



Ano XXIX - Vol. XXIX - (1): Janeiro/Dezembro - 2025

SUBSÍDIOS À DISCUSSÃO SOBRE O TEMA MUDANÇAS CLIMÁTICAS

SUBSIDIES FOR THE DISCUSSION ON
THE TOPIC OF CLIMATE CHANGE

SUBSIDIOS PARA LA DISCUSIÓN SOBRE
EL TEMA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Lucivânia Jatobá¹

0000-0003-3041-0126
lucivanio.oliveira@ufpe.br

Alineaurea Florentino Silva²

0000-0003-1744-1593
alineaurea.silva@embrapa.br

1 Doutor em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3041-0126>. E-mail: lucivanio.oliveira@ufpe.br.

2 Doutora em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela UFPB. Pesquisadora da Embrapa Semiárido. Petrolina, Pernambuco, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1744-1593>. E-mail: alineaurea.silva@embrapa.br

Artigo recebido em novembro de 2024 e aceito para publicação em abril de 2025.



Este artigo está licenciado sob uma Licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional.

RESUMO: As mudanças climáticas são fenômenos naturais e antropogênicos que afetam os padrões climáticos globais ao longo do tempo. No Quaternário, essas mudanças foram impulsionadas por fatores astronômicos, enquanto, no período moderno, a ação humana tem sido determinante, principalmente devido à emissão de gases de efeito estufa. Este artigo discute as oscilações climáticas, como o El Niño-Oscilação Sul, a Oscilação Decadal do Pacífico e a Oscilação do Atlântico Norte, e suas influências sobre eventos climáticos extremos, como secas, tempestades e mudanças na produção agrícola. Também são abordados o efeito estufa e o papel dos principais gases na retenção de calor, incluindo o dióxido de carbono, metano e óxido nitroso. Além disso, destaca-se a importância das florestas e oceanos como sumidouros naturais de carbono, fundamentais para a regulação climática. O estudo conclui que a compreensão das forçantes climáticas e seus impactos é essencial para a formulação de estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Efeito estufa. Oscilações climáticas. Aquecimento global. Gases de efeito estufa.

ABSTRACT: Climate change encompasses both natural and anthropogenic alterations in global climate patterns over time. During the Quaternary, these changes were driven by astronomical factors, whereas in the modern period, human activities have played a decisive role, primarily due to greenhouse gas emissions. This paper discusses climate oscillations, such as El Niño-Southern Oscillation, Pacific Decadal Oscillation, and North Atlantic Oscillation, and their influence on extreme weather events, including droughts, storms, and shifts in agricultural production. Additionally, it examines the greenhouse effect and the role of key gases, including carbon dioxide, methane, and nitrous oxide, in heat retention. The study also highlights the importance of forests and oceans as natural carbon sinks, essential for climate regulation. The findings underscore the necessity of understanding climate drivers and their impacts to develop effective mitigation and adaptation strategies.

Keywords: Climate change. Greenhouse effect. Climate oscillations. Global warming. Greenhouse gases.

RESUMEN: Los cambios climáticos son fenómenos naturales y antropogénicos que afectan los patrones climáticos globales a lo largo del tiempo. En el Cuaternario, estos cambios fueron impulsados por factores astronómicos, mientras que en el período moderno, la acción humana ha sido determinante, principalmente debido a la emisión de gases de efecto invernadero. Este artículo discute las oscilaciones climáticas, como El Niño-Oscilación del Sur, la Oscilación Decadal del Pacífico y la Oscilación del Atlántico Norte, y sus influencias sobre eventos climáticos extremos, como sequías, tormentas y cambios en la producción agrícola. También se abordan el efecto invernadero y el papel de los principales gases en la retención de calor, incluyendo el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso. Además, se destaca la importancia de los bosques y océanos como sumideros naturales de carbono, fundamentales para la regulación climática. El estudio concluye que la comprensión de los factores climáticos y sus impactos es esencial para la formulación de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático.

Palabras clave: Cambio climático. Efecto invernadero. Oscilaciones climáticas. Calentamiento global. Gases de efecto invernadero.

INTRODUÇÃO

O autor não teve, com este artigo, outro propósito além o de trazer à baila, de forma didática, sintética, alguns aspectos gerais relacionados ao tema que hoje tem gerado um número incontável de Trabalhos de Conclusão de Curso, Dissertações e Teses de Doutorado em praticamente todos os centros acadêmicos do mundo. As mudanças climáticas hodiernas e pretéritas são o objeto de análise e de interpretação neste modesto artigo, que foi pensado, inicialmente, para ser um material instrucional de base para debates em cursos de pós-graduação (mestrado e doutorado) de caráter interdisciplinar. Há ainda muita discussão e discordias, até, sobre a existência ou não de uma mudança climática global em curso, pelo menos no tocante ao que estaria causando-a. Seria o efeito da dinâmica das relações Terra-Sol ou o resultado de ações antrópicas que fizeram aumentar bastante alguns gases do Efeito Estufa, ou seriam o fruto da conjugação dessas duas forçantes climáticas? Essas questões não são tão fáceis de serem respondidas, sobretudo por dizerem respeito a um fenômeno natural extremamente complexo como é o clima. Aqui é feita uma tentativa de síntese das principais contribuições teóricas relacionadas às alterações climáticas em pauta. Buscou-se também apresentar um resumo de temas como Mudanças Climáticas, Oscilações Climáticas, Aquecimento Global, Efeito Estufa, Regime de chuvas, Paleoclimas do Quaternário entre outros e inter-relação entre alterações climática e produção vegetal.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS, OSCILAÇÕES CLIMÁTICAS E AQUECIMENTO GLOBAL

As mudanças climáticas englobam alterações de longo prazo nos padrões de temperatura e precipitações na baixa atmosfera da Terra, que podem ocorrer de forma natural ou devido a influências humanas. Os efeitos que os cientistas previram há muito tempo, como resultado das mudanças climáticas globais estão ocorrendo agora, como a perda de gelo marinho, a elevação acelerada do nível do mar e ondas de calor mais longas e intensas (NASA, s/d).

Não são de agora as ocorrências de mudanças e alterações climáticas. Inúmeras evidências encontradas na superfície terrestre (sedimentológicas e geomorfológicas) testemunham essas radicais transformações qualitativas do sistema climático global. Ao longo do Quaternário, por exemplo, o Brasil, como ocorreu em outras partes das Américas e do mundo, atravessou prolongadas fases de mudanças e flutuações climáticas que implicaram em profundas alterações das paisagens, como decorrência da relação astronômica Terra-Sol.

Bases conceituais

Desde o século XIX, contudo, as atividades humanas, especialmente a queima de combustíveis fósseis, têm sido o principal motor dessas mudanças, especialmente no quadro térmico, levando a variações significativas nos sistemas climáticos globais.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) considera “mudança climática” como uma variação estatisticamente significativa nas médias ou na variabilidade de parâmetros climáticos, que persiste por um período prolongado, tipicamente décadas ou mais. Essa definição abrange tanto as variações decorrentes de processos naturais quanto aquelas resultantes de atividades humanas.

É importante salientar que a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) distingue entre mudanças climáticas atribuídas a atividades humanas que alteram a

composição da atmosfera e a variabilidade climática de origem natural, às vezes proporcionada por uma grande erupção vulcânica.

As oscilações climáticas, que se manifestam numa escala temporal menor, às vezes ao longo de décadas ou século, acarretam diversas modificações ambientais, inclusive nos biomas e nas atividades agrícolas.

