influência no regime de chuvas. Caso a floresta cresça em função da maior disponibilidade de CO_2 para a planta absorver, a mesma deverá ter um limite e saturar a determinado crescimento, então, os recursos para mantê-la serão limitados, aumentando a taxa de mortalidade, abrindo clareiras na floresta, para que o processo de sucessão novamente ocorra.

Alguns experimentos controlados a nível de laboratório, aumentando a concentração de CO_2 no ambiente de 300 ppm para 600 ppm, resultaram em um aumento de 30% na produtividade vegetal (IDSO *et al*, 1989, p. 8). Se esta condição em laboratório for o possível cenário de crescimento da floresta após a elevação do CO_2 atmosférico, então, inicialmente

haverá crescimento acelerado das árvores com diferentes taxas de acordo com os tipos funcionais de plantas. Nestas pesquisa, estamos considerando apenas o crescimento das plantas C3, que compreendem a maioria das espécies terrestres, ocorrendo principalmente em regiões tropicais úmidas.

Por isso é importante investigar como será o novo recomeço da floresta diante de um novo cenário climático pessimista. Esta nova sucessão ocorre devido o banco de sementes que o solo armazena.

O banco de sementes do solo, que está aguardando para se desenvolver, necessita de condições específicas para germinar. Pesquisas de campo analisando 272 espécies de sementes arbóreas nativas para o Brasil mostrou que a temperatura ótima para a germinação está no intervalo entre 25° e 30°C e que há uma relação entre a temperatura ótima e o bioma de ocorrência da espécie (BRANCALION *et al*. 2010). Temperatura ótima é a que a germinação da semente é máxima em termos de quantidade e velocidade (MAYER E POLJAKOFF MAYBER, 1989). Para as espécies nativas pioneiras da Amazônia, a temperatura ideal é de 30°C, com algumas espécies germinando também com 35°C no ambiente (BRANCALION *et al.* 2010).

Supondo que sob condições de elevada taxa de mortalidade na floresta tropical, devido a limitação de recursos e outros fatores, haverá a abertura de clareiras com a queda das árvores. As espécies pioneiras são as que contém maior quantidade de sementes depositadas no solo (UHL, 1987). Estas clareiras abertas favorecem a maior entrada da radiação solar que estimula a germinação. Mas sob condições de pouca disponibilidade de água não há germinação, foi o observado para espécies do semiárido (BRANCALION *et al*.2010).

Para a Amazônia, como existe a regularidade das chuvas e a água não é um fator limitante para a germinação, o desenvolvimento das sementes pode ocorrer sob faixas mais amplas de temperatura, mas com o cenário climático que aponta para redução de chuvas, o recurso hídrico escasso somado ao aumento da temperatura do ar pode ser um bloqueio para a germinação de muitas espécies. É importante ressaltar que as espécies pioneiras são importantes para que as secundárias possam se estabelecer, criando condições adequadas de microclima e solo para as plantas que necessitam de menos luz e melhores condições de solo (ALMEIDA, 2016). As secundárias iniciais podem se desenvolver com as pioneiras na

fase inicial de sucessão florestal, tendo capacidade de se desenvolver em ambientes abertos e semiabertos e que aceitam o sombreamento parcial. Porém as secundárias iniciais podem se dividir em espécies com copa curta e larga sendo importantes para o sombreamento dos substratos inferiores. Não é possível prever quais secundárias iniciais iriam desenvolver juntamente com as pioneiras. Se forem somente as de copa curta, seria um agravante para as espécies secundárias tardias que são intolerantes a luz e precisam da sombra para completar seu ciclo (ALMEIDA, 2016). Por sua vez, as espécies Clímax, que fazem parte do estágio final de desenvolvimento da floresta (BUDOWSKI, 1965), e se desenvolvem em plena sombra, podem ter dificuldades em se desenvolver, supondo que a presença de novas espécies de árvores, sob condições extremas de clima, seja mais rarefeito.

Na prática, a sucessão pode seguir múltiplas trajetórias, considerando que são sistemas naturais abertos e sujeitos a interferências, necessitando portanto, de mais investigação para melhores informações sobre o estado futuro da floresta coma as mudanças climáticas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa buscou mostrar a importância de conhecer quais podem ser os maiores condutores de mudanças na AGB para a floresta tropical Amazônica, determinando o que pode afetar a vegetação caso os cenários previstos pelos modelos aconteçam, focando nos principais parâmetros meteorológicos e nas análises do solo.

