



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

CLARA QUADROS DO AMARAL

**MUDANÇAS DA VEGETAÇÃO DO BRASIL NO ÚLTIMO MÁXIMO
GLACIAL**

Prof. Dr. HENDERSON SILVA WANDERLEY
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
MARÇO – 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

CLARA QUADROS DO AMARAL

**MUDANÇAS DA VEGETAÇÃO DO BRASIL NO ÚLTIMO MÁXIMO
GLACIAL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. HENDERSON SILVA WANDERLEY
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
MARÇO – 2023

**MUDANÇAS DA VEGETAÇÃO DO BRASIL NO ÚLTIMO MÁXIMO
GLACIAL**

APROVADA EM: 02/03/2023

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Henderson Silva Wanderley – UFRRJ
Orientador

Prof.^a Dr.^a Gilmara Pires de Moura Palermo – UFRRJ
Membro

Prof. Dr. Rafael Coll Delgado – UFRRJ
Membro

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Elair, por sempre me incentivar nos meus projetos e ideias. À minha irmã Gabriela, por ser minha melhor amiga e me apoiar incondicionalmente. À minha irmã Érica por me fornecer orientação e um exemplo a seguir.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Henderson, pela orientação paciente e sem a qual esse trabalho não teria sido possível.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e seu corpo docente, por terem me fornecido um ambiente de aprendizado e crescimento pessoal e profissional.

Aos meus colegas de curso por terem compartilhado tantos momentos de vitórias e dificuldades comigo durante toda a graduação.

Aos meus amigos que sempre torceram por mim e entenderam minhas ausências.

RESUMO

O Último Máximo Glacial representa o fim da última glaciação e é marcado pela redução na temperatura média de todo o globo, em comparação as médias atuais. Nesse período, as flutuações climáticas causaram mudanças na vegetação, que resultaram na diversificação biológica dos biomas. No entanto, existem divergências de hipóteses para a diversificação dos biomas nos Neotrópicos. A hipótese dos refúgios afirma que a floresta Amazônica foi fragmentada durante os períodos glaciais. Todavia, diversos estudos refutam essa hipótese, afirmando que a floresta Amazônica se manteve intacta. Porém esses estudos geralmente se focam em fatores climáticos, ignorando as possíveis interações entre fatores climáticos com fatores como dióxido de carbono (CO₂) atmosférico e fogo. Dessa forma, a real influência da redução no nível de CO₂ atmosférico e da ocorrência de incêndios florestais na mudança da vegetação ainda permanece escasso. Frente a isso, o presente estudo tem como objetivo analisar as mudanças da vegetação do Brasil no último máximo glacial. Para tanto, foi utilizada como metodologia a simulação de reconstruções da cobertura da vegetação para o período do Último Máximo Glacial (UMG) em comparação ao cenário controle do período Pré-industrial (~1850-1943). As simulações de mudança da vegetação foram realizadas com o modelo MIROC3.2. Foram avaliados quatro cenários de reconstrução da vegetação dos biomas brasileiros, para o período pré-industrial e para o UMG, com mudança da variação da concentração atmosférica de CO₂ e a existência de incêndios florestais para a floresta tropical e temperada. Os resultados mostraram alteração da vegetação, sobretudo para a redução das florestas tropicais, com árvores de grandes portes, as quais foram substituídas por florestas menos adensadas, com dossel aberto ou regiões com vegetação rasteira ou até mesmo desérticas. A mudança na concentração do CO₂ e a ocorrência de incêndios florestais podem acelerar o processo de degradação da vegetação dos biomas brasileiros.

Palavras-chave: Floresta tropical; Biomas; Mudanças climáticas

ABSTRACT

The Last Glacial Maximum represents the end of the last glaciation and is marked by a reduction in average temperature across the globe compared to current averages. During this period, climate fluctuations caused changes in vegetation, which resulted in the biological diversification of biomes. However, there are diverging hypotheses for the diversification of biomes in the Neotropics. The refugia hypothesis states that the Amazon forest was fragmented during glacial periods. However, several studies refute this hypothesis, stating that the Amazon forest has remained intact. But these studies generally focus on climatic factors, ignoring possible interactions between climatic factors and factors such as atmospheric carbon dioxide (CO₂) and fire. Thus, the actual influence of the reduction in the level of atmospheric CO₂ and the occurrence of forest fires on vegetation change still remains scarce. In view of this, the present study aims to analyze the changes in vegetation in Brazil during the last glacial maximum. For this purpose, we used as methodology the simulation of vegetation cover reconstructions for the Last Glacial Maximum (UMG) period in comparison to the control scenario of the Preindustrial period (~1850-1943). The simulations of vegetation change were performed with the MIROC3.2 model. Four vegetation reconstruction scenarios of the Brazilian biomes were evaluated for the pre-industrial period and the UMG, with a change in the variation of atmospheric CO₂ concentration and the existence of forest fires for tropical and temperate rainforest. The results showed vegetation change, especially for the reduction of tropical forests with large trees, which were replaced by less dense forests with open canopy or regions with low vegetation or even desert. The change in CO₂ concentration and the occurrence of forest fires can accelerate the process of degradation of vegetation in Brazilian biomes.

Keywords: Tropical forest; Biomes; Climate change

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	1
2.1 Biomas Brasileiros.....	1
2.2 Queimadas/Incêndios florestais no Brasil.....	3
2.3 Concentração De Dióxido De Carbono	4
2.4 Paleoclimatologia.....	7
2.5 Último Máximo Glacial	9
2.5 Mudanças na Vegetação no Último Máximo Glacial.....	11
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	13
3.1. Área de Estudo.....	14
3.2 Dados Utilizados.....	14
3.3 Modelo Usado.....	14
3.3.1 Modelo de Interação Vegetação Terrestre	14
3.3.2 Modelo de incêndio da vegetação.....	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
5. CONCLUSÃO.....	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos tem se observado drásticas mudanças na temperatura global, originadas pelas alterações nas concentrações de gases de efeito estufa (GEE), dentre eles o de maior concentração que é o CO₂. A maior concentração dos GEE na atmosfera permite que se tenha uma maior retenção da radiação infravermelha e conseqüente aumento da temperatura na troposfera. Nesse contexto um ponto que merece ser tratado é o denominado “Último Máximo Glacial – UMG”, referente ao evento observado durante a Era Glacial, no qual, houve uma considerável diminuição da temperatura global, que variam em escalas espaciais e temporais. Tais mudanças ocorrem por fatores internos como vulcanismo e externos como ciclos solares (FLATO et al., 2013).

O “Último Máximo Glacial” representa o fim da última glaciação e é marcado pela redução de -6,1°C na temperatura média de todo o globo, em comparação as médias atuais. Nesse período na América do Sul, se teve um avanço de geleiras no sul próximo a Cordilheira dos Andes, diminuição da umidade e áreas florestadas e redução da temperatura (TIERNEY et al., 2020). É relevante ressaltar que há divergências quanto a distribuição da vegetação no UMG, pois as diferentes zonas climáticas causam mudanças na vegetação, variando entre uma expansão da vegetação sazonal e a estabilidade nas áreas centrais de cada bioma, de acordo com a alternância entre climas seco e quente e frio e úmido. Esta percepção só foi tida na segunda metade do século XX com estudos geomorfológicos e palinológicos.

A partir de então foi verificado que momentos glaciais podem ser frios e secos e ainda momentos interglaciais que se apresentam quentes e úmidos, proporcionando assim mudanças na cobertura das vegetações. Observa-se assim que as vegetações resultam da interação entre os fatores ambientais, tais como a geologia, o clima e o solo, sofrendo alterações em virtude de mudanças ambientais (ARRUDA, et. al, 2017). Porém, a interação entre fatores climáticos e não climáticos, como CO₂ atmosférico e fogo, também tem potencial de influenciar nas mudanças da vegetação (SATO et al, 2021). Dessa forma, se torna importante que estudos de reconstrução da vegetação, levem em conta a influência desses fatores.

Sendo assim, o presente estudo pretende analisar as mudanças da vegetação do Brasil no Último Máximo Glacial. Para tal efeito, objetiva-se comparar cenários de nível de CO₂ atmosférico e fogo no Último Máximo Glacial (UMG) e o no período Pré-Industrial (PI). Para tanto, foram simuladas reconstruções da cobertura vegetal de biomas do Brasil, através do uso do Modelo para a Investigação Interdisciplinar sobre o Clima (MIROC3.2).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Biomas Brasileiros

O Brasil possui seis biomas, com vegetações e características próprias, são eles: Pampa, Mata Atlântica, Pantanal, Caatinga, Cerrado e Amazônia. Na Figura 1, pode ser observada a divisão dos biomas no território nacional conforme trata o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).



Figura 1 - Biomas Brasileiros

Fonte: IBGE (2019)

O bioma cerrado corresponde a 23,3% da área territorial nacional, sua formação mais expressiva são as savanânicas que ocupam 65% de toda a área do Cerrado. Quanto a classificação climática há predominância do clima tropical úmido, com subtipo clima de savana, com invernos secos e chuvas máximas de verão. Uma pequena parcela possui clima temperado quente, com inverno seco. Nos meses de maio a setembro se tem o período mais seco, e nos demais meses possui maior frequência de chuva. O cerrado pode ser encontrado nos estados de Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais, Paraná, Rondônia, Maranhão, São Paulo, Bahia, Tocantins, Piauí e no Distrito Federal (ALBUQUERQUE E SILVA, 2008).

O bioma Amazônia ocupa 49,5% da extensão territorial brasileira. Possui vegetação de diferentes tipos, sendo que metade da vegetação é floresta ombrófila densa, seguida da floresta ombrófila aberta. O clima é equatorial úmido, com pluviosidade elevada e presença de planícies constantemente alagadas, com precipitação média anual de aproximadamente 2.300 mm/ano. O bioma Amazônia apresenta ainda a bacia Amazônica que além do território brasileiro possui parte no Peru, Guiana Francesa, Guiana, Suriname, Equador, Colômbia, Bolívia e Venezuela (MORAES, 2008).

A Caatinga representa 9,9% da área do Brasil. O clima é predominantemente semiárido, com baixa umidade relativa, baixo volume pluviométrico e duração da estação seca longa. Caracteriza-se por uma vegetação xerófila composta por plantas decíduas e espinhosas, espécies suculentas e com porte de arbóreo a arbustivo. Há a presença de cactáceas e bromeliáceas. A variação na fisionomia da vegetação é influenciada pelo regime de chuvas e tipo de solo (MORAES, 2008).

O pantanal possui o menor espaço territorial, representando 1,8% do país. Sua principal vegetação é tipo savana, estando compreendida em parte da região Centro-Oeste do Brasil, nos estados do Mato Grosso e do Mato Grosso do Sul, próxima às fronteiras com a Bolívia e o

Paraguai. Possui estações de verão e inverno bem definidas, com verão com altos valores pluviométricos e o inverno com um período seco. Nos meses mais chuvosos constitui uma grande área inundada (PEREIRA, CHÁVEZ E SILVA, 2012).

A Mata Atlântica é o terceiro maior bioma do Brasil e ocupa 13% do território nacional, sendo composta em sua maioria por floresta estacional semidecidual. Constituiu-se de mata, em sua maioria, ao longo da costa litorânea que vai do Rio Grande do Norte ao Rio Grande do Sul, passando pelos territórios dos estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro e Santa Catarina, e parte do território do estado de Alagoas, Bahia, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraíba, Paraná, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, São Paulo e Sergipe. Possui regiões com clima tropical e subtropical úmido não possuindo apenas um clima predominante. Possui frequência de chuvas em todas as regiões (MORAES, 2008). Possui grande biodiversidade em virtude de sua amplitude térmica e diferentes pluviosidades.

O Pampa é o segundo menor bioma representando 2,1% do território do Brasil. É composto por formações campestres e florestais. Possui um clima predominante subtropical úmido, com períodos chuvosos e estações bem definidas, apresenta temperaturas baixas durante o inverno. O clima temperado, com temperaturas médias entre 13 °C e 17 °C, garante ao bioma características únicas, com grande presença de campos de gramíneas, com cerca de 450 espécies de capins, gramas ou relvas, florestas nas margens dos rios, arbustos, leguminosas, bromélias e até mesmo cactos (MORAES, 2008). Estende-se em uma área total de 700 mil quilômetros quadrados, pelo Brasil, Argentina e Uruguai.

2.2 Queimadas/Incêndios florestais no Brasil

O aumento do desmatamento e a ocorrência de fogo nos biomas brasileiros, que era considerada rara, tornou-se mais frequente. A combustão da matéria orgânica libera o dióxido de carbono, o principal gás de efeito estufa. A queima de biomassa afeta a floresta a nível local e também o ciclo do carbono, influenciando as mudanças no clima (ARAGÃO et al., 2016).

O fogo resulta da reação química de oxidação, com a combinação entre oxigênio, combustíveis e uma fonte de calor. A reação química libera luz e calor devido à combustão de materiais diversos. A queimada é caracterizada pela utilização do fogo na vegetação de forma controlada, em que, pelas condições ambientais, o fogo fica retido em uma determinada área e assim se possibilita o manejo de acordo com o objetivo desejado. Quando não se tem o controle do fogo há o incêndio. O incêndio florestal pode ser conceituado como a incidência do fogo de forma natural ou antrópica, podendo ocorrer de forma acidental e inesperada. Incêndio florestal é todo fogo de livre propagação sob influência de clima, relevo e vegetação (FONSECA; RIBEIRO, 2003).

Para Carvalho (2019) focos de calor “são temperaturas captadas por sensores dos satélites de monitoramento”. A Queima Controlada “é o emprego do fogo como fator de produção e manejo em atividades agropecuárias ou florestais em áreas com limites físicos previamente definidos e realizado de forma planejada e controlada” (CARVALHO, 2019).