As oscilações mencionadas podem receber influências por fatores internos e externos ao sistema climático, incluindo processos atmosféricos, oceânicos e interações com a biosfera. Essas oscilações podem ser influenciadas por fatores internos e externos ao sistema climático, neste caso incluindo processos atmosféricos regionais, oceânicos e interações com a biosfera.

As oscilações climáticas podem ser efeito de: variações na taxa de energia solar (Lean e Rind, 1998), interações entre o ar atmosférico e a biosfera (Pielke *et al.*, 1998) ou alterações na circulação oceânica global (Rahmstorf, 2002).

Três exemplos de fenômenos da hidrosfera que se enquadram na categoria das oscilações climáticas podem ser citados: o El Niño/La Niña-Oscilação Sul; Oscilação Decadal do Pacífico e a Oscilação do Atlântico Norte. El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é um processo geofísico que ocorre no Oceano Pacífico Tropical e é um exemplo admirável de interação oceano-atmosfera que interfere no clima global e regional (Molian, 2017).

Algumas consequências das alterações climáticas

Diversos são os impactos das oscilações climáticas sobre a superfície terrestre. Entre os principais estão: eventos pluviométricos extremos, secas catastróficas, alterações profundas na circulação atmosférica e mudanças consideráveis na produção de alimentos entre outros. Os habitats naturais fundamentais para a biodiversidade podem apresentar, também, marcas de impactos dessas oscilações para a biota.

As alterações climáticas ou os eventos climáticos extremos, como secas e tempestades, influenciam bastante as atividades agrícolas. O mundo vegetal tem uma relação direta e paradoxal com as mudanças climáticas, sofrendo com elas por um lado e atenuando por outro. Com mais de 2.651 espécies catalogadas em banco de informações de vegetais (Alelo Vegetal), é quase impossível determinar para cada um desses componentes vegetais as reações ou interferências diretas do clima (Jatobá; Silva, 2017). Muitos estudos têm sido realizados com resultados surpreendentes, mostrando a influência de padrões climáticos sobre o comportamento vegetal, porém as inúmeras variações das condições de solo e relevo aumentam mais ainda as variações termopluviométricas, promovendo resultados a cada dia distintos nos agroecossistemas (Silva; Jatobá, 2017).

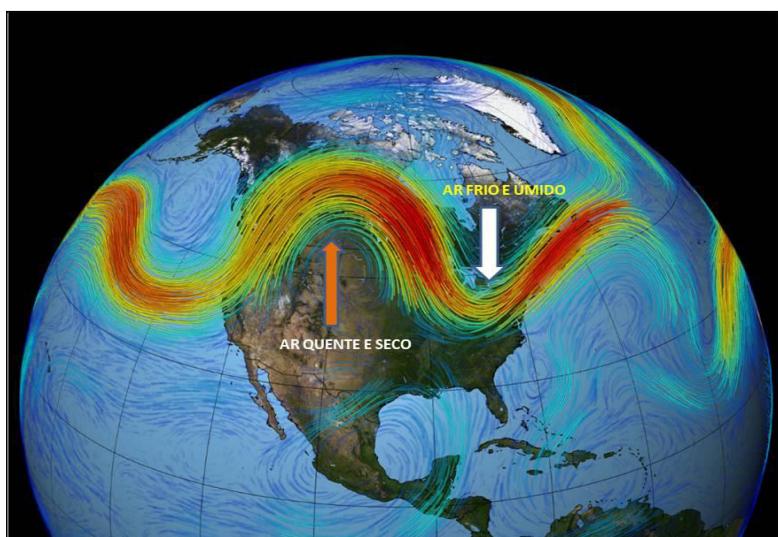
A ação antrópica também pode resultar em produção vegetal inesperada, de acordo com as práticas de manejo adotadas, distanciando cada vez mais a previsibilidade esperada em um sistema de produção vegetal. A importância da preservação das florestas tropicais é indiscutível para minimizar os efeitos das mudanças climáticas e a ampliação do número de SAFs (Sistemas Agroflorestais) ou cultivos simultâneos. mostram a credibilidade que se tem nesse fato. Porém, o arranjo entre as plantas que se estabelece em um espaço produtivo como uma horta ou outro tipo de vegetação em agroecossistemas pode determinar uma produção irrigória para o esforço e energia dispendidos para tal.

As plantas respondem de maneira distinta aos diferentes estímulos bióticos e abióticos, sendo quase impossível controlar os efeitos de momentos de déficit hídrico ou elevação de temperatura, sem que sejam

observadas as práticas agrícolas adequadas para reduzir os danos causados por situações de estresse como as mencionadas. O uso da cobertura morta (mulch) ou cultivos intercalares podem ser práticas simples que melhoraram as respostas das plantas, tornando-as mais resilientes às condições estressantes.

Conexões entre hidrosfera e oscilações climáticas

Um fato interessante que demonstra as conexões entre hidrosfera, oscilações climáticas e seus efeitos sobre a circulação atmosférica geral ocorreu entre 2013 e 2014 no Hemisfério Norte. A Corrente de Jato (*Jet Stream*) (Figura 1) adquiriu uma forma bastante extrema e “anormal” sobre a América do Norte e Europa



Fonte: <https://www.tempo.com/noticias/divulgacao/o-que-sao-correntes-de-jato.html>.

Figura 1. Representação do Jet Stream sobre a América do Norte.

As oscilações verificadas no *Jet Stream* podem proporcionar ondas de calor, ondas de frio e tempestades com evento extremo de precipitação. No exemplo hipotético esboçado na Figura 1, observa-se uma forte ondulação *Jet Stream*, que poderia gerar onda de calor até no Canadá e parte central dos Estados Unidos e onda de frio na parte leste e nordeste da América do Norte, com fortes nevascas.

A corrente de jato é mantida, no hemisfério norte, pelo ar polar setentrional e pelos ventos tropicais ao sul, o que causa certo meandramento mais ou menos acentuado no sistema atmosférico em seu deslocamento, definindo tempestades de superfície, as “trilhas de tempestade”, remodelando a precipitação em grandes regiões.

Os furacões e os eventos extremos de precipitação passarão a ser mais intensos num cenário de mudanças climáticas induzidas pelo aumento do Efeito Estufa (Dias, 2011).