As simulações para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 mostraram que apesar do efeito negativo do aumento da temperatura e da diminuição da precipitação sobre a Amazônia no modelo ED, a fertilização por CO_2 teve um impacto positivo na vegetação contribuindo para o aumento da AGB, até determinado limite, saturando a altas temperaturas. As simulações com alteração nos parâmetros temperatura, CO_2, umidade específica, radiação de onda longa e precipitação, resultaram em aumento da AGB em 25% para o RCP4.5 e 8% para o RCP8.5. Este resultado indica que, mesmo que o modelo ED não sature devido ao aumento da concentração de CO_2, quando se reuniu um cenário com aumento de temperatura, diminuição da precipitação e aumento de CO_2 na atmosfera simultaneamente e com diferentes magnitudes, houve diferenças significativas no crescimento da vegetação,

indicando que em um clima mais seco e mais quente a floresta tropical pode nao aumentar a AGB no cenário RCP8.5 tanto quanto ocorreu no cenário RCP4.5.

Ainda não é claro qual será o funcionamento da fisiologia das plantas tropicais quando as concentrações de CO_2 atmosférico chegarem a valores mais elevados e os padrões de chuva e temperatura mudarem. É necessário observar resultados de experimentos de campo em área de floresta tropical e assim verificar quais os processos que estarão maus susceptíveis a estas mudanças no clima.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo financiamento que tornou esta pesquisa possível. O autor P.S. agradece a CAPES pelo apoio através da bolsa PVNS e o CNPq pelo apoio através da bolsa de produtividade em pesquisa.

REFERÊNCIAS

AINSWORTH, Elizabeth A.; LONG, Stephen P. 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation?. **Global Change Biology**, v. 27, n. 1, p. 27-49, 2021.

ANDEREGG, W. R., Berry, J. A., Smith, D. D., Sperry, J. S., Anderegg, L. D., & Field, C. B. The roles of hydraulic and carbon stress in a widespread climate-induced forest die-off. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 109, n. 1, p. 233-237, 2012.

ANDERSON, L. O., Aragão, L. E. O. C., Valeriano, D. S., Cardoso, M., Shimambukuro, Y., & Lima, A. Impactos das secas nas florestas Amazonicas. **Secas na Amazonia: Causas e Consequencias**, 148-164, 2013.

ARAGÃO, L. E. O. C., Shimabukuro, Y. E., Cardoso, M., Anderson, L. O., Lima, A., & Poulter, B. Frequência de queimadas durante as secas recentes. **Secas na Amazônia: causas e consequências** (ed. Borma LDS, Nobre CA). Oficina de Textos, 2013.

BALL, J. Timothy; WOODROW, Ian E.; BERRY, Joseph A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: **Progress in photosynthesis research: volume 4 proceedings of the VIIth international congress on photosynthesis providence**, Rhode Island, USA, august 10–15, 1986. Springer Netherlands, 1987. p. 221-224.

BETTS, R. A.; COX, P. M.; COLLINS, M.; HARRIS, P.P.; HUNTINGFORD, C.; JONES, C.D. 2004.

The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazon forest dieback under global climate warming. **Theoretical and Applied Climatology**, 78, 157-175.

BONAN, Gordon B. Sensitivity of a GCM simulation to subgrid infiltration and surface runoff. **Climate Dynamics**, v. 12, p. 279-285, 1996.

BRAGA, Fabíola Mendes *et al*. Revisão: Crescimento de plantas C3 e C4 em resposta a diferentes concentrações de CO_2. Research, Society and Development, v. 10, n. 7, p. e33810716701-e33810716701, 2021.

BRUNO, Rogério D. *et al*. Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 20, n. 12, p. 2477-2489, 2006.

BUCKERIDGE, Marcos Silveira; Mortari, Leila Cristina; Machado, Marcelo R. Respostas fisiológicas de plantas às mudanças climáticas: alterações no balanço de carbono nas plantas podem afetar o ecossistema?. **Fenologia: ferramenta para conservação, melhoramento e manejo de recursos vegetais arbóreos**, 2007.

BUSTAMANTE, Josiane F. *et al.* Evaluation of April 1999 rainfall forecasts over South America using. **Climanálise**, v. 1999, p. 1-2, 1999.

CHOU, S. C.; Bustamante, J. F.; Gomes, J. L. Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, n. 4, p. 537-555, 2005.

CHOU, Sin Chan *et al*. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 05, p. 512, 2014.

CLAPP, Roger B., Hornberger, George M. Empirical equations for some soil hydraulic properties. **Water resources research**, v. 14, n. 4, p. 601-604, 1978.