A propagação do fogo decorre de elementos relativos à combustão, que sofrem variações a depender das condições climáticas, topografia e dos aspectos físicos do combustível. Para a combustão ocorrer é preciso de 3 elementos fundamentais, são eles: combustível, oxigênio e calor. Um combustível para queimar, o oxigênio para preservar as chamas e calor para começar e dar continuidade à queima, ao que se denomina de “Triângulo do Fogo” (MOTTA, 2008). O processo de desenvolvimento da queima se dá através de 4 fases, são elas: ignição, brasas, chamas e extinção. Cada uma das fases tem intensidade e gravidade variadas de acordo com as condições climáticas, aspectos físicos do combustível e origem da ignição (FERGUSON et al., 2000).

No ecossistema são inúmeros os impactos ambientais dos incêndios, dentre eles a mudança no comportamento das chuvas e do clima em todo o planeta. Considerando que a floresta amazônica, possui a maior biodiversidade do planeta e que, ao levar umidade para a América do Sul, contribui para que se estabilize o clima global e o regime de chuvas da região, controlar a ocorrência de queimadas pode ser uma estratégia eficiente para a redução das emissões de carbono (DOUGHTY et al., 2015). Portanto, a floresta abastece a atmosfera com o vapor que forma as nuvens e mantém as chuvas. Sendo assim, pode-se dizer que quem faz a irrigação dos plantios é a floresta amazônica e que com o desmatamento e as queimadas afetam-se o ciclo hidrológico e o transporte de umidade fornecido pela floresta para regiões agrícolas do Brasil, com a supressão de chuvas (ARAGÃO et al., 2016).

Além disso, durante os meses entre julho e novembro, acontece o período da estação seca, quando há o predomínio das emissões de origem antropogênica através das queimadas, causando a supressão de precipitação e modificações na microfísica das nuvens, dessa forma afetando o balanço de radiação na superfície (PAULIQUEVIS et al., 2007). Diante do impacto causado pelo desmatamento na natureza e, frente a importância do uso sustentável da floresta, se buscam por alternativas para a melhora na utilização dos serviços ambientais.

No tempo seco comum no inverno, as zonas de florestas do país tornam-se mais suscetíveis a incêndios, porém nota-se que a ações majoritariamente partem de atitudes predatórias de fazendeiros, em busca de expansão das áreas de pastagem para as plantações de soja. O Estado do Pará é um dos estados com municípios na lista dos mais queimados, com a presença do cultivo de soja e milho e da pecuária com a pastagem de gado (MOTTA, 2008).

No mês de setembro do ano de 2022 5.825.520 hectares foram atingidos por incêndios florestais, sendo o cerrado o bioma mais atingido com 2.973.443 hectares perdidos, já na Amazônia observou-se 71% a mais de área queimada em relação a setembro do ano anterior, de acordo com Alencar, coordenadora do Mapbiomas Fogo. Ao todo até o mês de setembro do ano de 2022, 11.749.938 hectares foram queimados no país.

Entre os anos de 2016 e 2021 a região Amazônica foi a mais atingida pelos incêndios, sendo o bioma que sofreu 47,1% das queimadas somando 518.997, seguido pelo Cerrado com 31,8% e a Mata Atlântica com 8,9%. O Estado do Pará é o mais atingido no número de queimadas, com cerca de 191 mil ocorrências, sendo 16,3% do total de focos de incêndio no país, seguida pelo Mato Grosso do Sul que corresponde a 11,1% das queimadas e do Maranhão com 9,8%. No que se refere a perdas humanas em virtude das queimadas e incêndios florestais, no período de 2016 a 2021 houve 12 mortos, 17 feridos e 4,7 mil pessoas desalojadas (CNM, 2021).

Dados divulgados pela Confederação Nacional de Municípios (CNM) com base nos dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) e Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), do ano de 2021 apontam que as queimadas e os incêndios florestais no Brasil, além das perdas humanas e danos ambientais, causaram um prejuízo financeiro superior a R\$ 1,1 bilhão aos cofres públicos do país. Dentre os gastos do governo estão as aquisições de equipamentos voltados a contenção de situações de incêndio.

2.3 Concentração De Dióxido De Carbono

O carbono é um elemento essencial para a vida no planeta Terra, sendo o quarto elemento mais abundante do Universo e estando armazenado nas rochas, oceano, plantas, atmosfera, combustíveis fósseis e solo. O carbono flui entre seus reservatórios, o que se chama de ciclo do carbono (Figura 2).

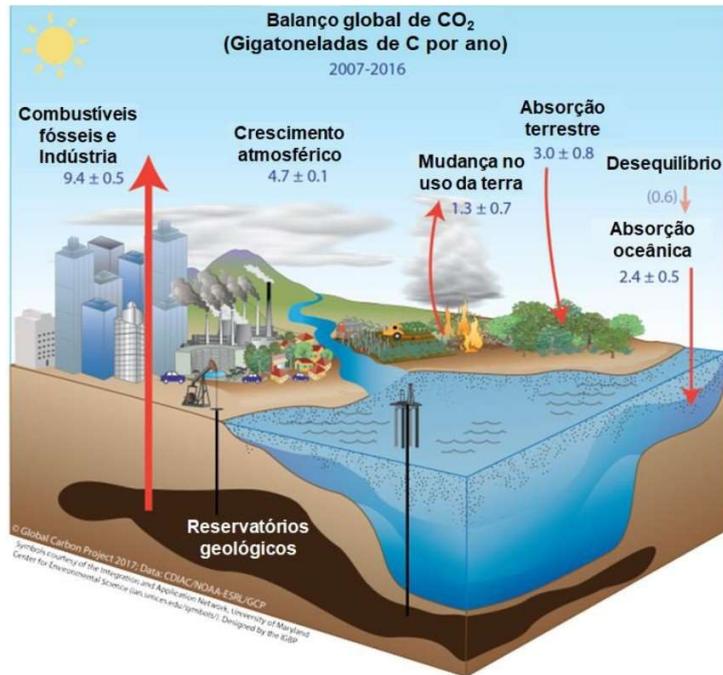


Figura 2 - Ciclos de Carbono
Fonte: Quéré et al. (2017).

Quando ocorrem alterações no processo do ciclo de carbono, como com o aumento de concentração em alguns reservatórios e redução em outros, há danos ao equilíbrio, gerando por exemplo o aumento da temperatura do planeta (RIEBEEK, 2011). Dentre suas formas encontradas estão o carbono, monóxido de carbono e dióxido de carbono, sendo o último o mais abundante, e podem ser encontrados em três estados físicos: sólido, líquido e gasoso, estando na atmosfera terrestre como CO₂ e CH₄ (CRISP et al., 2014). A atmosfera é composta pelo vapor d'água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) e ozônio (O₃), e ainda por gases produzidos pelo homem como é o caso dos halocarbonos. Tais gases formam a camada gasosa que envolve o planeta Terra, sendo fundamental para a sobrevivência de todos os seres vivos. O CO₂ na atmosfera desempenha papel no controle da temperatura do planeta. Em um estudo desenvolvido pelo Observatório Mauna Loa, no Havaí desde 1958 avalia-se a mudança nas concentrações de CO₂, as medições são apresentadas na Curva de Keeling, conforme pode ser visto na Figura 3.

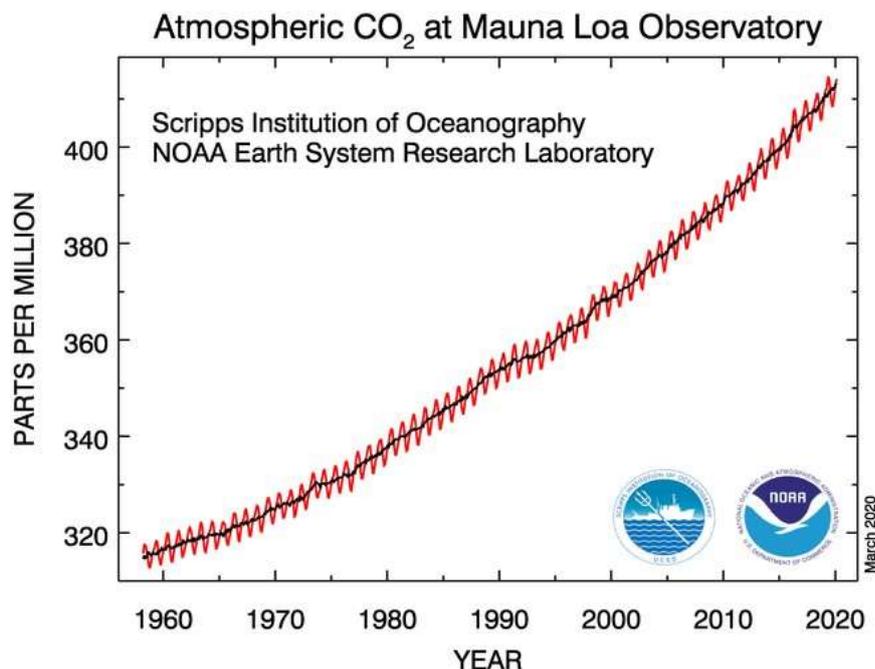


Figura 3: Variações na concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera da Terra
Fonte: NOAA (2020).

Ao longo dos anos as concentrações do gás CO₂ estão aumentando. Há uma ligação entre as mudanças climáticas globais e a emissão de CO₂, que é impulsionadora do efeito estufa. A concentração de dióxido de carbono na atmosfera, aumentou em quase 100 ppm no período de degelo, passando de 180 ppm para 280 ppm, contribuindo para o aquecimento.

Conforme Alves (2021) nos 800 mil anos antes da revolução industrial, a concentração de CO₂ na atmosfera era inferior a 280 ppm. Em 1860 a concentração atingiu 290 ppm, tendo como base as medições no estudo do gelo. Já em 1900 estava em 295 ppm, chegando a 300 ppm em 1920 e atingindo 310 ppm em 1950, momento em que, em virtude do efeito estufa, o aumento se acelerou.

O CO₂ pode ser oriundo ainda do degelo do permafrost, processo que retira grandes quantidades de carbono aprisionado no gelo durante a glaciação. Os permafrost retêm mais carbono que a vegetação e os solos. Uma parte pode ser oriunda da oxidação atmosférica do metano, formando o CO₂ e água (FRIEDLINGSTEIN et al., 2006).

As formações vegetais desempenham um papel importante no ciclo global do carbono. Estudos desenvolvidos na região amazônica demonstram que o acúmulo de carbono pela vegetação mostra-se proporcional a quantidade de biomassa, que, por sua vez, relaciona-se proporcionalmente à idade da vegetação (FEARNSIDE; GUIMARÃES, 1996). O estoque de carbono na vegetação terrestre aumenta ou diminui a depender da resposta do clima ou intervenções humanas, possuindo efeitos fortes e imediatos na concentração de carbono na atmosfera (FRIEDLINGSTEIN et al., 2006).

Além disso, o estoque de carbono disponível nos continentes depende do balanço entre o ganho de carbono através da produção primária líquida- NPP e a perda através de taxa de respiração heterotrófica- RH (LAPOLA, 2007). A quantidade de carbono presente no solo está relacionada a fatores ligados ao clima, material de origem, vegetação, relevo e biota. No que se refere ao clima, a temperatura, precipitação e evapotranspiração afetam o acúmulo de carbono no solo. Com o aumento da temperatura e da evapotranspiração há a redução da quantidade de carbono no solo. Já no caso de menor temperatura e maior precipitação se tem um aumento de carbono no solo. (DINAKARAN ET AL., 2014). A temperatura influencia na adsorção e

destruição da matéria orgânica, a precipitação e a drenagem do solo regulam a disponibilidade de oxigênio para o processo de decomposição da matéria orgânica. O clima interfere ainda na vegetação, no desenvolvimento das plantas e nos resíduos que importam na disponibilização do carbono ao solo (DINAKARAN et al., 2014). A vegetação e o seu tipo influenciam no carbono no solo, pois a maior parte do carbono vem dos resíduos vegetais, além de influenciar na agregação e estabilidade do solo.

O relevo é outro fator de importância no que se refere a quantidade de carbono retido no solo, pois regiões de altas altitudes tendem a apresentar uma menor temperatura e uma precipitação mais elevada, levando a um acúmulo de carbono no solo (DAI; HUANG, 2006).

O uso que é dado ao solo também influencia no ciclo do carbono, pois altera a capacidade do solo em proteger o carbono e a entrada de carbono que esse solo recebe. Em áreas de preparo mecanizado há uma redução de concentração de carbono pois ocorre a quebra de agregados do solo. Ainda, a presença do carbono tende a diminuir dos solos jovens para solos mais antigos, conforme Dinakaran et al., (2014)

De acordo com a análise de Albaladejo et al. (2013) há influência do processo de formação no solo na concentração de carbono, neossolos flúvicos possuem menor concentração de carbono na superfície e maiores valores em maiores profundidades, o que se deve ao processo de formação desse solo que se deu a partir de sedimentos aluviais e diversos tipos de materiais.

A densidade do solo interfere no estoque de carbono, variando por influência de fatores naturais e antrópicos. Os fatores antrópicos referem-se ao uso da terra e o manejo adotado. Os fatores naturais referem-se ao tipo de solo, textura, agregação, fauna do solo, temperatura, conteúdo de argila e vegetação.

2.4 Paleoclimatologia

Paleoclimatologia é a ciência que estuda as variações climáticas ao longo da história da Terra. Para tanto, utiliza-se a análise e interpretação dos vestígios naturais, que são capazes de descrever o clima em períodos passados.

Para Cuadrat e Pita (1997, p. 395) a paleoclimatologia pode ser compreendida como sendo “a ciência que se ocupa do estudo e reconstrução dos climas do passado, tentando identificar as tendências naturais das mudanças climáticas em um longo período de tempo”.