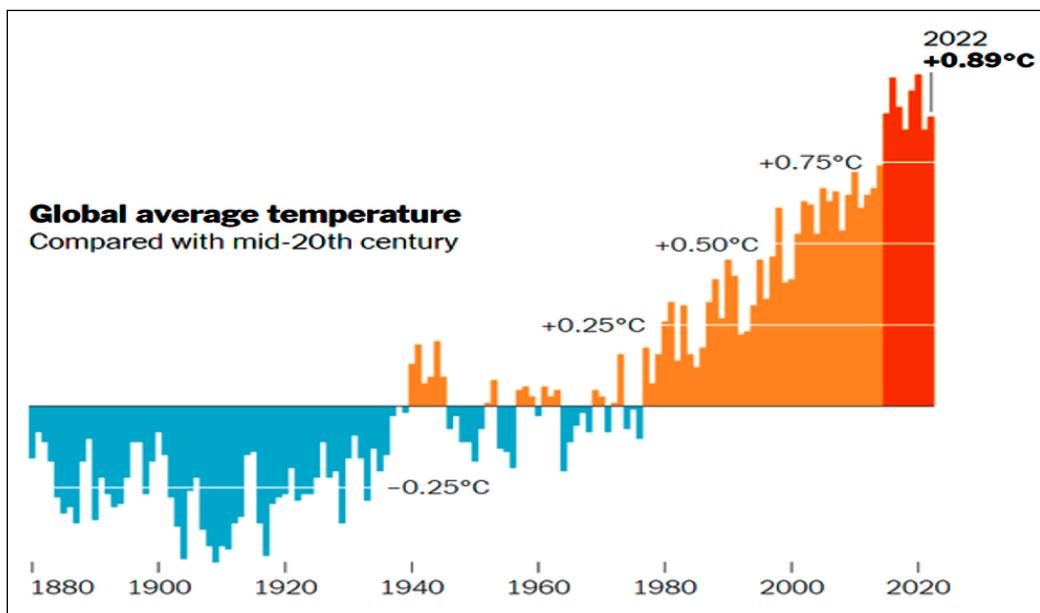
As mudanças climáticas interferem na circulação atmosférica em diversas escalas, incluindo o Jet Stream, que se verifica em altitudes mais elevadas. De forma bem sintética, é possível afirmar que tais mudanças podem: propiciar enfraquecimento e meandramento do Jet Stream; induzir deslocamento para Polos da Corrente de Jato e ainda aumento dos casos de eventos extremos meteorológicos.

Variações no campo térmico zonal

O aquecimento global refere-se ao aumento contínuo das temperaturas médias da Terra, tanto na atmosfera quanto nos oceanos, principalmente devido às atividades humanas que elevam as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera. Esses gases, tais como o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4), retêm o calor irradiado pela superfície terrestre, intensificando o efeito estufa natural e resultando no aumento das temperaturas globais.

Diversos fatores estáticos e dinâmicos naturais controlam o quadro térmico de uma região, dos quais se destacam: a radiação solar; a advecção de massas de ar; o aquecimento diferencial das terras e das águas, em face das diferenças de calor específico da matéria; correntes oceânicas, compartimentos e feições e altitudes do relevo e a posição astronômica da localidade.

As alterações do quadro térmico (Figura 2), a intensificação de eventos extremos, o derretimento de geleiras, que poderá definir movimentos eustáticos positivos, são algumas das principais consequências desse fenômeno, impulsionado principalmente pelas emissões de gases de efeito estufa. O tema vem ocupando amplo espaço na academia, sobretudo pelos efeitos advindos, necessitando, portanto, uma ampla e vertical abordagem de forma interdisciplinar.



Fonte: NASA.

Figura 2. Temperatura média global.

Para essa nova fase de aquecimento global são apontadas, por vários estudiosos das geociências, (Broecker; Donk, 1970; Barry; Chorley, 2013) algumas prováveis causas: 1. emissões de gases de efeito estufa provenientes de atividades antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento generalizado, especialmente na América do Sul (destruição das Florestas Latifoliadas Perenifólias e Subperenifólias Equatoriais e Tropicais; 2. variações na atividade solar; 3. intensificação do vulcanismo explosivo; 4. modificações nas correntes oceânicas e nas anomalias de temperaturas da superfície marinha. Vê-se, portanto, que se trata de uma rede de conexão bastante complexa entre as diversas forçantes climáticas.

O aumento de aproximadamente 1 grau Celsius na temperatura média global da superfície, que ocorreu desde a era pré-industrial (1850-1900 no registro da NOAA), pode parecer pequeno, mas significa um aumento significativo no calor acumulado (<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>).

Na Troposfera terrestre existem compostos químicos que absorvem e emitem, também, radiação infravermelha. Esse fato, bastante estudado na atualidade como objeto de investigação em dissertações e teses de doutorado, contribui significativamente para o efeito estufa, que é um processo natural de aquecimento da superfície terrestre. Se por acaso não existisse o efeito estufa a média térmica do planeta seria superior a 33 °C, o que inviabilizaria diversas formas de vida como as conhecemos na atualidade.

O EFEITO ESTUFA

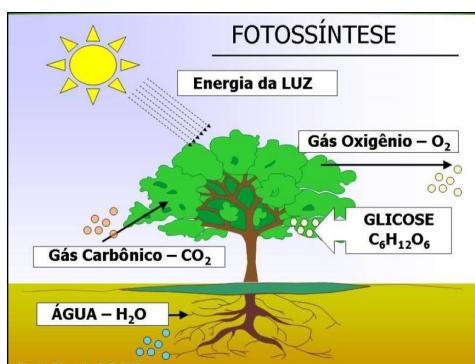
Um dos temas que mais vêm recebendo atenção das geociências, particularmente a Climatologia, é o Efeito Estufa. Este fenômeno necessário à sobrevivência dos seres vivos foi descoberto em 1824 por Joseph Fourier, contudo estudos mais verticais sobre tal efeito e as alterações climáticas emergiram no final do século XIX, com os trabalhos do cientista sueco Svante Arthenius.

Esse efeito é uma resposta à presença de vários gases na atmosfera. Os principais gases do efeito estufa (GEE) são: Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), Gases Fluorados e Vapor d'água.

O sequestro de Dióxido de Carbono

O CO₂, um dos grandes vilões do aquecimento global, origina-se da queima de combustíveis fósseis, desmatamentos e inclusive a respiração dos seres vivos. O CO₂ é produzido naturalmente por processos como a respiração celular e a decomposição de matéria orgânica, mas sua concentração atmosférica tem aumentado significativamente devido a atividades humanas, principalmente pela queima de combustíveis fósseis e pelo desmatamento. Esse gás permanece por séculos na atmosfera.

O sequestro do CO₂, algo extremamente necessário para uma provável minimização do aquecimento global, se dá por processos naturais ou artificiais que capturam ou armazenam esse gás. Um desses importantes processos é a fotossíntese. As plantas absorvem CO₂ durante a fotossíntese, transformando-o em biomassa (folhas, caules, frutos), conforme se pode ver esquematicamente representada na Figura 3.



Fonte: <https://www.aease.org.br/?p=1518>.

Figura 3. A fotossíntese.

Preservação das florestas é condição sine qua non para a redução de CO₂ na atmosfera, tendo em vista que estas exercem um serviço ecossistêmico fundamental. A maior parte do carbono absorvido é armazenada no tronco e no caule das árvores. As folhas armazenam também CO₂, mas de forma temporária. Outra parte do sequestro do CO₂ é transportada para as raízes, ficando lá armazenado esse composto químico.