COSBY, B. J. *et al*. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. **Water resources research**, v. 20, n. 6, p. 682-690, 1984.

DA ROCHA, H. R. *et al*. AM e Silva Figueira. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia, **Ecol. Appl**, v. 14, n. 4, 2004.

DA ROSA DORNELES, Keilor *et al.* Respostas morfofisiológicas e rendimento de grãos do trigo mediados pelo aumento da concentração de CO_2 atmosférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 1, p. 1-7, 2019.

DAS CHAGAS, Glayson F.B. *et al*. Impactos da redução da pluviometria na biomassa aérea da Floresta Amazônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 72-79, 2012.

DE SOUZA, Everaldo Barreiros *et al*. Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, 2017.

DOUGHTY, Christopher E. *et al*. Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in

Amazonia. **Nature**, v. 519, n. 7541, p. 78-82, 2015.

ESPÍRITO-SANTO, Fernando Del Bon *et al*. Análise da composição florística e fitossociológica da floresta nacional do Tapajós com o apoio geográfico de imagens de satélites. **Acta Amazonica**, v. 35, p. 155-173, 2005.

FARQUHAR, Graham D., VON CAEMMERER, S. von, BERRY, Joseph A. A biochemical model of photosynthetic CO_2 assimilation in leaves of C 3 species. **planta**, v. 149, p. 78-90, 1980.

FELSEMBURGH, Cristina Aledi. Respostas fotossintéticas à variação da temperatura foliar do dossel na flona do Tapajós-PA. 2009. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FICKLIN, Darren L., Novick, Kimberly A. Historic and projected changes in vapor pressure deficit suggest a continental-scale drying of the United States atmosphere. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 4, p. 2061-2079, 2017.

FIELD, Christopher B., Jackson, Robert B., Mooney, Harold A. Stomatal responses to increased CO_2: implications from the plant to the global scale. **Plant, Cell & Environment**, v. 18, n. 10, p. 1214-1225, 1995.

FITTER, Alastair H., HAY, Robert KM. **Environmental physiology of plants**. Academic press, 2012.

FRANKLIN, Jerry F. Ecosystem responses to the eruption of Mount St. Helens. **National Geographic Research**, v. 1, p. 198-216, 1985.

GATTI, Edoardo, Rossi, Federica. Daily and seasonal trends of gas exchange in Pistacia lentiscus L. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 32, p. 809-813, 2010.

HAWKINS, Ed *et al*. Estimating changes in global temperature since the preindustrial period. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 9, p. 1841-1856, 2017.

ISLAM, H. *et al*. Propulsion power prediction for an inland container vessel in open and restricted channel from model and full-scale simulations. **Ocean Engineering**, v. 229, p. 108621, 2021.

KOOPERMAN, Gabriel J. *et al*. Forest response to rising CO_2 drives zonally asymmetric rainfall change over tropical land. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 5, p. 434-440, 2018.

LEAKEY, Andrew D.B. *et al*. Elevated CO_2 effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. **Journal of experimental botany**, v. 60, n. 10, p. 2859-2876, 2009.

LEUNING, Ray. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C3 plants. **Plant, Cell & Environment**, v. 18, n. 4, p. 339-355, 1995.

LIBERATO, A. M., Brito, J. I. B. Influência de mudanças climáticas no balanço hídrico da Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 3, n. 3, p. 170-180, 2010.

LLOYD, Jon, Farquhar, Graham D. Effects of rising temperatures and [CO_2] on the physiology of tropical forest trees. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological**

Sciences, v. 363, n. 1498, p. 1811-1817, 2008.

LONGO, Marcos *et al.* Aboveground biomass variability across intact and degraded forests in the Brazilian Amazon. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 30, n. 11, p. 1639-1660, 2016.

LONGO, Marcos *et al*. The biophysics, ecology, and biogeochemistry of functionally diverse, vertically and horizontally heterogeneous ecosystems: The Ecosystem Demography model, version 2.2–Part 1: Model description. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 10, p. 4309-4346, 2019.

LYRA, A. de A., Chou, Sin Chan, Sampaio, Gilvan de Oliveira. Sensitivity of the Amazon biome to high resolution climate change projections. **Acta Amazonica**, v. 46, p. 175-188, 2016.

MCDOWELL, Nathan G. Mechanisms linking drought, hydraulics, carbon metabolism, and vegetation mortality. **Plant physiology**, v. 155, n. 3, p. 1051-1059, 2011.