Para a interpretação das condições climáticas do passado são utilizados os dados proxies, que preservam as características do ambiente ao longo das décadas. Através dos dados proxies pode-se preservar as características físicas do meio ambiente e por isso se pode definir os eventos climáticos que ocorreram em períodos compreendidos em milhares de anos e em diferentes locais.

Segundo o National Oceanic And Atmospheric Administration - NOAA (2015), os dados proxies podem ser encontrados de diferentes formas, dentre elas:

- Corais: tem seus esqueletos rígidos construídos a partir de carbonato de cálcio, um mineral extraído da água do mar. Pelos isótopos de oxigênio que compõem o carbonato, pode-se determinar a temperatura da água em que o coral cresceu.
- Grãos de pólen: podem identificar o tipo de planta e de qual local vieram. Ficam preservados em camadas de sedimentos no fundo de uma lagoa, lago ou oceano. Na análise das camadas pode se obter os tipos de plantas que estavam crescendo no momento em que o sedimento foi depositado.
- Anéis de árvore: as variações do clima refletem nas larguras destes anéis, composição isotópica e na densidade. Nos anéis é possível obter registros anuais de clima durante séculos e até milênios.

- Calotas polares, alto das montanhas e núcleos de gelo: são perfuradas camadas profundas para recolher as amostras, para obter bolhas de poeira, ar, e isótopos de oxigênio.

- Sedimentos oceânicos: incluem minúsculos fósseis e produtos químicos.

O NOAA possui registrado em seu banco de dados as descobertas científicas, informações que são de grande importância para que se possa identificar as causas das alterações ocorridas no clima da Terra durante as últimas décadas e estabelecer cenários climáticos futuros (ARRUDA e SCHAEFER, 2020).

Por muitos anos as discussões sobre mudanças climáticas estavam restritas aos registros geológicos do Hemisfério Norte, sendo que somente nas últimas duas décadas começou-se as discussões sobre as modificações de pluviosidade no que se refere a América do Sul.

A última época do Quaternário é o Holoceno¹ e suas mudanças paleoclimáticas relacionam-se com os componentes bióticos e abióticos e ainda com a distribuição da fauna e da flora (MORAES et. al., 2018).

Pesquisadores da Universidade de São Paulo, Observatório Nacional e Universidade Federal da Bahia em colaboração com o Institute Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération, desde 1974 estudam as flutuações do nível marinho. As oscilações do nível marinho foram de fundamental importância na evolução das planícies costeiras brasileiras, como por exemplo as formações quaternárias do Estado de São Paulo e sul do Rio de Janeiro (ARRUDA e SCHAEFER, 2020).

Estudos de espeleotemas ou depósitos carbonáticos de cavernas demonstraram as variações que as insolações de verão produziram no regime de chuvas tropicais e extratropicais, no período do Quaternário tardio (CRUZ, 2011).

O Brasil é um dos países com maior potencial para tais estudos isotópicos. Primeiro, por que possui cavernas geograficamente bem distribuídas em grande amplitude latitudinal. Segundo, porque resultados de estudos preliminares demonstraram, de forma inédita, como variações de insolação, devido aos mecanismos de precessão (ciclos de ~ 23 mil anos) e obliquidade (ciclos de ~ 40 mil anos), produzem mudanças no regime de chuvas e temperatura no sul-sudeste do Brasil, durante o quaternário tardio. (CRUZ, 2011, p.123).

Ao longo dos anos são esperadas mudanças profundas e variáveis no clima de acordo com a região de cada país. Os primeiros estudos realizados no Brasil referem-se as mudanças na vegetação e no nível de lagos. Na Bacia Hidrográfica do Rio Amazonas se obtiveram primeiras evidências do impacto de mudanças associadas a paleovegetação, sedimentologia e geoquímica (MORAES, et. al., 2018). O aquecimento global, tema que vem ganhando cada vez mais força, influencia o comportamento humano e acaba sendo influenciado por este comportamento. Suguio (2008) cita que o clima na Terra tem variado com períodos frios e períodos quentes, dentre as causas que levam as mudanças na temperatura estão os impactos de meteoros, atividade solar, ciclos de carbono, perturbações na órbita da Terra, composição da atmosfera e, ainda, há a influência da ação humana. “O prognóstico confiável de mudanças climáticas, por influência de atividades antrópicas (do homem) futuras, é praticamente impossível sem um conhecimento mais preciso das mudanças paleoclimáticas naturais, ocorridas nas últimas dezenas a centenas de milhares de anos” (SUGUIO, 2008, p.9)

O aquecimento global é uma realidade e nos últimos anos ocorreram os climas mais quentes do último milênio. A paleoclimatologia auxilia no entendimento das mudanças

¹ “Idade do homem”, teve seu início no fim da última era glacial ou Idade do Gelo, correspondendo há aproximadamente os últimos 11 mil anos da história da Terra.

climáticas naturais, do que seria uma ação normal ou anormal da natureza, na interpretação dos acontecimentos relacionados ao clima dentro de um determinado contexto histórico e na comparação entre temperaturas modernas e as ocorridas há milênios.

As análises paleoclimáticas referem que as alterações climáticas não se restringem apenas à temperatura, destacando que somente pela reconstrução do clima passado é possível que se faça uma avaliação da magnitude do aquecimento global, permitindo que se tenham prognósticos mais confiáveis de climas do futuro. As alterações nos níveis de dióxido de carbono apresentaram influência nos demais aspectos climáticos (SUGUIO, 2008).

2.5 Último Máximo Glacial

O Último Máximo Glacial refere-se a um período em que enormes geleiras cobriram cerca de metade da América do Norte, Europa, América do Sul e partes da Ásia. As descobertas dos cientistas da Universidade do Arizona- EUA permitiram que se possa entender melhor o clima, os níveis crescentes de dióxido de carbono atmosférico e a temperatura global média (CARVALHO, 2020).

O Último Máximo Glacial ocorreu no período entre 23.000 e 19.000 anos AP (antes do presente). Nesse período a quantidade total de gelo acumulado nos glaciais e nos mantos continentais, apresentou a maior espessura. Com o aumento da camada de gelo havia a diminuição do nível de água dos oceanos e, ao atingir seu maior pico, o mar atingiu a cota mínima, cerca de 120 e 130 metros abaixo do nível atual (CORREA, 2021).

Durante o período de inverno a capa de gelo marinho Antártico se expandia em direção ao norte e no período de verão a capa de gelo apresentava menor extensão. O estreito de Drake, localizado entre a Antártica e a América do Sul não congelava haja vista a existência de uma corrente oceânica fria que impedia que houvesse o congelamento (CORREA, 2021).

Na Figura 3 é possível observar a precipitação do ciclo sazonal do Último Máximo Glacial:

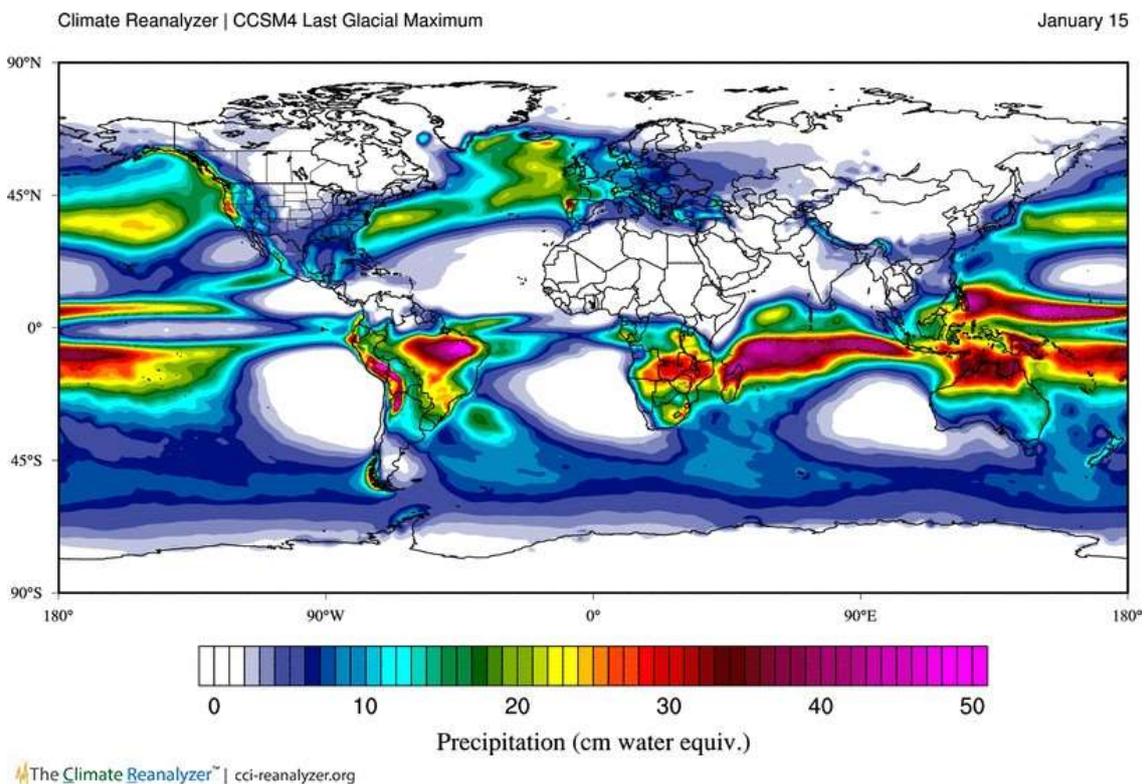


Figura 3: Precipitação do ciclo sazonal do Último Máximo Glacial
Fonte: Brady et al, 2013

A glaciação ocasionou uma mudança paisagística no hemisfério norte, com mantos de gelo e solos congelados em uma extensão de 27 milhões de km², durante os períodos mais frios. Já no hemisfério sul não se observou um importante aumento das áreas continentais cobertas pelo gelo. Na Antártica o volume de gelo durante a Última Glaciação é correspondente ao atual. Nas regiões Andinas e Patagônia e na América do Sul, o volume baixou uns 1.000 m, conforme Colhoun, et al. (1992).

O manto Laurenciano (Figura 4) era o principal manto norte-americano, ocupando uma superfície de 16 milhões de km², com um volume de gelo de 30 milhões de km³. A acumulação de gelo no manto Laurenciano ocorreu na metade oriental, em que a espessura máxima de gelo chegou aos 3.500 m. A Figura 4 apresenta a calota laurenciana.

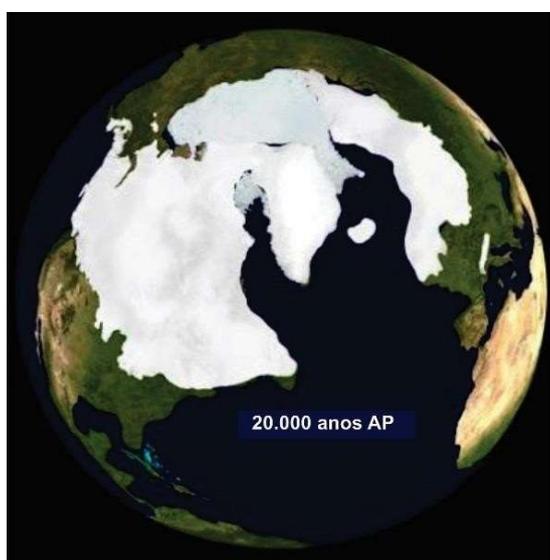


Figura 4: Calota polar Laurentina

Fonte: Disponível em: <https://i.pinimg.com/originals/58/7b/5d/587b5dbb4d62a91cb0c0803e7ca82b01.jpg>. Acesso em 07 de jan. 2023

O manto Finoescandinavo, localizado na Europa, alcançou um volume de uns 7 milhões de km³, cobrindo a Escandinávia e a Finlândia e alcançando uma espessura máxima da calota de gelo de 2.000 m.

Com o frio, originado pela glaciação, se teve um aumento na aridez, o que se deve à desaceleração do ciclo hidrológico. A biomassa terrestre sofreu um grande empobrecimento, que pode ser observada nos estudos com polens, análises de paleosolos e sedimentos glaciais.

Ao longo do continente europeu, desenvolveram-se áreas de permafrost com o desenvolvimento de uma vegetação de tundra, já nas regiões litorâneas do Mediterrâneo a vegetação predominando era estepes. Nas regiões tropicais, a vegetação de grande porte foi substituída por vegetação de menor porte, dando espaço as savanas. Na região amazônica houve um decréscimo de 6°C, gerando a diminuição das precipitações e das áreas de vegetação, aumentando as savanas. A superfície dos oceanos se encontrava mais fria diminuindo o transporte da umidade para o interior dos continentes e conseqüentemente a diminuição das precipitações (CORREA, 2021).

Observou-se que na África tropical houve uma queda térmica de uns 5°C. Florestas presentes no Congo e no Golfo da Guiné tornaram-se savanas, permanecendo apenas poucas

áreas de florestas densas. Na África oriental houve uma redução das precipitações em uns 30% (GASSE et al,1990).

Na região amazônica, nas áreas ocupadas pelo cerrado, savana e paisagem árida da caatinga, tinham-se maiores períodos de precipitação, principalmente em março nas épocas de chuvas. O deserto do Saara possuía maior extensão, durante os períodos mais frios da glaciação. A aridez era maior, o que se relaciona ao maior resfriamento das águas tropicais, menos evaporação e menor aporte de umidade das massas de ar (GASSE et al., 1990).