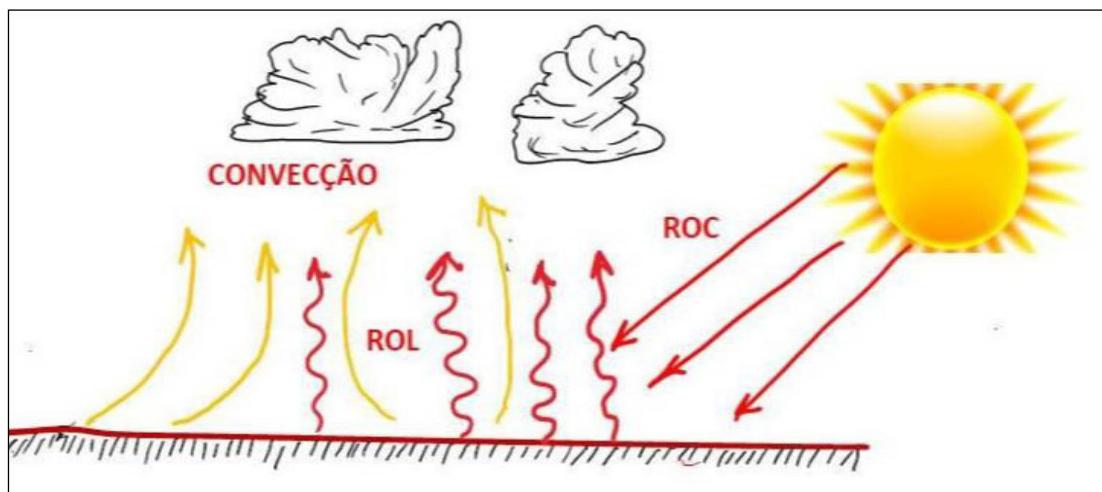
A maior parte do carbono absorvido pelas espécies vegetais é armazenada no tronco e no caule das árvores. As folhas acumulam também CO₂, mas de forma temporária. Outra parte do sequestro do CO₂ é transportada para as raízes, ficando lá recolhido esse composto químico.

As árvores mais antigas de uma floresta latifoliada equatorial, por exemplo, já conseguiram praticamente atingir um tamanho máximo, estabilizando, assim, o seu armazenamento de carbono. Contudo, permanecem sequestrando o CO₂. Essas árvores executam um serviço ambiental destacada no ecossistema, quando armazena uma grande quantidade de dióxido de carbono e fornecem vapor d'água (<https://www.aease.org.br/?p=1518>).

A fotossíntese representa a conversão de energia luminosa em energia química para a formação de compostos orgânicos pelos seres fotossintetizantes d'água à atmosfera.

O pesquisador necessita conhecer como se processa o efeito estufa. Resumidamente, pode-se afirmar que:

- a) A superfície terrestre recebe uma grande quantidade de radiação solar de ondas curtas. Uma parte razoável desse fluxo energético é absorvida pela superfície do planeta.
- b) A radiação de ondas curtas (ROC), ao atingir os diversos alvos da superfície terrestre, transforma-se qualitativamente em radiação de ondas longas (ROL) ou radiação infravermelha, uma espécie de energia térmica.
- c) A radiação de ondas longas (ROL) é transferida para o ar atmosférico, aquecendo-o de baixo para cima (Figura 4). Os gases de efeito estufa absorvem parte dessa radiação de ondas longas e a reemitem em todas as direções, aquecendo, por conseguinte, a superfície terrestre e a atmosfera do planeta.



Fonte: Elaborado por Lucivânia Jatobá.

Figura 4. Representação esquemática das relações entre as forçantes climáticas e o aquecimento do ar.

Os raios solares atravessam a atmosfera sem que o ar absorva uma quantidade apreciável de calor (propriedade conhecida como diatermia). Por outro lado, a radiação solar (ROC) é absorvida pela superfície terrestre, a qual, por sua vez, aquece por contato, as camadas inferiores da atmosfera (ROL) e estas logo transmitem seu calor às camadas mais altas, em virtude das correntes de convecção que se estabelecem. Desta maneira, em geral, as camadas da atmosfera se encontram com maior temperatura próximo da superfície terrestre. A temperatura do ar, em condições normais, é inversamente proporcional à altitude e `as faixas latitudinais.

Preservação das florestas é condição *sine qua non* para a redução de CO₂ na atmosfera, tendo em vista que estas e as massas oceânicas são os principais fatores de sequestro do CO₂. As árvores das florestas, sobretudo as latifoliadas tropicais e equatoriais, armazenam o CO₂. A maior parte do carbono absorvido é armazenada no tronco e no caule das árvores. As folhas armazenam também CO₂, mas de forma temporária. Outra parte do sequestro do CO₂ é transportada para as raízes, ficando lá armazenado esse composto químico.

Os oceanos sequestram cerca de um quarto do CO₂ que é emitido ao longo do ano. Este gás dissolve-se na água, originando o ácido carbônico que se converte em carbonato de cálcio. O oceano é o segundo maior sumidouro de carbono do nosso planeta, depois da camada rochosa da Terra (rochas sedimentares na terra e no fundo do mar). Ele contém cerca de 40.000 bilhões de toneladas de carbono, a maior parte dissolvida na água do mar (<https://worldoceanreview.com/en/wor-8/the-role-of-the-ocean-in-the-global-carbon-cyclee/how-the-ocean-absorbs-carbon-dioxide/>).

Segundo estimativas conhecidas, cerca de 150 bilhões de toneladas de carbono, na forma de dióxido de carbono, movem-se entre o oceano e a atmosfera a cada ano.

De acordo com Watson (2001), os solos possuem grande importância no ciclo biogeoquímico do carbono, pois esse compartimento estoca aproximadamente quatro vezes mais Carbono do que a biomassa vegetal e mais que três vezes do que a atmosfera.

Solo e armazenamento de CO₂

O solo desempenha um papel essencial como prestador de serviços ecossistêmicos. a exemplo do CO₂, colaborando sensivelmente para a mitigação das mudanças climáticas e a manutenção da fertilidade dos ecossistemas continentais.

O solo age como um dos maiores reservatórios de Carbono do planeta, armazenando mais do que a atmosfera e a vegetação combinadas. O Carbono armazenado se dá principalmente na forma de matéria orgânica do solo, resultante da decomposição de resíduos vegetais e organismos dessa formação superficial da crosta terrestre.

O sequestro do Carbono pelo solo depende de fatores como a cobertura vegetal, práticas de manejo e classes de solo (Sleutel et al. 2006). No Brasil, possivelmente em razão da dimensão continental e grande diversidade de uso e cobertura da terra nos diferentes biomas, são poucos os dados voltados para estimativas de estoques de Carbono (Oliveira; Reatto; Llacer, 2015).

Promover estratégias para maximizar o sequestro de carbono pelos solos é fundamental para enfrentar os desafios das mudanças climáticas e garantir a segurança alimentar no planeta.

Gás Metano

O metano (CH_4) é outro gás do efeito estufa (GEE) potente que desempenha um papel destacado no aquecimento global. Embora esteja presente em concentrações muito menores na atmosfera, em comparação ao dióxido de carbono (CO_2), o metano é bem mais eficaz que este na colaboração para o aquecimento global.

As duas principais fontes naturais fornecedoras de metano são as áreas pantanosas, as zonas úmidas e os espaços ocupados pelo solo *permafrost*, no mundo periglacial que, quando ocorre o degelo, libera gases como o CO_2 e CH_4 (metano). Estes gases ficam aprisionados no solo referido até o momento em que acontece o degelo.

A formação de metano (CH_4) a partir das atividades agrárias acontece principalmente por processos microbiológicos em ambientes anaeróbicos, ou seja, naqueles em que há ausência de oxigênio. As principais fontes agrícolas de metano investigadas incluem cultivo de arroz inundado, digestão entérica de ruminantes, manejo de esterco e decomposição de resíduos orgânicos.

Atividades antrópicas também colaboram com o aumento do metano na atmosfera planetária. Um exemplo desse fato são as atividades agrícolas, como é o caso do estrume. Além deste, podem ser mencionados os resíduos orgânicos em aterros sanitários (lixões) e queima da biomassa.