MOORCROFT, Paul R., Hurtt, George C., Pacala, Stephen W. A method for scaling vegetation dynamics: the ecosystem demography model (ED). **Ecological monographs**, v. 71, n. 4, p. 557-586, 2001.

MORGAN, J. A. *et al*. Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO_2. **Oecologia**, v. 140, p. 11-25, 2004.

MULLER, Sandra Cristina. Padrões de espécies e tipos funcionais de plantas lenhosas em bordas de floresta e campo sob influência do fogo. 2005.

NEPSTAD, D. C. *et al*. The effects of partial throughfall exclusion on canopy processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon forest. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. D20, p. LBA 53-1-LBA 53-18, 2002.

NEPSTAD, D. C., Moutinho, P. R., Brando, P. M. LBA-ECO CD-05 Soil VWC and Meteorology, Rainfall Exclusion, Tapajos National Forest. ORNL DAAC, 2013.

NETO, Alírio Tenório Furtado *et al*. Influência da umidade no efluxo de CO_2 do solo para atmosfera em uma área de floresta primária, Belterra, PA. **Ciência e Natura**, p. 34-37, 2013.

NOBRE, Carlos A., Sampaio, Gilvan, Salazar, Luis. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura,** v. 59, n. 3, p. 22-27, 2007.

NORBY, Richard J. *et al*. Forest response to elevated CO_2 is conserved across a broad range of productivity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 102, n. 50, p. 18052-18056, 2005.

NÖSBERGER, Josef *et al*. Managed ecosystems and CO_2: case studies, processes, and perspectives. **Springer Science & Business Media**, 2006.

PAIVA, Auricleia S. *et al*. Stomatal conductance in leaves of bean plants submitted to different irrigation regimes. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 161-169, 2005.

PARROTTA, John A. *et al*. Trees of the Tapajós: a photographic field guide. Trees of the Tapajós: **A photographic field guide**., n. 1, 1995.

PIAO, Shilong *et al*. Spatiotemporal patterns of terrestrial carbon cycle during the 20th century. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 23, n. 4, 2009.

POWELL, Thomas L. *et al*. Confronting model predictions of carbon fluxes with measurements of Amazon forests subjected to experimental drought. **New Phytologist**, v. 200, n. 2, p. 350-365, 2013.

RESTREPO-COUPE, Natalia *et al*. Do dynamic global vegetation models capture the seasonality of carbon fluxes in the Amazon basin? A data-model intercomparison. **Global change biology**, v. 23, n. 1, p. 191-208, 2017.

RESTREPO-COUPE, Natalia *et al*. What drives the seasonality of photosynthesis across the Amazon basin? A cross-site analysis of eddy flux tower measurements from the Brasil flux network. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 182, p. 128-144, 2013.

RODEN, John S., Ball, Marilyn C. The effect of elevated [CO_2] on growth and photosynthesis of two eucalyptus species exposed to high temperatures and water deficits. **Plant Physiology**, v. 111, n. 3, p. 909-919, 1996.

ROWLAND, Lucy *et al*. Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. **Nature**, v. 528, n. 7580, p. 119-122, 2015.

SALESKA, Scott *et al*. Ecosystem carbon fluxes and Amazonian forest metabolism. **Amazonia and global change**, v. 186, p. 389-407, 2009.

SAMPAIO, Gilvan *et al*. CO_2physiological effect can cause rainfall decrease as strong as large-scale deforestation in the Amazon. **Biogeosciences**, v. 18, n. 8, p. 2511-2525, 2021.

SELLERS, P. J. *et al*. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. **Journal of climate**, v. 9, n. 4, p. 676-705, 1996.

SILVA, Fabrício Brito. Modelagem da produtividade primária bruta na Amazônia. 2013. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado em Sensoriamento Remoto–Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, São Paulo.

SILVEIRA, C. da S., SOUZA F., Francisco de Assis de, Cabral, Samuellson Lopes. Análise das Projeções de Precipitação do IPCC-AR4 para os Cenários A1B, A2 e B1 para o Século XXI para Nordeste Setentrional do Brasil. 2013.

YANG, Z.-L. *et al.* Preliminary study of spin-up processes in land surface models with the first stage data of Project for Intercomparison of Land Surface Parameterization Schemes Phase 1 (a). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 100, n. D8, p. 16553-16578, 1995.

ZANDALINAS, Sara I., Fritschi, Felix B., Mittler, Ron. Global warming, climate change, and environmental pollution: recipe for a multifactorial stress combination disaster. **Trends in Plant Science**, v. 26, n. 6, p. 588-599, 2021.