Durante a glaciação o vento e a erosão eólica são mais intensos nos locais de latitudes altas e médias. Os ventos somados à aridez das regiões e à ausência da cobertura vegetal favoreciam a erosão eólica, gerando um aumento de poeira no ar e repercutindo no resfriamento do clima glacial. Este resfriamento teve repercussão em dois momentos, são eles: diminuição da penetração dos raios solares e aumento da fertilização das águas oceânicas com maior desenvolvimento de fitoplânctons e diminuição de CO₂ atmosférico (CORREA, 2021).

2.5 Mudanças na Vegetação no Último Máximo Glacial

Inúmeros estudos buscam compreender a forma como foram moldadas as paisagens brasileiras nos diferentes climas. Regiões em que se tem um clima úmido não necessariamente o foram no passado, podendo ter inclusive momentos glaciais frios e secos e interglaciais quentes e úmidos (AB'SABER, 2003)

Em um clima mais seco os processos físicos de maior ocorrência são a desintegração mecânica, maior erosão superficial e remoção dos solos em virtude das chuvas torrenciais. Nesse contexto, o solo tende a ser mais rico em nutrientes. O ambiente favorece a ocorrência de fisionomias vegetais mais abertas e sazonais, como caatingas e cerrados, com o aplainamento da paisagem. Em depressões de regiões úmidas podem ser encontrados solos eutróficos, argila de alta atividade e cálcicos, que seriam oriundos de um clima seco do passado (AB'SABER, 2003)

No clima mais úmido, com maior precipitação e temperatura, há o favorecimento de um equilíbrio bioclimático e dos organismos. São ambientes mais favoráveis ao desenvolvimento de extensas florestas. Solos mais profundos, bem desenvolvidos e o clima semiárido seriam vestígios de um clima úmido do passado (ARRUDA et al., 2013).

Durante o clima frio e seco do UMG a floresta foi fragmentada, à essa hipótese se dá o nome de “Refúgios Amazônicos”, conforme proposto por Haffer (1969). A floresta fragmentada foi parcialmente substituída por vegetações abertas do tipo cerrado e caatinga.

Na América do Sul a vegetação subtropical compõem-se de um mosaico de florestas e campos, passando por variações climáticas dos períodos glaciais e, com o clima mais frio e seco durante o UMG, ocorreu o avanço de espécies campestres sobre as florestas subtropicais provocando mudanças nas paisagens (BEHLING, 2002)

Na região Sul era possível ser observada uma extensa vegetação campestre no período anterior e durante o Último Máximo Glacial, o que seria um reflexo das condições climáticas frias e secas e ainda podiam ser observados que pequenas populações de espécies de floresta com araucária e latifoliada sobreviveram em áreas com altitudes mais baixas ou nas úmidas encostas litorâneas (BEHLING et. Al., 2004).

No que se refere a cobertura vegetal da América do Sul se tem duas grandes teorias: a já mencionada Teoria dos Refúgios em que haveria a retração das áreas florestais da Amazônia nos períodos mais frios e secos e áreas de savana com vegetação em maior expansão. E, ainda, a teoria do Arco Pleistocênico com a formação de um arco contínuo de vegetações sazonais, com períodos glaciais, abrangendo a caatinga, o cerrado e o chaco.

Quanto ao Semiárido Brasileiro, atualmente com baixo índice pluviométrico, se tem estudos que indicam a possibilidade de ter sido uma região com condições úmidas até o

Holoceno. Por meio de pólen, carvão e sedimentos terrestres e marinhos observa-se a presença de períodos úmidos na transição entre o UMG e o Holoceno (UTIDA et al., 2020).

Na região Sul era possível ser observada uma extensa vegetação campestre no período anterior e durante o UMG, o que seria um reflexo das condições climáticas frias e secas e ainda podiam ser observados que pequenas populações de espécies de floresta com araucária e latifoliada sobreviveram em áreas com altitudes mais baixas ou nas úmidas encostas litorâneas (BEHLING et al., 2004).

Durante o UMG o clima era frio e seco, mas no Sul do Brasil era ainda mais. Através de reconstruções ambientais foi possível observar que os estados do Paraná e de Santa Catarina e ao sul da região norte do Rio Grande do Sul eram dominados pela vegetação campestre, havendo a condição climática fria e seca. No início do Holoceno, condições climáticas mais quentes e úmidas favoreceram o desenvolvimento da floresta. Ocorreu uma mudança significativa da paisagem passando de uma vegetação campestre para floresta, com o clima moderado e úmido (BEHLING et al., 1997).

Nas regiões subtropicais com condições climáticas mais úmidas observava-se a expansão contínua da Mata Atlântica e desenvolvimento da floresta com araucária. Na região serrana do Rio Grande do Sul com o aumento dos níveis de umidade se teve a primeira expansão da floresta com araucária. (CORDEIRO e LORSCHHEITTER, 1994).

Durante o final do Holoceno ocorreu o início da expansão da floresta com araucária, a Mata Atlântica expandiu-se para as faixas de maior elevação, e a floresta com araucária espalhou-se nas terras altas, formando mosaicos de vegetação (BEHLING et al., 1997).

Nos últimos 1.000 anos houve a incidência de condições climáticas mais úmidas, coincidindo com a máxima expansão da floresta e a uma mudança da vegetação na parte superior da Serra Geral com a transição entre a floresta latifoliada e a floresta com araucária, se tornando a segunda o principal tipo de vegetação nas terras altas (JESKEPIERUSCHKA e BEHLING, 2012).

Na região sudeste nos estados do Espírito Santo, de São Paulo e de Minas Gerais, locais em que hoje se observa floresta perenifólia ou semidecídua, possuía-se uma paisagem com poucas árvores em virtude do clima frio e seco no período glacial. Em regiões de terras altas do litoral do Estado de São Paulo em condições climáticas frias e úmidas era possível observar uma floresta subtropical composta por árvores do gênero Araucária e Podocarpos (BEHLING, 1997).

Caracterizava-se a região Sudeste do Brasil por uma vasta extensão de vegetação aberta em virtude do clima mais frio e seco, sendo que a Mata Atlântica se limitava as áreas perto da costa. A floresta era densa e nebulosa no período até os 40 mil anos, com a presença do gênero Araucária, típico de ambientes frios (CRUZ, 2007).

Ainda, conforme Cruz (2007) com a alteração para um clima frio e seco ocorreram mudanças na vegetação com a retração gradual da floresta e ausência de Araucária. Com um aumento na umidade entre 28 e 23 mil anos aumentou a floresta, entretanto entre 23 e 9 mil com uma queda de temperatura e precipitação, ocorreu a perda de biomassa vegetal, neste período teve início do UMG. Até os 9 mil anos a vegetação permaneceu seca, com baixa biomassa e características de cerrado, havendo uma breve recuperação da floresta. Aos 3 mil anos a floresta já estava semelhante ao que se tem atualmente.

As mudanças climáticas podem ter sido responsáveis pela extinção da megafauna. Com o fim do degelo, as temperaturas subiram rapidamente, alterando a distribuição da vegetação em todas as regiões. Após o Último Máximo Glacial em áreas como no Morro de Itapeva e Serra da Bocaina no Estado de São Paulo se tem a continuidade da prevalência da vegetação campestre, com manchas de florestas em menores altitudes, quando em condições climáticas frias e secas. No Estado do Espírito Santo a Mata Atlântica começou a se desenvolver, em

virtude das mudanças no clima, passando a se ter condições mais úmidas e quentes (BEHLING; SAFFORD, 2010).

Na parte ocidental do Estado de Minas Gerais no final do período glacial e o início do Holoceno houve o desaparecimento da floresta com araucária, havendo uma expansão de floresta da Mata Atlântica, em condições climáticas mais quentes e úmidas. Durante o início do Holoceno com condições mais quentes e úmidas se teve o deslocamento dos ecossistemas da Mata Atlântica para elevações maiores (BEHLING; SAFFORD, 2010).

Na cadeia de montanhas entre os estados do Espírito Santo e de Minas Gerais, Serra do Caparaó, houve um aumento geral da temperatura e da umidade promovendo a expansão da Mata Atlântica e a vegetação campestre permaneceu nas terras mais altas (BEHLING; SAFFORD, 2010).

Na fase final do período glacial em virtude das condições mais secas, a floresta atlântica migrou para baixo na Serra dos Órgãos. Em um clima mais quente e seco na região central do Brasil a floresta com araucária foi substituída pela floresta estacional semidecidual (BEHLING; SAFFORD, 2010). A Mata Atlântica estende-se do norte a sul, leste a oeste. Em virtude de temperaturas mais baixas e estação seca mais curta as espécies típicas de floresta com araucária se distribuíram mais ao norte. A expansão da floresta com araucária ocorreu com a melhoria do clima, aumento das chuvas, menores períodos de seca, de acordo com Behling et al. (2001).

Wilson et. al. (2021) em seu estudo identificaram que em mais de 100.000 km² da Floresta Atlântica do Sul do Brasil haverá mudanças florísticas mais drásticas do que as ocorridas nos últimos 21.000 anos desde o UMG. Prospecta-se a expansão das Florestas Pluviais, quando em clima mais quente, migrando da vertente atlântica em direção ao planalto, ocupando o terreno das Araucárias, que sofrerão uma retração, sofrendo ameaça de serem extintas, em virtude do aquecimento global.

Salgado-Labouriau (2005) indica que durante o UMG, as temperaturas eram de 7° a 9° C abaixo das médias atuais, os Andes eram muito frios e secos, e o cerrado manteve a umidade anterior, com a presença de pólen arbóreo abundante, o que indica a presença de mais árvores do que se vê na atualidade. Na atualidade a palmeira *Mauritia* (buriti) não está presente nas regiões de cerrados mais ao sul, que apresentam estação seca e mais fria, e por outro lado estando presentes em regiões de clima mais quente como as regiões a oeste e norte do Brasil, conforme Behling et al. (2001). Ledru et al. (1996) observaram a presença de pólen de Araucária juntamente ao pólen de árvores de mata, que atualmente são florestas fechadas na região Sul do Brasil.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, propôs-se analisar o impacto da variação do nível de CO₂ na vegetação do território brasileiro, usando como referência os níveis de CO₂ no UMG (180 ppm) e no Período Pré-Industrial (280 ppm). Compreende-se que a concentração de CO₂ é fator limitante para a fotossíntese, sendo assim um limitante para o desenvolvimento vegetal. Além disso, a influência do fogo também foi analisada, pois o processo de queima é responsável pela emissão de CO₂ na atmosfera, além de influenciar a temperatura, que também é um fator limitante para a fotossíntese. Logo, entende-se que a concentração de CO₂ e o fogo são fatores importantes para o desenvolvimento da vegetação.

O método de pesquisa se deu pela reconstrução de tipos de vegetação, através de um Modelo de Interação Vegetação Terrestre (MIVT), tendo como variável de entrada a cobertura vegetal de biomas, buscando apresentar evidências de modelagem integrada para um Neotrópico mais gramíneo, com vegetação de dossel aberto e menor altura durante o Último Máximo Glacial, congruente com estudos paleoecológicos e biológicos. As reconstruções da

vegetação foram geradas usando o Modelo de Interação Vegetação Terrestre (MIVT) chamado Modelo para a Investigação Interdisciplinar sobre o Clima (MIROC3.2), impulsionadas por reconstruções de modelos do clima do Último Máximo Glacial (SATO, 2019).

3.1. Área de Estudo

A reconstrução da vegetação abrangeu a extensão do território brasileiro, sendo feita a correlação com os biomas do Brasil.

3.2 Dados Utilizados

O estudo incluiu estimar os efeitos de incêndios florestais e mudanças de dióxido de carbono (CO₂) na vegetação nos Neotrópicos durante UMG, com foco na análise dos efeitos do fogo e baixo CO₂ na distribuição de biomas florestais em florestas tropicais nos períodos Pré-Industrial (PI), com concentração de CO₂ (dióxido de carbono) de 280 ppm e para o período de UMG, com concentração de CO₂ de 180 ppm. Para alguns desses cenários foram adotados a existência de incêndios. Foram analisados a mudança na vegetação para quatro cenários:

- PI foff: Reconstrução da vegetação dos biomas com CO₂ pré-industrial e sem fogo (Cenário controle);
- PI fon: Reconstrução da vegetação dos biomas com CO₂ pré-industrial e fogo ativado;
- UMG foff: Reconstrução da vegetação dos biomas com CO₂ do UMG (baixo CO₂) e fogo desligado;
- UMG fon: Reconstrução da vegetação dos biomas com CO₂ do UMG (baixo CO₂) e fogo ativado.

Aplicou-se um recorte na variável cobertura vegetal para contemplar apenas a reconstrução da vegetação do território brasileiro.

Ao aplicar o modelo, obteve-se os dados para plotar os mapas representando as coberturas de vegetação em cada um dos 4 cenários.

A análise dos mapas foi feita com o intuito de estimar os efeitos da variação de CO₂ e da presença do fogo nos cenários, com a ênfase em analisar os efeitos desses fatores na distribuição dos biomas de floresta tropical úmida, floresta tropical seca e floresta temperada quente.

3.3 Modelo Usado

3.3.1 Modelo de Interação Vegetação Terrestre

A simulação espacial e temporal da vegetação no estudo foi realizada com Modelo dinâmicos de vegetação global. Utilizou-se o Modelo para a Investigação Interdisciplinar sobre o Clima (MIROC3.2) que inclui um modelo simples de transporte de radiação de aerossol chamado Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (SPRINTARS) (TAKEMURA et al. 2000, 2002, 2005). Este modelo calcula distribuições tridimensionais de cinco tipos de aerossóis: sulfato, carbono preto, carbono orgânico, sal marinho e poeira do solo.

O modelo MIROC3.2 representa explicitamente o efeito microfísico direto de aerossóis solúveis (carbono orgânico, sulfato e sal marinho) em nuvens de estratos de água, juntamente com os efeitos diretos e semidiretos e foi usado para simular os efeitos meteorológicos nos períodos estudados.