O cultivo de arroz do arroz irrigado e em áreas de inundação propicia um ambiente anaeróbico, favorecendo a atividade de microrganismos referidos. Assim, quanto mais tempo o solo permanece inundado, sobretudo em várzeas dos rios, maior será a produção do gás metano. Práticas como drenagem intermitente dos arrozais podem reduzir significativamente a emissão de CH_4 .

Óxido nitroso

O Óxido nitroso (N_2O) origina-se a partir do emprego de fertilizantes nitrogenados, a queima de biomassa e a indústria química. O potencial de aquecimento é bem elevado. O uso excessivo de fertilizantes nitrogenados promove a produção de N_2O por microrganismos no solo.

Por último, ressalta-se a existência do vapor d'água como um dos principais fatores do Efeito Estufa natural que atua como um amplificador das mudanças climáticas.

Vapor d'água na Atmosfera terrestre e Aquecimento Global

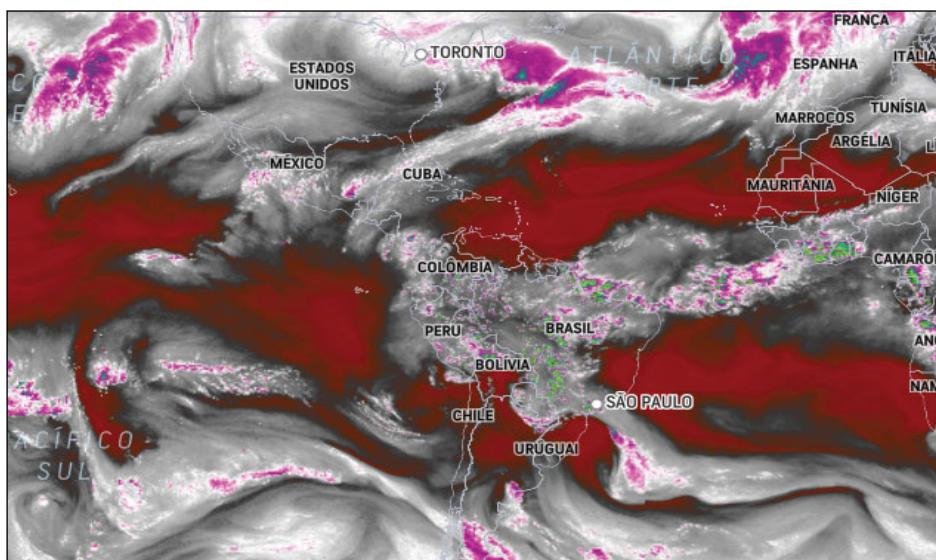
O vapor d'água é o gás de efeito estufa mais abundante na atmosfera e exerce um papel crucial no sistema climático da Terra. Diferentemente do dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4), o vapor d'água tem um tempo de permanência não muito prolongado na atmosfera, sendo constantemente reciclado pelo Ciclo das Águas por meio dos processos físicos de evaporação e condensação.

O processo pelo qual as moléculas de água na superfície líquida ou nos solos adquirem energia, mediante a radiação solar, e passam para o estado de vapor é denominado de evaporação.

O vapor de água atmosférico é um constituinte importante por interferir na dinâmica e na química da atmosfera, agindo na distribuição da temperatura, participando ativamente dos processos de absorção e emissão de calor sensível na atmosfera e por atuar na transferência

de calor latente entre as regiões. Além disso, destaca-se sua contribuição no efeito estufa, sendo este seu principal causador. Além disso, é o único constituinte atmosférico que muda de estado físico, sendo responsável pela formação e evolução das nuvens e por seus fenômenos atmosféricos importantes como a precipitação, sendo ela na forma líquida ou sólida (Wanderley; Justino, 2015).

A maior ou menor quantidade de vapor d'água na baixa atmosfera irá determinar os diversos tipos climáticos, algo marcante, por exemplo, no Nordeste brasileiro. Este fato é bem observado, também, no mundo tropical, nas faixas das baixas e médias latitudes. (Figura 5). Na figura verifica-se a variação de vapor d'água nas faixas latitudinais referidas. Nas áreas que surgem com uma tonalidade avermelhada, o ar está com baixo teor de vapor d'água, enquanto as manchas em tonalidades de cinza indicam sistemas atmosféricos com alto teor de umidade, como é o caso da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que estava avançando sobre a parte setentrional do Nordeste do Brasil. Outro sistema atmosférico está visível na imagem. Trata-se da Zona de Convergência do Atlântico Sul, que se desenvolveu da Amazônia até São Paulo, estendendo-se pelo Atlântico Sul. Os ventos de oeste estavam se deslocando do Caribe até a Europa.



Fonte: <https://www.accuweather.com/pt/br/national/satellite-wv>.

Figura 5. As variações do vapor d'água em 20/02/2025.

A quantidade de energia térmica que é necessária para que uma dada substância mude de fase (de líquida para vapor, por exemplo), sem alterar a temperatura é conhecida como calor latente. Sabe-se que o calor latente desempenha um papel destacado nas mudanças climáticas. Durante a condensação em nuvens, essa energia é liberada na atmosfera, aquecendo o ar ao redor.

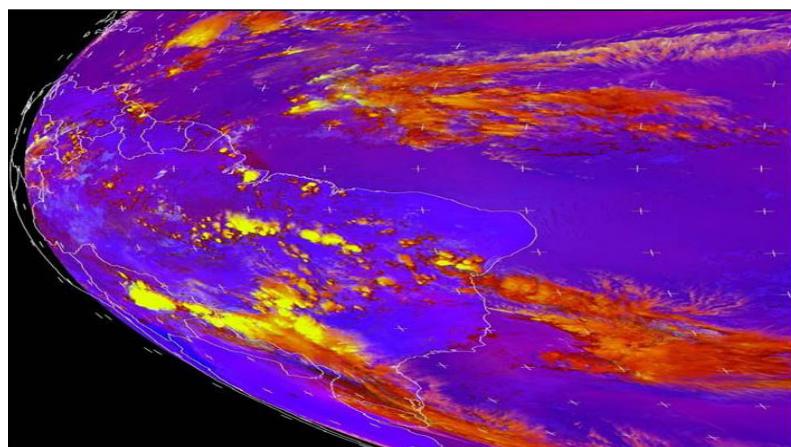
O calor latente liberado pela condensação do vapor d'água na atmosfera é uma das principais fontes de energia para tempestades, furacões e ciclones.

À medida que o ar sobe, carregado de vapor d'água, se resfria. Quando a temperatura atinge o ponto de orvalho, o vapor d'água começa a se condensar em pequenas gotículas ao redor de partículas suspensas no ar (núcleo de condensação), como poeira, sal marinho ou poluentes. Isso irá formar as nuvens.

Pode-se dizer que há um efeito estufa das nuvens. Estas absorvem e reemitem radiação infravermelha pela superfície do planeta, colaborando para o efeito referido. Isso é particularmente intenso quando o céu de uma determinada área está recoberto por nuvens de grande desenvolvimento vertical (cúmulo-nimbos-Cb). Isso justifica o calor que precede um evento de chuvas de caráter convectivo que acontecem quando da passagem, por exemplo, da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ou de um complexo convectivo de mesoescala sobre o Semiárido do Nordeste brasileiro.

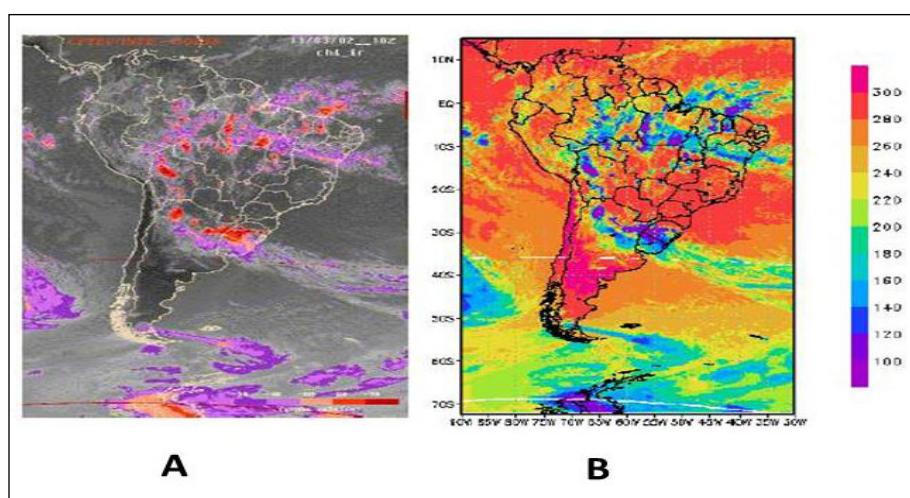
Paradoxalmente, essas nuvens de grande desenvolvimento vertical podem reduzir a quantidade de radiação de onda curta emitida pelo Sol (Figura 6). As tonalidades em azul representam áreas com menos nuvens do que as áreas em marrom e amarelo. Essa distribuição de massas de nuvens decorre da ação de sistemas atmosféricos diversos. Há massa de ar, como se verifica no interior do Nordeste brasileiro, que gera estabilidade atmosférica que inibe a formação de nuvens.

Há uma relação que precisa ser salientada e que diz respeito à Radiação de Onda Longa (ROL) e a cobertura de nuvens. As Figuras 7 e 8 deixam muito clara a interação entre essas duas forçantes climáticas.



Fonte: EUMETSAT (26/10/2020).

Figura 6. Nuvens de desenvolvimento vertical nos dois hemisférios terrestres.



Fonte: INPE.

Figura 7. Comparação entre a cobertura de nuvens e os valores de ROL, em 02 de março de 2022.

No dia 02 de março de 2011, como exemplificação, a América do Sul estava com uma cobertura de nuvens de desenvolvimento vertical, sob a forma aproximada de arco, que ia desde o oceano Atlântico até as regiões Nordeste, Norte e Sul do Brasil, além do Uruguai. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) estava ao largo da costa setentrional do país. A parte central do Brasil se encontrava com ar seco, numa situação de estabilidade atmosférica. Comparando a ROL com a cobertura de nuvens, verifica-se que as áreas de maior massa de nuvens são as que têm menores valores de ROL e vice-versa, portanto as nuvens servem como parâmetro para estimativas de ROL.

As emissões dos demais gases do efeito estufa acabam elevando a concentração do vapor d'água na atmosfera, podendo, desse modo, colaborar para o aquecimento do ar na troposfera terrestre.

ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE AS MUDANÇAS PALEOCLIMÁTICAS NO QUATERNÁRIO: AS LIÇÕES DO PASSADO

O passado geológico poderá ser uma chave para a compreensão do presente e do futuro. Os climas do passado são estudados por uma geociência intitulada Paleoclimatologia. Ela analisa as forçantes climáticas e suas variações ao longo de milhares a milhões de anos. É um estudo complexo que demanda do pesquisador conhecimentos de Paleogeografia, Geologia Geral, Geomorfologia, Sedimentologia e Paleobotânica e Física. Esse estudo baseia-se, sobretudo, nos registros sedimentológicos existentes nos depósitos correlativos, nas paleoformas de relevo, nos sedimentos marinhos, nos testemunhos existentes nas geleiras, na Arqueologia etc. Os registros paleoclimáticos auxiliam na reconstituição das paleotemperaturas, composição da atmosfera, regimes de chuvas pretéritos, entre outros.

Os registros paleoclimáticos permitem constatar que o planeta passou por diversos períodos de aquecimento e resfriamento globais, como os períodos glaciais e o Ótimo Climático do Holocene. A Paleoclimatologia fornece um contexto fundamental para entender os impactos do aquecimento global moderno e aprimorar modelos climáticos para prever cenários futuros.

Mudanças climáticas do Quaternário

O Período Quaternário, que corresponde aos últimos 2,6 milhões de anos Antes do Presente (AP), notabilizou-se por intensas mudanças e flutuações climáticas, alternadas por fases de resfriamento global e fases de aquecimento global. Essas alterações climáticas de grande porte repercutiram na cobertura vegetal, nos processos erosivos e deposicionais continentais, nos regimes fluviais, na cinemática das correntes oceânicas, nas anomalias térmicas da superfície marinha e principalmente nos movimentos eustáticos.

Esse período geológico foi dividido em duas épocas: Pleistoceno e Holocene. A primeira vai de 2,58 milhões anos até 11,7 milhares de anos. A segunda começa há 11,7 milhares de anos até o Presente. O Pleistoceno apresentou grandes mudanças climáticas globais, enquanto o Holocene se destacou por uma maior estabilidade dos climas. É nesta época que a influência antrópica se fez mais marcante, chegando a propiciar modificações consideráveis nas condições climáticas ambientais.

Muitas lições sobre a dinâmica da natureza, sobretudo as condições climáticas, podem ser extraídas das marcas que testemunham alterações no ambiente ao longo do Quaternário.

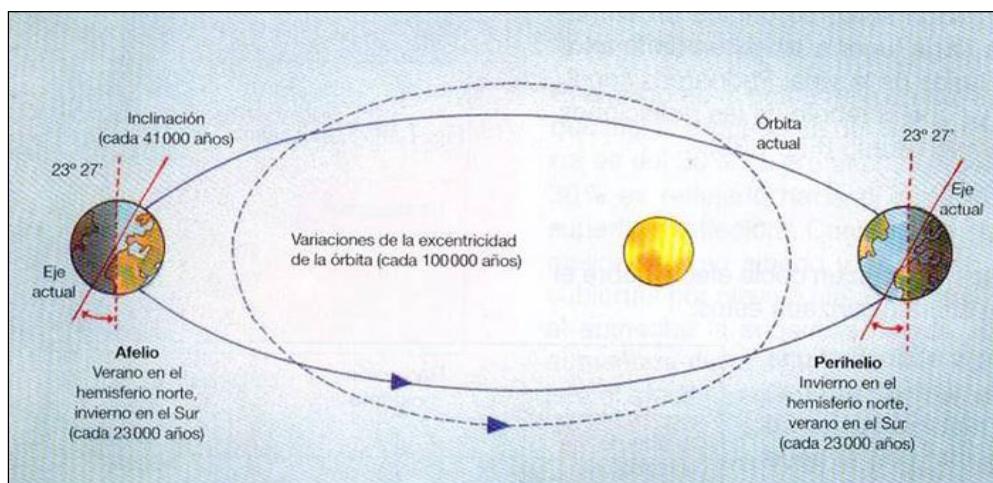
Fases glaciais e interglaciais do Quaternário

As fases glaciais e interglaciais foram uma decorrência de alterações na distribuição da Radiação de Onda Curta (ROC), encaminhada pelo Sol. As fases glaciais deixaram como consequências principais: o avanço de vastas geleiras sobre a América do Norte, Europa, Ásia e América do Sul (nas áreas mais elevadas do dobramento andino); movimentos eustáticos negativos (fases de regressão marinha); e mudanças na biota. Ao longo das fases de aquecimento global ocorreram degelo dos espaços mais frios continentais, modificações fitogeográficas notáveis no mundo das baixas latitudes, com avanço de florestas, movimentos eustáticos positivos (transgressões marinhas) e expansão da biodiversidade.