3.3.2 Modelo de incêndio da vegetação

Para fornecer as informações sobre incendios ao modelo MIROC3.2, foi utilizado o modelo Land-surface Process and exchanges (LPX), que contabiliza apenas incêndios iniciados por raios. O modelo LPX é capaz de simular as principais características do regime de incêndio, mesmo em áreas onde muitos incêndios são iniciados pelo homem. Essa capacidade aparentemente paradoxal é consistente com a evidência de que incêndios provocados pelo homem em regiões naturalmente propensas ao fogo tendem a antecipar, em vez de aumentar, o regime de fogo natural (Prentice et al, 2011).

A parametrização das características dos biomas usados nesta pesquisa foi análoga aos apresentados por Prentice et al. (2011), onde foi implementado três saídas pós-processamento: graus-dia de crescimento, altura da vegetação e cobertura projetiva da folhagem. O limite de graus-dia de crescimento médio anual foi definido para 350 °C dias. Este limite foi usado para separar os biomas frios e quentes. A altura da vegetação e cobertura da folhagem foram usados para distinguir entre os biomas de solo descoberto, pastagem, savana e floresta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A floresta tropical úmida existente no Brasil abrange quase que a totalidade do bioma amazônico, o qual apresentou variação mínima para o período pré-industrial com a ocorrência de incêndios florestais, quando comparado ao período controle (Figura 6). As maiores mudanças foram observadas para a região do cerrado e parte da região litorânea. A redução da vegetação foi amplificada para o cenário de baixo CO₂ e a existência de fogo, tendo em vista que o efeito individual do baixo CO₂ e fogo foi semelhante. O baixo CO₂ e a existência de fogo indicam perdas arbórea até para o bioma amazônico, o qual é caracterizado por condições favoráveis para o desenvolvimento das florestas tropicais. A redução do CO₂ tende a reduzir a densidade da cobertura arbórea e o fogo resulta em baixa cobertura arbórea (Sato et al, 2021).

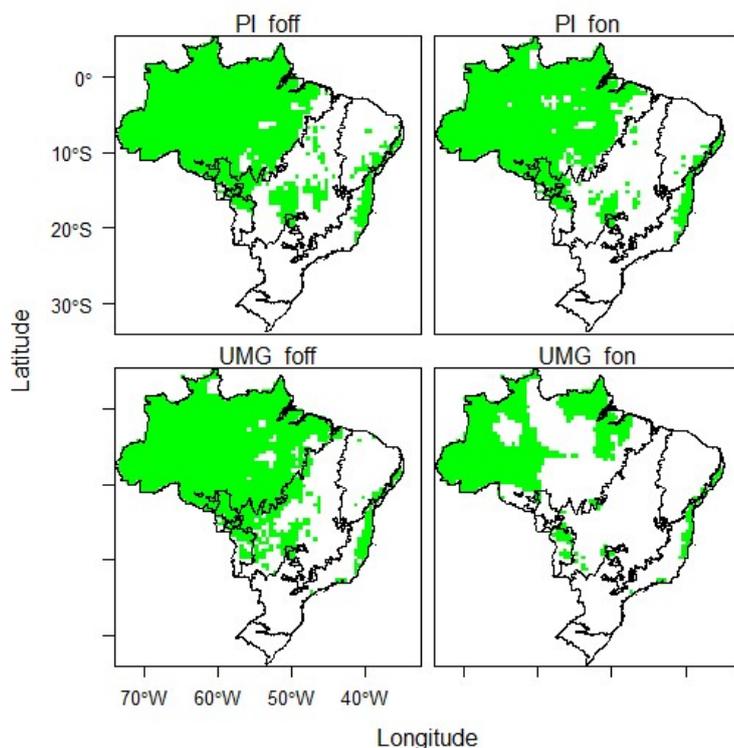


Figura 6 – Mudança da vegetação na Floresta tropical úmida

Embora os resultados mostrem mudanças significativas para o UMG, os estudos de mudança da vegetação no Brasil são predominantemente realizados em registros de solo e lacustres, que documentam mudanças na temperatura, precipitação e vegetação por meio do uso de pólen e outras proxies orgânicas e inorgânicas. Alguns desses registros, no entanto, estão sujeitos a processos de intemperismo e raramente exibem horizontes profundos e adequados para datação radiométrica para estimar mudanças nas taxas de sedimentação. Assim, essas limitações complicam seu uso para a reconstrução de modelos de idade cronologicamente robustos, necessários para entender as rápidas mudanças ambientais em longos períodos (MORTON et al., 2013; SILVA et al., 2013).

Além disso, a escassez de registros de lagos abrangendo toda a transição do UMG - Holoceno na região central da América do Sul pode ser um empecilho para entender como os biomas tropicais respondem às mudanças de temperatura e chuva. Portanto, informações alternativas, como as apresentadas por modelos climáticos são necessários para preencher as lacunas existentes nas reconstruções ambientais e melhor restringir as mudanças ambientais abruptas durante os ciclos Glacial-Interglacial (COE et al., 2013; MORTON et al., 2013).

O fogo ocorre independentemente da presença humana e sempre desempenhou um papel na estrutura da vegetação (PAUSAS; KEELEY, 2009; BOND; SCOTT, 2010). O registro de carvão vegetal em ecossistemas produtores de fogo sugere que a evolução da vegetação também determina mudanças nas condições do fogo. Por exemplo, durante o período Cretáceo, iniciou-se o chamado "ciclo do capim-fogo", causado por uma nova estrutura de vegetação que exibia alta produtividade de biomassa de gramíneas C4, associada a altos níveis de oxigênio e intensa atividade de descargas atmosféricas (BOND; MIDGLEY, 2012).

Excluindo a atividade antropogênica, as fontes potenciais de ignição estão relacionadas a raios, atividade vulcânica, faíscas de rochas, impactos de meteoros e combustão espontânea, causadas por atividade microbiana ou oxidação de depósitos de carvão (BOWMAN et al., 2011). Ecossistemas tropicais, onde crescem gramíneas e plantas herbáceas, incluindo savanas,

são alguns dos ambientes mais fortemente queimados do mundo moderno (CHUVIECO et al., 2008). As condições atmosféricas são um fator importante na promoção ou prevenção de incêndios, porque os incêndios florestais e o clima são processos intimamente relacionados (LIU et al., 2014).

Estes podem ser divididos em clima de incêndio: condições de incêndio para uma determinada época de incêndios e clima de incêndio: condições meteorológicas diárias (temperatura média, humidade, vento etc.) para a época de incêndios. Espera-se que todas essas condições atmosféricas, como temperatura, umidade, vento, precipitação e formação de nuvens, mudem à medida que o CO₂ atmosférico aumenta (PARISIEN et al., 2011; LIU et al., 2014).

A mudança climática global pode afetar indiretamente a ocorrência de incêndios, como mudanças nos recursos e condições de combustível, condições climáticas e estrutura da vegetação (LIU et al., 2014). As estimativas da mudança global preveem o aumento das taxas de incêndio em regiões como a Bacia Amazônica, onde as condições climáticas e atmosféricas em grandes partes da região geralmente impedem essa ameaça (RAY et al., 2005; KRAWCHUK et al., 2009; LIU et al., 2014).

A Bacia Amazônica contém mais da metade das florestas tropicais remanescentes do mundo (LAURANCE et al., 2011), cobrindo uma área de aproximadamente 5,4 milhões de km². Os impactos da agricultura de grande escala, megacorporações e exploração madeireira afetaram a qualidade e resiliência de diferentes tipos de ecossistemas na Amazônia (FERNSIDE, 2009).

Este impacto ameaça mudar o paradigma de "prevenção de incêndios florestais" na Amazônia, o que inevitavelmente levará a ciclos crescentes de microclima e esgotamento da vegetação, aumentando assim o risco e a suscetibilidade ao fogo. Incêndios climáticos mais severos foram confirmados durante períodos marcados por seca severa durante a experiência da Oscilação Sul do El Niño (ENSO) na Amazônia. Entre 1997 e 1998, aproximadamente 40.000 km² de sub-bosque florestal foram afetados por incêndios de várzea (VASCONCELOS et al., 2013).

Estimativas recentes da extensão dos incêndios na superfície usando novas técnicas de detecção por satélite mostram que os incêndios no sub-bosque afetaram mais de 85.500 quilômetros quadrados de floresta entre 1999 e 2010, representando 2,8% de toda a floresta amazônica (MORTON et al., 2013). Embora essas aproximações ainda faltem em observações e experimentos in situ, esses autores mostraram que o impacto dos incêndios de superfície foi proporcionalmente maior do que o desmatamento na região no mesmo período.

O fogo afetou a estrutura e a composição da floresta amazônica por milhares de anos. Os solos contendo carvão indicam que os incêndios ocorreram pelo menos nos últimos 6.000 anos, período durante o qual o clima em algumas áreas tornou-se mais seco e a vegetação endureceu significativamente e era mais esparsa do que hoje (UHL; KAUFMAN, 1990).

Os cálculos de frequência de incêndios para esses períodos antigos são separados por 400 a 700 anos (MEGGERS, 1994), ou seja, os incêndios na floresta amazônica sempre estiveram presentes, embora em frequências muito baixas (grandes intervalos de recorrência).

Atualmente, é difícil monitorar a fuga de incêndios para a floresta intacta. Isso ocorre porque os incêndios deixam cicatrizes duradouras na terra que são difíceis de encontrar. Consequentemente, a maioria dos incêndios agora é evitada por meio de aceiros. Estes são criados limpando pontos de queima e depois queimando a terra limpa. Este fogo de fuga (fogo de superfície ou fogo de propagação) é considerado o impacto mais prejudicial nas florestas devido à sua capacidade de se espalhar dezenas de quilômetros sob a floresta (MORTON et al., 2013), dificultando sua detecção por satélites (SILVA et al., 2013). Dessa forma, após a ocorrência de incêndios na Amazônia, é difícil monitorar a fuga do fogo para áreas florestais intocadas. Como resultado, os pesquisadores devem examinar as consequências de incêndios

anteriores em busca de sinais de que já ocorreram. Isso ocorre porque as práticas atuais de uso da terra de corte e queima dificultam o monitoramento.

Quando o primeiro incêndio ocorre no sub-bosque, a intensidade tende a ser baixa, a altura da chama fica entre 10 e 30 cm e a velocidade é baixa ($0,25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), o que é chamado de propagação do fogo. A temperatura na base das plantas interceptadas ao longo do caminho de propagação do fogo na superfície pode atingir até $760 \text{ }^\circ\text{C}$, momento em que a intensidade pode chegar a $50 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1}$ (KRIEGER FILHO et al., 2011).

Dependendo das condições ambientais e da composição do combustível, principalmente da continuidade da serapilheira e dos galhos baixos, os incêndios de superfície podem atingir as camadas mais altas da floresta (COCHRANE; BARBER, 2009). A inflamabilidade do sub-bosque em florestas tropicais é modulada por padrões de chuva, altura da floresta e abertura do dossel (RAY et al., 2005). Em florestas úmidas, que são locais de extremo estresse quando há pouca precipitação e o dossel é mais aberto, o microclima do sub-bosque sofre mudanças fundamentais, aumentando as temperaturas ambiente e do solo e reduzindo a umidade relativa do ar e da serapilheira (FEARNSIDE, 2009).

A combinação desses fatores aumenta a probabilidade de novos incêndios no sub-bosque, aumentando a severidade, a recorrência e as distâncias de penetração do fogo em florestas intactas tanto tropicais úmidas e secas (COE et al., 2013; MORTON et al., 2013).

As florestas tropicais secas apresentaram resultados análogos as florestas tropicais úmidas (Figura 7). Deste modo, surge indícios de que a relação baixo CO_2 e fogo pode proporcionar um corredor central da Amazônia. A degradação da floresta pode facilitar que biomas constituídos por vegetação com características de cerrado e caatinga avancem e tomem o lugar da floresta.

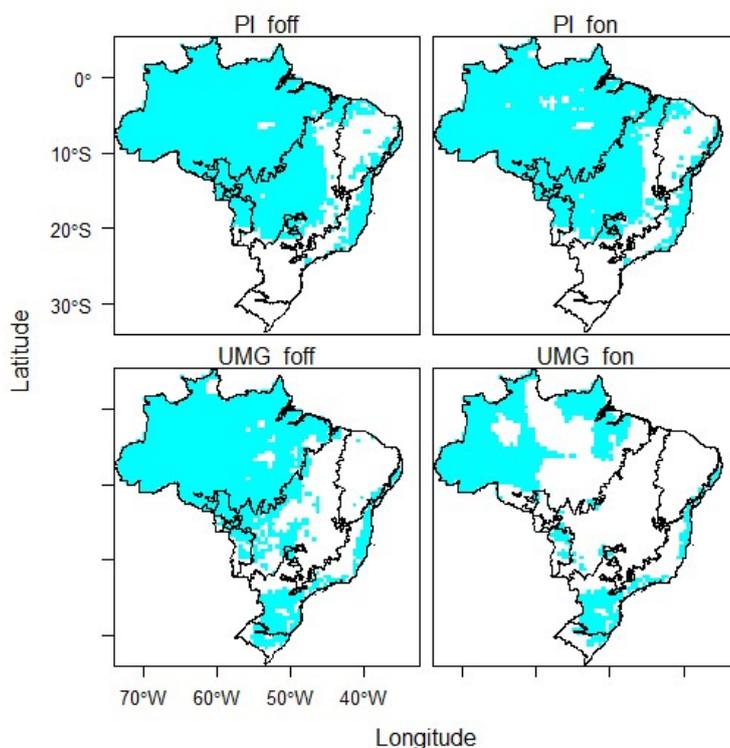


Figura 7 - Mudança da vegetação na floresta tropical seca

Durante UMG a floresta foi fragmentada, à essa hipótese se dá o nome de “Refúgios Amazônicos”, conforme proposto por Haffer (1969). A floresta fragmentada foi parcialmente

substituída por vegetações abertas do tipo cerrado e caatinga, principalmente na região central do Brasil.