As variações periódicas na órbita da Terra e na inclinação do seu eixo, que influenciam a quantidade e a distribuição da radiação solar recebida pelo planeta, numa escala temporal da ordem de milhares de ano são conhecidas como Ciclo de Milankovitch. Essas mudanças astronômicas desempenharam um papel importante no controle das variações climáticas durante o Quaternário, especialmente no regime de glaciações e nas fases interglaciais.

Os Ciclos de Milankovitch são estudados a partir da análise da excentricidade, obliquidade e precessão dos equinócios. A variação da excentricidade refere-se à variação na forma da órbita terrestre, que oscila entre uma trajetória quase circular e uma ligeiramente elíptica, durante 100.000 anos (Figura 8), a obliquidade corresponde à variação na inclinação do eixo da Terra em relação ao plano orbital (varia entre $\sim 22,1^\circ$ e $\sim 24,5^\circ$), com duração de 41.000 anos. E, por último, a precessão dos equinócios, relacionada à oscilação do eixo da Terra, semelhante a um pião que gira (tem a duração que varia de 19.000 a 23.000 anos).

As mudanças climáticas no Quaternário foram determinadas por fatores naturais, tais como os Ciclos de Milankovitch, a atividade vulcânica e as variações na quantidade de energia solar recebida pela superfície terrestre, além dos gases atmosféricos. A última fase glacial aconteceu entre 115.000 e 11.000 anos AP e foi concluída por ocasião da Transgressão Marinha Flandriana, que deu início à época geológica denominada Holoceno. A humanidade atual está vivendo numa fase interglacial, com um aquecimento glacial que vem a partir das ações antrópicas, pós Revolução Industrial.



Fonte: <http://blog.meteoclim.com/ciclos-de-milankovitch>.

Figura 8. Variações da excentricidade da órbita terrestre.

As mudanças climáticas do Quaternário no território brasileiro

No Brasil, as mudanças climáticas operadas no seu território, ao longo do Pleistoceno, não se fizeram sentir com destaque no quadro térmico, como ocorreu em outras áreas do planeta, especialmente nas faixas das latitudes médias do hemisfério norte. Aqui os efeitos se consumaram no regime pluviométrico e na umidade atmosférica (Jatobá, 2014).

Nas épocas de resfriamento global do Quaternário teria ocorrido no Brasil uma diminuição sensível da pluviosidade e modificação da distribuição das chuvas (Bigarella; Mousinho; Silva, 2021). Nas fases de aquecimento global, ou períodos interglaciais, generalizaram-se climas úmidos, com a retomada da expansão de florestas latifoliadas perenifólias e subperenifólias e recuo da vegetação de cerrados e caatingas, então hegemônicas.

Durante as fases prolongadas de climas quentes e úmidos, desenvolveu-se profundo manto de intemperismo (regolito) decorrente dos processos de meteorização química da litomassa como a resposta aos climas dominantes. Por outro lado, nas fases secas (períodos glaciais), as paisagens foram submetidas a processos morfoclimáticos típicos de um paleoclima mais seco, provavelmente um clima Tropical Severo, com pesados aguaceiros concentrados num curto período de tempo.

Nas épocas semiáridas do período em pauta, aconteceu um conjunto de fenômenos físico-geográficos, a saber: elaboração de superfícies aplainadas (pedimentos, rampas de colúvio); formação no último Máximo Glacial de uma superfície-guia representada pelas stone lines (Figura 9); predomínio de forte intemperismo mecânico e degradação lateral, pelo escoamento em lençol, das vertentes; retração das áreas florestadas e uma diáspora da vegetação xerófila.

Ao longo do último máximo glacial, a ZCIT ficou em média 10° de latitude ao norte da posição que hoje ela ocupa. Esse fato trouxe inúmeras consequências para as características climáticas e, por extensão, para os sistemas morfoclimáticos da América do Sul (Jatobá, 2014).

Nas épocas de aquecimento global (épocas úmidas) verificaram-se os seguintes fatos: dissecação generalizada das paisagens; predomínio do intemperismo químico sobre a litomassa; recuo das caatingas (à posição atual?); expansão das florestas latifoliadas; transgressões marinhas (eustasia positiva) e alterações nos regimes fluviais (os rios adquiriram mais energia cinética).



Fonte: Fotografia de Alineaurea Silva (2013).

Figura 9. Stone line no Agreste Central de Pernambuco.

Por último, cabe acrescentar que as fases de aquecimento e resfriamento global estiveram bastante inter-relacionadas com as temperaturas da superfície marinha, especialmente no oceano Atlântico sul (Ab'Sáber, 1977). Esta é uma lição importantíssima, extraída do passado, para se entender as mudanças climáticas atuais no Brasil.

Nas fases de resfriamento global (fases glaciais), as temperaturas das águas do oceano Atlântico sul encontravam-se bem abaixo da média atual. Durante essas fases glaciais, no hemisfério sul, as faixas climáticas sofreram uma migração para o Norte. No último máximo glacial, três sistemas atmosféricos foram consideravelmente modificados: a Zona de Convergência Intertropical, os ventos de oeste (westerlies; corrente de jato) e os anticlones oceânicos. O anticiclone semifixo do Atlântico Sul expandiu-se mais para porções setentrionais, instalando-se durante um maior período de tempo do ano sobre o Brasil. Esse fato contribuiu notavelmente para a existência de um tempo prolongado durante o ano mais estável e seco no país (Jatobá, 2014), daí uma das principais razões da diáspora do clima seco tropical severo no território brasileiro.

Por ocasião das fases de aquecimento global, o Atlântico sul deve ter tido anomalias positivas de temperatura da superfície marinha consideráveis. Esse fato pode ter propiciado uma maior evaporação na superfície oceânica e uma ascensão da camada de inversão dos alísios de sudeste oriundos do Anticiclone Semifixo do Atlântico Sul. Com essa subida de tal camada, configuravam-se condições mais propícias para a instabilidade atmosférica, com fortes chuvas, sobretudo no Nordeste brasileiro, decorrentes do mais expressivo crescimento dos sistemas ondulatórios de leste (Ondas de Leste).

Assim, como uma lição do passado, pode-se dizer que fases de resfriamento global redundaram em instalação de ar estável e com a camada de inversão em níveis atmosféricos mais baixo trazendo a semiaridez mais severa, inclusive para as áreas sertanejas. Ao passo que, fases de aquecimento global definiram condições atmosféricas de maior umidade para a Amazônia, Brasil Central e em especial para o interior do Nordeste, definindo regimes pluviométricos mais regulares e definidos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As mudanças climáticas são um fenômeno complexo e dinâmico, influenciado por múltiplos fatores naturais e antrópicos. Ao longo do Quaternário, a Terra experimentou flutuações climáticas significativas, muitas delas associadas a variações astronômicas, ciclos oceânicos e mudanças na circulação atmosférica. No entanto, desde a Revolução Industrial, a ação humana tem desempenhado um papel destacado no atual aquecimento global, principalmente devido à emissão de gases de efeito estufa, como o CO₂, CH₄ e N₂O.