Ab'Saber (1977) cita o avanço ocorrido do cerrado sobre a Amazônia, restando apenas refúgios florestais nas cabeceiras dos principais afluentes, o avanço da caatinga sobre o cerrado e parte da floresta atlântica situada no Sudeste, expansão dos campos sulinos, gerando uma retração das formações florestais e expansão das formações sazonais abertas. Estas mudanças se devem ao UMG mais frio e seco em todo Brasil e uma redução da precipitação cerca de 35% a 55%.

Ainda, associa-se a uma intensificação das correntes frias marítimas que vem da Antártica, com ventos frios e secos. Por meio de polens fósseis obteve-se a corroboração das hipóteses do deslocamento das florestas de araucárias para o norte, expansão dos campos sulinos e expansão de campos onde hoje são florestas no Sudeste (BEHLING, 2002; AB'SABER, 1977).

O passado frio é inquestionável, porém ainda se tem debates sobre o clima do UMG, principalmente no que se refere ao padrão da precipitação. Na reconstrução climática se tem a associação de concentração de CO₂ atmosférico, ciclos hidrológicos, temperatura da superfície terrestre e oceânica, forças externas e interações de retroalimentação. Frente aos diferentes modelos propostos se tem a confirmação de que se tinham condições climáticas mais frias e úmidas no UMG (FLATO et al., 2013). Arruda et al. (2018) propõem a hipótese de formação de uma condição ambiental favorável para a formação de uma floresta que seria similar à floresta atlântica costeira, apresentando menores temperaturas e ainda manutenção de refúgios de floresta quente, o que explicaria a presença de polens de florestas andinas.

Junto às áreas de floresta tropical no Brasil é possível ainda mencionar manchas de savanas e outras unidades de vegetação aberta. Haffer (1967); Prance (1978); Ab'Saber (2002) além de outros autores, apontam que a existência das savanas Amazônicas é considerada como evidência da hipótese dos refúgios. Hauk (2008) cita a existência de extinções de alguns táxons da megafauna em decorrência de mudanças climáticas, sendo que a extinção tardia (considerado o período de transição Pleistoceno e Holoceno) de alguns táxons da megafauna decorreu-se da preservação de áreas de refúgios e desfragmentação destas paisagens.

Os mapas de paleobiomas obtidos por estudos palinológicos fornecem indícios do grau de aridez do subcontinente, suficiente para cobrir o Nordeste do Brasil com semidesertos e grande parte do Brasil com savanas e caatingas e a Mata Atlântica cederia lugar a campos (LAPOLA, 2007). Na América do Sul a vegetação subtropical compõe-se de um mosaico de florestas e campos, passando por variações climáticas dos períodos glaciais e, com o clima mais frio e seco durante o UMG, ocorreu o avanço de espécies campestres sobre as florestas subtropicais provocando mudanças nas paisagens (BEHLING, 2002), como observado na Figura 8.

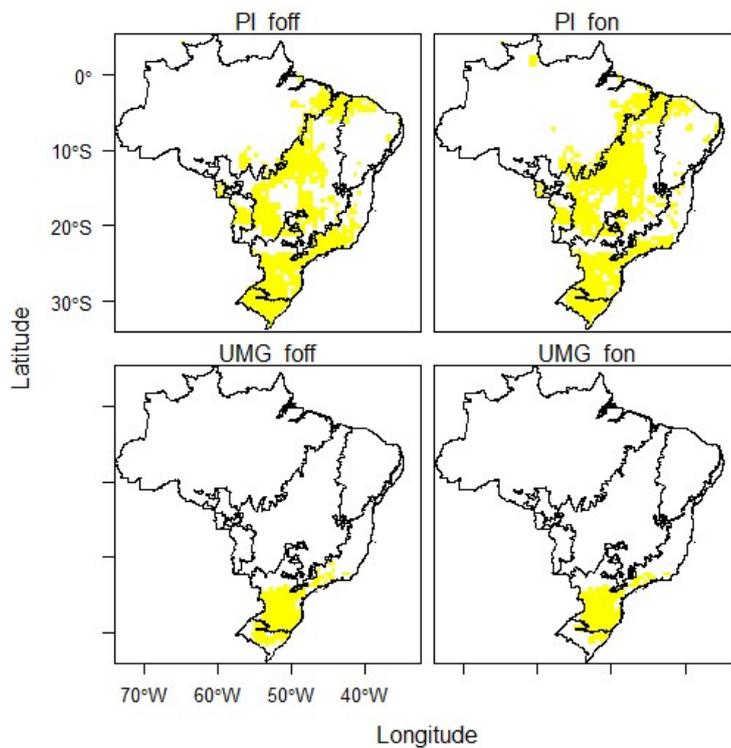


Figura 8 - Mudança da vegetação na floresta temperada quente

Ao longo dos séculos foi observado mudança da vegetação nos biomas existentes no Brasil. Parte dessa mudança é resultante de alterações nos padrões climáticos, outras das mudanças no CO₂ e ocorrência de fogo. A evidência da presença de biomas de vegetação aberta em regiões que hoje são ocupadas por floresta tropical fechada também foi documentada por Quijada-Mascareñas et al. (2007) e Prado e Gibbs (1993).

Secas mais longas, mais frequentes e severas são esperadas na Amazônia (MALHI et al., 2009), e registros cumulativos já indicam uma diminuição na precipitação anual de 0,32% ano⁻¹ (LIU et al., 2014). Em áreas com esses padrões de precipitação reduzidos, as florestas afetadas podem alterar sua estrutura de vegetação, levando a mudanças em sua resistência ao fogo (prevenção de incêndios), o que redistribuirá globalmente as áreas dependentes do fogo (KRAWCHUK et al., 2009).

A redução das chuvas e o aumento da temperatura do ar são os pontos cruciais para o aumento da possibilidade de incêndios florestais. Essa mudança pode fazer com que a floresta apresente o nível maior de degradação e favoreça o avanço de biomas de vegetação aberta ou rasteira (Figura 9).

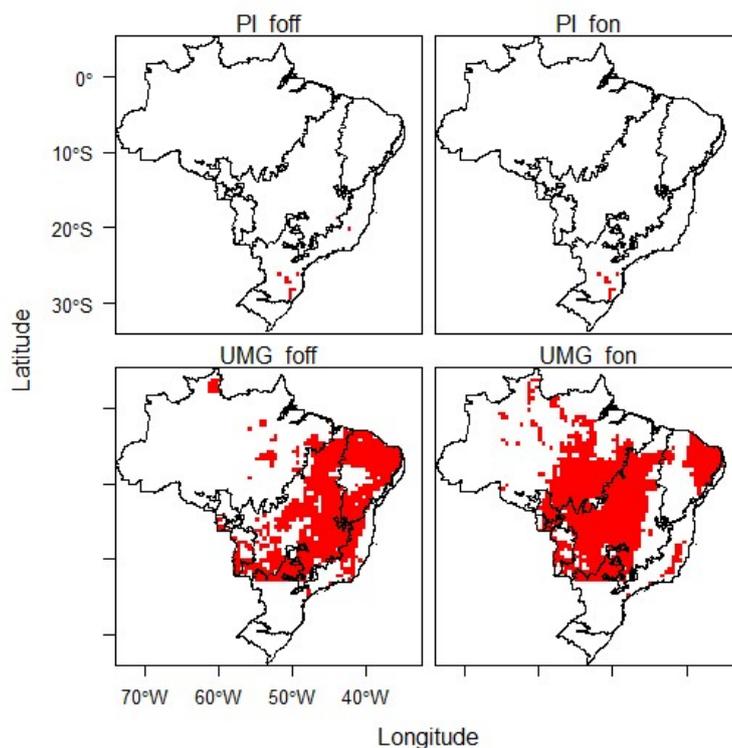


Figura 9 - Mudança da vegetação para a savana tropical

Esse processo é conhecido como 'ponto de inflexão da condição do fogo', a transição entre diferentes biomas, e é influenciado pela interação do fogo com as variáveis climáticas (COE et al., 2013). A degradação das florestas, as mudanças nos padrões de precipitação e os períodos de maior intensidade e extensão dos incêndios resultaram na ocorrência de savanas "breakpoint" versus floresta úmida.

Isto é, os acidentes geográficos de cerrado ou savana seriam superiores aos acidentes geográficos florestais, onde os incêndios de baixa intensidade exacerbam a exclusão de espécies em florestas maduras (FEARNSIDE, 2009). Para alguns autores, um conceito polêmico denominado savanização sintetiza esse processo (BARLOW; PERES, 2008).

A regeneração natural das florestas também fica comprometida, pois elementos da flora podem se beneficiar de espaços deixados pelo fogo, como algumas vinhas (PINARD et al., 1999), gramíneas (SILVÉRIO et al., 2013) e em casos extremos hectares de bambu (SMITH ; NELSON, 2010; BARLOW et al., 2012; CARVALHO et al., 2013) ou mesmo gramas (Figura 10).

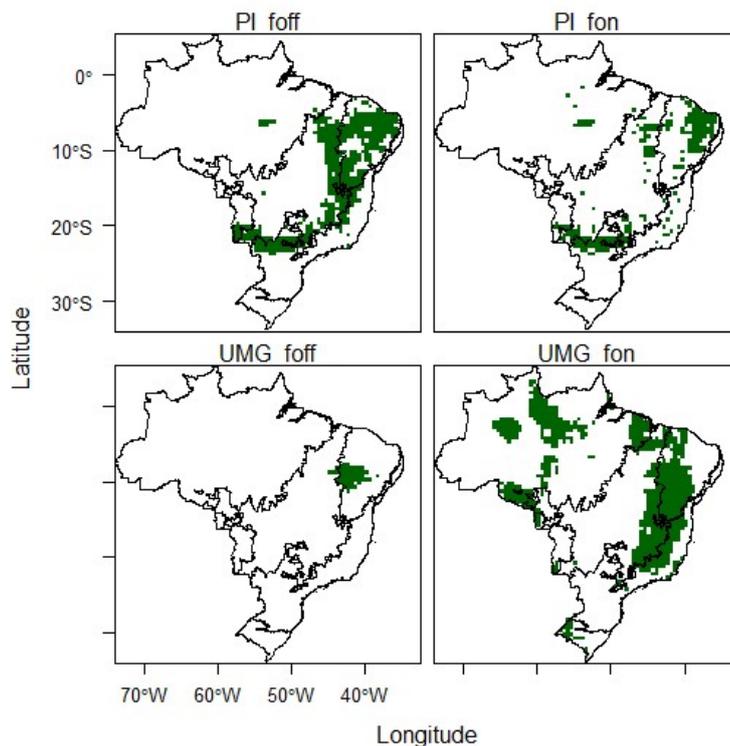


Figura 10 - Mudança da vegetação para a grama seca

À medida que as árvores morrem e suas copas se abrem, os incêndios de superfície penetram cada vez mais no interior das florestas intactas, trazendo mais capim e alterando as condições locais de incêndio, o que realimenta o processo.

Originalmente sugerido por Rundel (1981), ciclos de queimadas repetidas destruindo mudas pelas bordas da floresta, paralelamente à invasão de gramíneas, impediriam o estabelecimento da vegetação florestal, mantendo o domínio das espécies inflamáveis. Esse equilíbrio competitivo que atualmente ocorre na borda da floresta, logo na junção de campo (pasto para gado) e mata úmida, merece maior atenção da comunidade científica (SILVÉRIO et al., 2013).

Durante o período de avaliação, é mais provável que a mudança climática do UMG reconfigure a cobertura vegetal do Brasil. No entanto, na maior parte do país, a dinâmica de contração e expansão do bioma restringiu-se às áreas fronteiriças, resultando na configuração de grande parte de suas áreas centrais como potenciais refúgios. Uma exceção a esse padrão ocorre na região amazônica, mostrada no UMG como uma região de extrema instabilidade climática.

Segundo van der Hammen e Hooghiemstra (2000), uma redução de 35-55% na precipitação resultaria na captura do cerrado da Bacia Amazônica. No entanto, essas estimativas são inconsistentes com os diferentes modelos de circulação gerada. Além disso, os autores propõem que a presença de grandes dunas de areia na Amazônia central confirma a premissa da seca amazônica. No entanto, o campo de dunas da região do Alto Rio Negro coincide com o bioma campinarana, local de maior pluviosidade do Brasil, onde os solos foram fortemente lixiviados, deixando grandes áreas de espodosolos (MENDONÇA et al., 2014).

Os resultados obtidos mostram que os biomas brasileiros podem ser tornar regiões desérticas, principalmente devido a redução das chuvas e aumento dos incêndios florestais (Figura 11). Os resultados apresentados por Bush (2005) mostram que mesmo na parte com maior redução da precipitação, o estabelecimento de vegetação não florestal e mesmo de

florestas estacionais é improvável porque ainda se mantêm altas taxas de precipitação, acima da tolerância dos estratos sazonais. Uma redução de 350 mm em áreas com precipitação atual próxima a 3.000 mm não seria suficiente para alterar significativamente a cobertura vegetal, como poderia ter acontecido em outros biomas como caatinga, cerrado ou floresta estacional. Além disso, tais mudanças na cobertura vegetal dentro das bacias hidrográficas são menos prováveis se considerarmos os feedbacks solo-floresta-clima, como a reciclagem de água por florestas de estação seca (NOBRE et al., 1991).

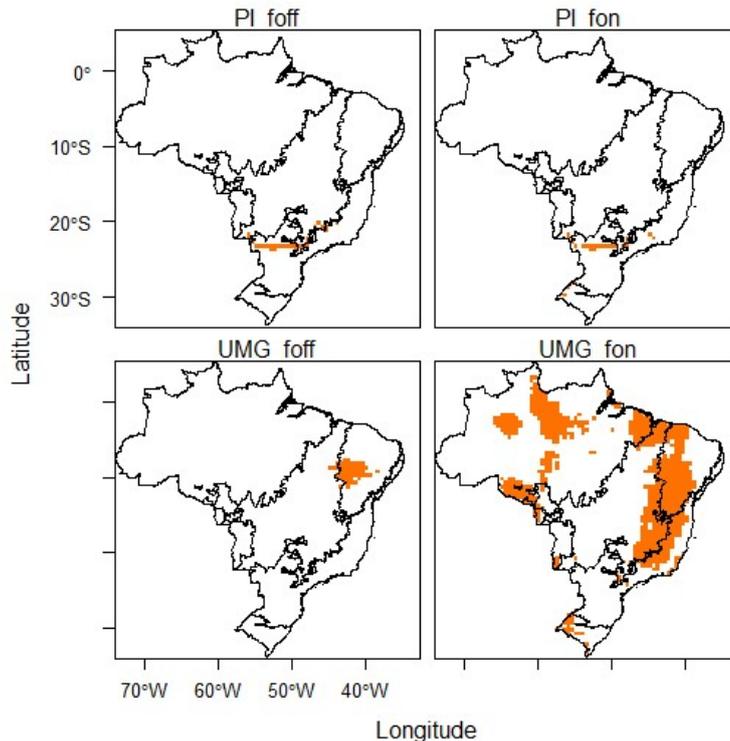


Figura 11 - Mudança da vegetação para os desertos quentes

Portanto, é mais provável que, no UMG, o avanço do cerrado na Bacia Amazônica tenha se limitado à ecorregião sul (MAYLE et al., 2004; 2009). Quanto às florestas tropicais ao longo da costa Atlântica, ao contrário do modelo de consenso proposto por Carnaval e Moritz (2008), a cobertura permanece quase constante para ambos os cenários. No UMG, esse bioma contraiu-se em latitudes superiores a 25° e manteve-se praticamente constante ao longo do Holoceno (PESSENDA et al., 2009).

O principal determinante desse bioma, a forçante orográfica no leste do Brasil, não foi significativamente alterado pelas mudanças climáticas passadas. No entanto, o UMG pode ter subestimado a extensão da Mata Atlântica, dado que o nível do mar estava em média cerca de 120 km abaixo dos níveis atuais (MAYLE et al., 2009).

5. CONCLUSÃO

O presente estudo se propõe a analisar as mudanças da vegetação do Brasil no último máximo glacial referente a redução da concentração atmosférica de CO₂ e a ocorrência de incêndios florestais, concluindo que:

A vegetação das florestas tropicais e temperadas apresentam redução em sua cobertura arbórea para quase todos os biomas brasileiros. O impacto individualizado do baixo CO₂ e o fogo tem o potencial para causar grandes mudanças na vegetação. No entanto, quando a ocorrência é simultânea a degradação é acentuada.

A vegetação tropical e temperada apresenta um padrão de redução maior para a região central do Brasil. Também foi observado a migração da floresta para as regiões extremas Norte e Sul do Brasil.

A degradação da floresta tropical e temperada fará com que sua vegetação seja substituída por vegetação de dossel aberto e menor altura. Em alguns casos, a floresta poderá ser substituída por vegetação típica do cerrado, grama ou desertos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SABER, A. N. Espaços ocupados pela expansão dos climas secos na América do Sul, por ocasião dos períodos glaciais quaternários. *Paleoclimas* (Instituto de Geografia – USP), v.3, p.1-19, 1977.
- AB'SABER, A. N. Os domínios da natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003
- ADRIAN QUIJADA-MASCAREÑAS, J., Ferguson, J. E., Pook, C. E., Salomao, M. D. G., Thorpe, R. S., & Wüster, W. Phylogeographic patterns of trans-Amazonian vicariants and Amazonian biogeography: the Neotropical rattlesnake (*Crotalus durissus* complex) as an example. *Journal of biogeography*, v. 34, n. 8, p. 1296-1312, 2007.
- ALBALADEJO, J.; ORTIZ, R.; GARCIA-FRANCO, N.; NAVARRO, A. R.; ALMAGRO, M.; PINTADO, J. G.; MARTINEZ-MENA, M. Land use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain. *Journal of Soils and Sediments*, v. 13, n. 2, p. 265-277, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11368-012-0617-7>. Acesso em 10 jan. 2023
- ALBUQUERQUE, Ana Christina Sagebin; SILVA, Aliomar Gabriel da (1 ed.). **Aquicultura Tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008
- ALVES, José Eustáquio Diniz. A concentração de CO₂ é a mais alta em milhões de anos. *Ecodebate*, 2021. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2021/03/17/a-concentrao-de-co2-e-a-mais-alta-em-milhoes-de-anos/#:~:text=A%20previs%C3%A3o%20de%20aumento%20do,2021%2C%20conforme%20o%20gr%C3%A1fico%20abaixo>. Acesso em 18 fev. 2023.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; LIMA, A.; ARAI, E. Fires in Amazonia. In: **Interactions Between Biosphere, Atmosphere and Human Land Use in the Amazon Basin**. Springer Berlin Heidelberg, 2016
- ARRUDA, D. M. et al. Combining climatic and soil attributes better predicts cover of Brazilian biomes. *The Science of Nature*, v.104, p.32, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00114-017-1456-6>. Acesso em 10 jan. 2023
- ARRUDA, D. M. et al. Phytogeographical patterns of dry forests sensu stricto in northern Minas Gerais State, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v.85, p.283-94, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/pRBcrr9qnpQVwHMzbdmJ4QN/?lang=en&format=html>. Acesso em 10 jan. 2023
- ARRUDA, D. M. et al. Vegetation cover of Brazil in the last 21 ka: New insights into the Amazonian refugia and Pleistocenic arc hypotheses. *Global Ecology and Biogeography*, v.27, p.47-56, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/geb.12646>. Acesso em 10 jan. 2023
- ARRUDA, Daniel Meira; SCHAEFER, Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud. Dinâmica climática e biogeográfica do Brasil no Último Máximo Glacial: o estado da arte. **Estudos Avançados**, v. 34, p. 187-198, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/HdwHSH8tcdyTQ7HR43RFvbf/?lang=pt&format=html>. Acesso em 04 fev. 2023
- AZEVEDO, V. et al. Medieval Climate Variability in the eastern Amazon-Cerrado regions and its archeological implications. *Sci. Rep.* 9 (1), 2019, 1–10.
- BARLOW, J. et al. How pristine are tropical forests? An ecological perspective on the pre-Columbian human footprint in Amazonia and implications for contemporary conservation: *Biological Conservation*, v. 151, 2012, p. 45– 49.

BEHLING, H. South and southeast Brazilian grasslands during Late Quaternary times: a synthesis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v.177, p.19-27, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031018201003492>. Acesso em 10 jan. 2023

BEHLING, Hermann, PILLAR, Valério D., ORLÓCI, László, BAUERMANN, Soraia G. „Late Quaternary Araucaria forest, grassland (Campos), fire and climate dynamics, studied by high-resolution pollen, charcoal and multivariate analysis of the Cambará do Sul core in southern Brazil“, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* vol.203, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031018203006874>. Acesso em 10 jan. 2023

BEHLING, Hermann, SAFFORD, Hugh D. „Late-glacial and Holocene vegetation, climate and fire dynamics in the Serra dos Órgãos, Rio de Janeiro State, southeastern Brazil“, *Global Change Biology* vol.16, 2010. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2009.02029.x>. Acesso em 10 jan. 2023

BEHLING, Hermann. Late Quaternary vegetation, climate and fire history from the tropical mountain region of Morro de Itapeva, SE Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 129, n. 3-4, p. 407-422, 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031018297881771>. Acesso em 18 fev. 2023.

BEHLING, H. & COSTA, M.L. Holocene vegetational and coastal environmental changes from the Lago Crispim record in northeastern Pará state, eastern Amazonia. *Review of Paleobotany and Palynology*. 114, 145-155, 2001.

BRADY, E.C.; Otto-Bliesner, B.L.; Kay, J.E.; Rasenbloom, N. Sensitivity to glacial foreign in theCCSM4. *Journal of Climate*. 26(6):1901-1925, 2013.

BOND, W. J. & SCOTT, A. C. Fire and the spread of flowering plants in the Cretaceous. *New Phytologist*, v. 188, p. 1137-1150, 2010.

BOND, W. J. & MIDGLEY, J. J. Fire and the Angiosperm Revolutions. *International Journal*, v. 173, n. 6, p. 569-583, 2012.

BOWMAN, D. M. J. S. et al. The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography*, v. 38, p. 2223-2236, 2011.

BRADY, E.C.; Otto-Bliesner, B.L.; Kay, J.E.; Rasenbloom, N. Sensitivity to glacial foreign in theCCSM4. *Journal of Climate*. 26(6):1901-1925, 2013

BUSH, M. B. Holocene climates of the lowland tropical forests. *Global Change in the Holocene* (ed. by A. Mackay, R. Battarbee, J. Birks and F. Oldfield), pp 293– 306. Academic Press, New York, 2005.

BUSH, Mark B.; OLIVEIRA, Paulo E. de. The rise and fall of the refugial hypothesis of Amazonian speciation: a paleoecological perspective. *Biota Neotropica*, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bn/a/Kwz9qNMx5yx3rPXQWrS6vWv/abstract/?lang=en>. Acesso em 10 jan. 2023

CARNAVAL, A. C. & MORITZ, C. Stability predicts genetic diversity in the Brazilian Atlantic forest hotspot. *Science*, 323, 2009, 785-789.

CARVALHO, Maria. Entenda as diferenças entre queimadas, incêndios florestais e fogo de calor. 2019. Disponível em: http://www.semar.pi.gov.br/wagtail/home_page/noticias/entenda-as-diferencas-entre-queimadas-incendios-florestais-e-foco-de-calor-em-meio-a-80/#:~:text=Focos%20de%20Calor%20s%C3%A3o%20temperaturas,inc%C3%AAndio%20%C3%A9%20detectado%20pelos%20sensores. Acesso em 04 fev. 2023

CARVALHO, Sandra. Tem ideia de como era frio na era do gelo?. *Circuito D*, 2020. Disponível em: <https://www.circuitod.com.br/post/tem-ideia-de-como-era-frio-na-era-do->

[gelo#:~:text=Os%20cientistas%20da%20Universidade%20do,do%20Norte%20e%20do%20Sul. Acesso em 04 fev. 2023](#)

CHENG, H. et al. Climate change patterns in Amazonia and biodiversity. *Nat. Commun.* 4 (1), 2013, 1–6.

CHUVIECO, E. et al. Global characterization of fire activity: toward defining fire regimes from Earth observation data. **Global Change Biology**, v. 14, n. 7, p. 1488-1502, 2008.

COCHRANE, M. A. & BARBER, C. P. Climate change, human land use and future fires in the Amazon. **Global Change Biology** v. 15, n. 3, p. 601-612, 2009.

COE, M. T. et al. Deforestation and climate feedbacks threaten the ecological integrity of south-southeastern Amazonia. *Philosophical transactions of the Royal Society B: Biological Science*, v. 368, n. 1619, p. 20120155, 2013.

COLHOUN, E.A.; Mabin, M.C.G.; Adamson, D.A.; Kirk, R.M.. Antarctic ice volume and contribution to sea-level fall at 20.000 yr BP from raised beaches. *Nature*, 358:316-319, 1992.

Disponível em: <https://www.nature.com/articles/358316a0>. Acesso em 10 jan. 2023

COLINVAUX, P. A. et al. A long pollen record from lowland Amazonia: forest and cooling in glacial times. *Science*, v.274, p.85-88, 1996.

COLINVAUX, P.A., De Oliveira, P.E., Moreno, J.E., A palynological history of the Amazon rainforest through glacial cycles. *Acta palaeontologica Romaniae*, 1999

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS MUNICÍPIOS. Os perigos das queimadas e incêndios florestais. 19 nov. 2021. Disponível em: https://www.cnm.org.br/cms/biblioteca/Os-perigos-das-queimadas-e-incendios-florestais_2016-a-2021_19.11.2021.pdf. Acesso em 18 fev. 2023.

CORDEIRO Suzane H., LORSCHHEITTER Maria L. „Palynology of Lagoa dos Patos sediments, Rio Grande do Sul, Brazil“, *Journal of Paleolimnology* vol.10, 1994. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00683144>. Acesso em 10 jan. 2023

CORRÊA, Iran Carlos Stalliviere. Variações climáticas no Quaternário. 2021. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/220731/0011_25481.pdf. Acesso em 18 fev. 2023.

CRISP, D; ATLAS, R.M; BREON, F.-M; BROWN, L.R; BURROWS, J.P; CIAIS, P; CONNOR, B.J; DONEY, S.C; FUNG, I.Y; JACOB, D.J. The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission. **Advances In Space Research**, [S.L.], v. 34, n. 4, p. 700-709, jan. 2014. Disponível em: <https://trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle/2014/39211/03-0563.pdf?sequence=1>. Acesso em 10 jan. 2023

CRUZ, Francisco William da; CHENG, Hai ; EDWARDS, Lawrence.; KARMANN, Ivo.; STRIKIS, Nicolás. Paleopluviosidade do Sul e Sudeste Brasileiro Durante os Últimos Seis Ciclos Glaciais- Interglaciais a Partir de Registros Isotópicos em Espeleotemas. In: **Anais do Congresso da ABEQUA 2011**. 2011. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/bitstreams/fddf620e-6d6a-4628-8aae-8c84a3409070>. Acesso em 10 jan. 2023

CUADRAT, José Maria; PITA, Maria Fernanda. **Climatologia**. 2ª ed. Madrid: Cátedra, 1997
DAI, W.; HUANG, Y. Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China. *Catena*, v. 65, n. 1, p. 87-94, 2006.

DINAKARAN, J.; HANIEF, M.; MEENA, A.; RAO, K. S. The chronological advancement of soil organic carbon sequestration research: a review. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences*, v. 84, n. 3, p. 487–504, 2014

FEARNSIDE, P. M. Brazil’s evolving proposal to control deforestation: Amazon still at risk. **Environmental Conservation**, v. 36, n. 03, p. 177, 2009.

FERGUSON, Sue. A.; SANDBERG, David. V.; OTTMAR, Roger. Modelling the effect of landuse changes on global biomass emissions. In: *Biomass Burning and Its Interrelationships With the Climate System*. Springer Netherlands, 2000. Disponível em:

https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-306-47959-1_3. Acesso em 10 jan. 2023

FLATO, G. et al. Evaluation of Climate Models. In: STOCKER, T. F. et al. (Eds.) Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

FONSECA, E. M. B; RIBEIRO, G. A. Manual de Proteção contra Incêndios Florestais. CEMIG. Belo Horizonte, 2003.

GASSE, Françoise.; TÉHET, Régis; DURAND, D.; GILBET, Elisabeth.; FONTES, Jean-Charles. 1990. The arid-humid transition in the Sahara and the Sahel during the last deglaciation. *Nature*, 346:141-146, 1990. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/346141a0>. Acesso em 10 jan. 2023

HAFFER, Jürgen. Speciation in Amazonian forest birds. *SCIENCE*, v.165, p.131-7, 1969. Disponível em: http://www2.hawaii.edu/~khayes/Journal_Club/fall2006/Haffer_1969_Sci.pdf. Acesso em 10 jan. 2023

HAMMEN, T. & HOOGHMISTRA, H.. "Neogene and Quaternary development of the Neotropical rain forest: the forest refugia hypothesis and a literature overview". *Earth Science Reviews* 44, p. 147-83, 2000.

HAUCK, Pedro Augusto. Teoria dos Refúgios Florestais e sua relação com a extinção da megafauna Pleistocênica: Um estudo de caso. *Estudos Geográficos (UNESP)*, v. 5, p. 121-134, 2008. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/estgeo/article/view/1021>. Acesso em 10 jan. 2023

JESKEPIERUSCHKA, Vivian, BEHLING, Hermann. "Palaeoenvironmental history of the São Francisco de Paula region in southern Brazil during the late Quaternary inferred from the Rincão das Cabritas core", *The Holocene* vol.22, 2012. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0959683611414930>. Acesso em 10 jan. 2023

JUNGES, Alexandre Luis; SANTOS, Vinicius Yuri dos; MASSONI, Neusa Teresinha; SANTOS, Francineide Amorim Costa. Efeito estufa e aquecimento global: uma abordagem conceitual a partir da física para educação básica. **Experiências em Ensino de Ciências**. Cuiabá. Vol. 13, n. 5 (dez. 2018), p. 126-151, 2018. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/194261/001085731.pdf?sequence=1>. Acesso em 10 jan. 2023

KRAWCHUK, M. A. et al. Global pyrogeography: the current and future distribution of wildfire. **PloS one**, v. 4, n. 4, p. 1-12, 2009. D

KRIEGER FILHO, C. G. et al. Physical model for surface forest fire predictions in Amazonia. In: MEDITERRANEAN COMBUSTION SYMPOSIUM, 7., 2011, Sardinia. Proceedings... Philadelphia: Taylor et Francis, 2012.

LAPOLA, David Montenegro. Consequências das mudanças climáticas globais nos biomas da América do Sul: um modelo de vegetação potencial incluindo ciclo de carbono. 2007. Disponível em: <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/04.25.18.15/doc/publicacao.pdf>. Acesso em 18 fev. 2023.

LAURANCE, W. F. et al. The fate of Amazonian forest fragments: a 32-year investigation. **Biological Conservation**, v. 144, n. 1, p. 56-67, 2011.

LEDRU, M.-P. et al. The last 50,000 years in the Neotropics (Southern Brazil): evolution of vegetation and climate. *Palaeogeography Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 123, p. 239 - 257, 1996.

LE QUÉRÉ, Corinne et al. Global carbon budget 2015. *Earth System Science Data*, v. 7, n. 2, p. 349-396, 2015.

LIU, Y. et al. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Wildfire – climate interactions. **Forest Ecology and Management**, v. 317, n. 1, p. 80-96, 2014.

MASCARENHAS, Márcio Dênis Medeiros, VIEIRA, Lúcia Costa, LANZIERI, Tatiana Miranda; LEAL Ana Paula Pinho Rodrigues, DUARTE, Alejandro Fonseca, HATCH,

Douglas Lloyd. Poluição atmosférica devida a queima de biomassa florestal e atendimentos de emergência por doença respiratória em Rio Branco, Brasil - setembro 2005. **Journal Brazilian Pneumology**, v. 34, n. 1, p. 42-46, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbpneu/a/VP5fHt7dKTqPyTJx5m84vsR/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 02 jan. 2023.

MAYLE, F. E. et al. Vegetation and fire at the Last Glacial Maximum in tropical South America. Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions (ed by F. Vimeux, F. Sylvestre and M. Khodri), pp. 89-112. Springer Netherlands, 2009.

MEGGERS, B. J. Archeological Evidence for the Impact of Mega-Niño Events on Amazonia During the past two millenia. **Climate Change**, v. 28, p. 321-338, 1994.

MENDONÇA, B. A. F. et al. Podzolized soils and paleoenvironmental implications of white-sand vegetation (Campinarana) in the Viruá National Park, Brazil. *Geoderma Regional*, v. 2-3, 2014, 9-20.

MORAES, Denise. **Bioma Amazônia**. Fiocruz. 2008. Disponível em: <http://www.invivo.fiocruz.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=958&sid=2>. Acesso em: 02 jan. 2023.

MORAES, Denise. **Bioma Cerrado**. Vivo Fiocruz. 2008 Disponível em: <http://www.invivo.fiocruz.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=961&sid=2>. Acesso em: 02 jan. 2023.

MORAES, Denise. **Bioma Mata Atlântica**. Vivo Fiocruz. 2008 Disponível em: <http://www.invivo.fiocruz.br/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=964&sid=2>. Acesso em: 02 jan. 2023.

MORAES, Franciele Pereira de; SILVA, Jefferson Feitosa Vieira da; LUCAS, Jéssica de Fátima; DESTRO, Patrícia Gomes; PINTO, Silvio Luiz Cardoso. Conceitos e contribuições da paleoclimatologia com base nos estudos de diferentes fatores. 2018. Disponível em: https://portal.unisepe.com.br/unifia/wp-content/uploads/sites/10001/2018/06/023_conceitos_contribuicoes_paleoclimatologia.pdf. Acesso em 04 fev. 2023.

MORTON, D. C. et al. Understorey fire frequency and the fate of burned forests in southern Amazonia. Philosophical transactions of the Royal Society B, **Biological Sciences**, v. 368, n. 1619, p. 20120163, 2013.

MOTTA, Daniel Souza. Identificação dos fatores que influenciam no comportamento do fogo em incêndios florestais. 2008. Disponível em: <http://devrima.im.ufrj.br:8080/jspui/handle/1235813/2736>. Acesso em 10 jan. 2023.

NOBRE, C. A. et al. Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climate*, 4, 1991, 957-988

NOVELLO, V. F. et al. Two millennia of South Atlantic Convergence Zone variability reconstructed from isotopic proxies. *Geophys. Res. Lett.* 45 (10), 2018, 5045–5051.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. A Paleo Perspective on Global Warming. Disponível em: < <https://www.ncdc.noaa.gov/global-warming>>. Acesso em 07 jan. 2023

PARISIEN, M. A. et al. Moritz Scale-dependent controls on the area burned in the boreal forest of Canada, 1980–2005 *Ecol. Appl.*, 21, 2011, pp. 789-805

PAULIQUEVIS, Theotônio; ARTAXO, Paulo; OLIVEIRA, Paulo Henrique; PAIXAO, Melina.. O papel das partículas de aerossol no funcionamento do ecossistema amazônico. **Mudanças climáticas/artigos**, p. 48-50, 2007. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252007000300018. Acesso em 10 jan. 2023

PAUSAS, J. G. & KEELEY, J. E. A burning story: the role of fire in the history of life. **BioScience**, v. 59, n. 7, p. 593-601, 2009. D

- PEREIRA, Gabriel; CHÁVEZ, Eduardo Salinas; SILVA, Maria Elisa Siqueira. O estudo das unidades de paisagem do bioma Pantanal. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 89-103, 2012. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/dSmK6fsKkLf8xCz_pkBjffFs/abstract/?lang=pt. Acesso em 10 jan. 2023.
- PESSENDA, L. C. R. et al. The evolution of a tropical rainforest/grassland mosaic in southeastern Brazil since 28,000 14C yr BP based on carbon isotopes and pollen records. *Quaternary Research*, 71, 2009, 437–452.
- PINARD, A. ‘Prise de conscience’ and taking charge of one’s own cognitive functioning. *Human Development*, 29, 1999, 341–354.
- PRADO, Darien E.; GIBBS, Peter E. Patterns of species distributions in the dry seasonal forests of South America. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, v.80, p.902-27, 1993. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2399937>. Acesso em 10 jan. 2023
- PRANCE, G. T., The origin and evolution of the Amazon flora. *Interciencia* 3(4): 207-222, 1978
- PRENTICE, I. C. et al. Modeling fire and the terrestrial carbon balance. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 25, n. 3, 2011. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010GB003906>. Acesso em 20 fev. 2023.
- RAY, D. et al. Micrometeorological and canopy controls of fire susceptibility in a Forested Amazon Landscape. **Ecological Applications**, v. 15, n. 5, p. 1664-1678, 2005.
- RIEBEEK, H. The Carbon Cycle. NASA Earth Observatory, 16 jun. 2011. Disponível em: <https://www.earthobservatory.nasa.gov/feature/s/CarbonCycle>. Acesso em: 08 jan. 2023.
- SALGADO-LABOURIAU, M. L. Critérios e técnicas para o Quaternário. São Paulo: Edgard Blücher, 2007.
- SATO, H. et al. Dry corridors opened by fire and low CO₂ in Amazonian rainforest during the Last Glacial Maximum. **Nat. Geosci**, v. 14, p. 578–585, 2021.
- SILVA, S. S. da et al. Dinâmica dos incêndios florestais no Estado do Acre nas décadas de 90 e 00. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 8799–8806.
- SILVEIRA, M. A Floresta Aberta com Bambu No Sudoeste Da Amazônia: Padrões E Processos Em Múltiplas Escalas, Ph.D. thesis, Universidade de Brasília, 2013.
- SHEN, C.C. et al. High-precision and high-resolution carbonate 230Th dating by MC-ICP-MS with SEM protocols. *Geochim. Cosmochim. Acta* 99, 2012, 71–86.
- SMITH, M. & NELSON, B. W. Fire favours expansion of bamboo-dominated forests in the south-west Amazon, *Journal of Tropical Ecology*, 27, 59–64, 2010.
- STEPHENS, B & Keeling, R. The influence of Antarctic sea ice on glacial-interglacial CO₂ variations. *Nature*, 404:171-174, 2000.
- STRÍKIS, N. M. et al. South American monsoon response to iceberg discharge in the North Atlantic. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 115 (15), 2018, 3788–3793.
- SUGUIO, Kenitiro. **Mudanças Ambientais da Terra**. São Paulo: Instituto Geológico, 2008
- TIERNEY, Jessica E., ZHU, Jiang; KING, Jonathan; MALEVICH, Steven B.; HAKIM, Gregory J. e POULSEN, Christopher J. Glacial cooling and climate sensitivity revisited. *Nature*, v. 584, n. 7822, p. 569-573, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2617-x>. Acesso em: 08 jan. 2023
- UHL, C.; KAUFFMAN, J. B. Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the Eastern Amazon. **Ecology**, v. 71, n. 2, 437-449, 1990.
- VASCONCELOS, S. S. et al. Forest fires in southwestern Brazilian Amazonia: estimates of area and potential carbon emissions. **Forest Ecology and Management**, v. 291, p. 199-208, 2013.

- UTIDA, G. et al. Climate changes in Northeastern Brazil from Deglacial to Maghalayan periods and related environmental impacts. *Quat. Sci. Rev.* 250, 2020, 106655.
- VASCONCELOS, S. S. et al. Forest fires in southwestern Brazilian Amazonia: estimates of area and potential carbon emissions. **Forest Ecology and Management**, v. 291, p. 199-208, 2013.
- WANG, X. et al. Millennial-scale precipitation changes in southern Brazil over the past 90,000 years. *Geophys. Res. Lett.* 34 (23), 2007.
- WARD, B. M. et al. Reconstruction of Holocene coupling between the South American Monsoon System and local moisture variability from speleothem $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ records. *Quat. Sci. Rev.* 210, 2019, 51–63.
- WILSON, C. E. et al. Phylogenetic relationships in *Calyptranthes* (Myrtaceae) with particular emphasis on its monophyly relative to *Myrcia* s.l. *Systematic Botany*, v. 41, n. 2, 2021, 378–386.
- WILSON, Oliver J. Mudança florística no hotspot de biodiversidade da Mata Atlântica do sul do Brasil: do último máximo glacial ao final do século XXI. [Volume 264](#), 15 de julho de 2021.