As oscilações climáticas de curto e médio prazo, como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), a Oscilação Decadal do Pacífico e a Oscilação do Atlântico Norte, demonstram a complexa interação entre os oceanos e a atmosfera, impactando diretamente a distribuição da umidade, a intensidade das tempestades e os padrões de temperatura em escala global e regional. Essas oscilações têm efeitos marcantes na biodiversidade, na produção agrícola e na ocorrência de eventos climáticos extremos.

O efeito estufa, essencial para a manutenção da vida na Terra, tem sido intensificado pela ação humana, resultando em alterações no balanço energético do planeta. A remoção de CO₂ da atmosfera por sumidouros naturais, como florestas e oceanos, é um processo fundamental, mas que tem sido comprometido pela degradação ambiental e pelo desmatamento, especialmente em regiões tropicais.

Além disso, os solos e as massas de água desempenham um papel crucial no ciclo do carbono, armazenando grandes quantidades desse elemento e influenciando a estabilidade climática.

O vapor d'água, o mais abundante gás do efeito estufa, desempenha um papel amplificador nas mudanças climáticas, interagindo com os sistemas meteorológicos e influenciando a formação de nuvens e tempestades. A sua distribuição desigual na atmosfera contribui para a variabilidade climática e pode intensificar eventos meteorológicos extremos, como furacões, ondas de calor e secas prolongadas.

Diante desse cenário, é essencial a adoção de medidas eficazes para mitigar os impactos das mudanças climáticas. Reduzir as emissões de gases de efeito estufa, promover práticas sustentáveis de uso da terra, conservar ecossistemas naturais e investir em fontes de energia renovável são estratégias fundamentais para minimizar os efeitos adversos do aquecimento global. A interdisciplinaridade na abordagem do tema é crucial para compreender melhor a complexidade das interações entre os diversos componentes do sistema climático e suas implicações para o futuro do planeta.

Ficam aqui, para uma reflexão mais científica aos interessados pela Climatologia brasileira, algumas questões para um debate mais acadêmico e menos acalorado: a) Caso evolua o aquecimento global em curso, como ficarão o Nordeste e a Região Sudeste do Brasil? b) Com essa evolução, o que acontecerá com a Zona de Convergência Intertropical em seus movimentos migratórios para o sul, determinantes do regime de chuvas de verão-outono do Semiárido brasileiro? Como se comportarão os alísios de sudeste frente a um aquecimento do ar em larga escala?

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A.N. Espaços ocupados pela expansão dos climas secos na América do Sul, por ocasião dos períodos glaciais quaternários. **Paleoclimas**. São Paulo, nº 3, 1-19, 1977.
- BARRY, R.G; CHORLEY, R.J. **Atmosfera, Tempo e Clima**, 9^a edição, Porto Alegre, Ed. Bookman,2013.
- BIGARELLA, J.J.; ANDRADE, Gilberto O. de. Contribuição ao estudo do Quaternário brasileiro. **Teoria Geográfica**, ano 1, vol. 1, UFPE, 1992. Tradução de Lucivânia Jatobá e Rachel Caldas Lins.
- BIGARELLA, J.J.; MOUSINHO, M.R.; SILVA,, J.X. Considerações a Respeito da Evolução das Vertentes. **Espaço Aberto**, PPGG - UFRJ, Rio de Janeiro, V. 11, N.2, p. 181-209, 2021.
- DIAS, P.L da Silva. A ciência das mudanças climáticas. In: NUSSENZVEIG, H.,M. **O futuro da Terra**. Rio de Janeiro, Editora da FGV, 2011.
- EMBRAPA. **Catálogo brasileiro de hortaliças**: saiba como plantar e aproveitar 50 das espécies mais comercializadas no país. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças: SEBRAE, 2010. 59 p. il. color. Pesquisa e conteúdo: Débora de Faria Albernaz Vieira, Embrapa Hortaliças. Disponível em: <https://abcsem.com.br/wp-content/uploads/2024/07/Catalogo-brasileiro-hortalicas.pdf>
- JATOBÁ, L.; LINS, R. C.; SILVA, A. F. **Tópicos Especiais de Geografia Física**. 2. . Petrolina: Ed. Progresso, 2014. 166 p. il.
- JATOBÁ, L.; SILVA, A. F. **Estrutura e dinâmica atual de paisagens**. Ananindeua: Itacaiúnas, 2017. 107 p. il
- JATOBÁ, L.; SILVA, A. F. (org.). **Tópicos especiais de climatologia**. Ananindeua: Itacaiúnas, 2020. 133 p. E-book.
- LEAN, J., ; RIND, D. Climate forcing by changing solar radiation. **Journal of Climate**, 11(12),

3069-3094, 1998.

LYRA, L.H.B.; JATOBÁ, L.; SILVA-JUNIOR,E.C. Alterações climáticas do Quaternário no médio São Francisco, Petrolina - PE: discussões teórico-conceituais. In: *Anais[...]*. I Congresso Internacional sobre Mudanças Climáticas e suas consequências em territórios semiáridos. Petrolina: UNIVASF, 2024.

MATOS, M. J. de; PEREIRA, J. P.; PACHECO, C. S. G. R.; SILVA, A. F. Agricultura resiliente ao clima: um relato de experiência sobre mulheres agricultoras no Semiárido cearense. In: PACHECO, C. S. G. R. (org.). **Mudanças climáticas e seus impactos socioambientais: concepções, fundamentos, teorias e práticas mitigadora**. Guarujá: Científica Digital, 2023. Cap. 3, p. 61-72. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1155492/1/Agricultura-resiliente-ao-clima-um-relato-de-experiencia-sobre-mulheres-agricultoras-no-Semiarido-cearense-2023.pdf>

MOLION, L.C.B. Gênese do El Niño. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 13, Vol. 21–Jul/Dez.2017.

OLIVEIRA, Elton Souza; REATTO,Adriana; LLACER Henrique Roig. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 32, n.1/2, p. 71-93, jan./ago. 2015.

RAHMSTORF, S. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. **Nature**, 419(6903), 207-214. 2002.

SILVA, A.F.; JATOBÁ, L. Relação clima-solo-planta na análise integrada de paisagens. In: JATOBÁ, L.; SILVA, A. F. **Estrutura e dinâmica atual de paisagens**. Ananindeua: Itacaiunas, 2017. 107 p. il. SILVA, A. F.; REGITANO NETO, A. As principais culturas anuais e bianuais na agricultura familiar. In: MELO, R. F. de; VOLTOLINI, T. V. (Ed.). **Agricultura familiar dependente de chuva no Semiárido**. Brasília, DF, Embrapa, 2019. cap. 2, p. 45-83. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1118488/1/As principais culturas anuais 2019.pdf>

SILVA, A. F. O clima e as plantas. In: JATOBÁ, L.; SILVA, A. F. (org.). **Tópicos especiais de climatologia**. Ananindeua: Itacaiúnas, 2020. Cap. 7, p. 96-112. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1153788/1/O-Clima-e-as-plantas-2020.pdf>

SILVA, M. S. L. da; OLIVEIRA NETO, M. B. de; FERNANDES, F. E. P.; SOUZA, S. L. de; SILVA, A. F.; FELISBERTO, N. R. de O.; OLIVEIRA, L. S.; ARAUJO FILHO, J. C. de; PARAHYBA, R. da B. V.; SANTANA, C. C. M. de; LIMA, R. A.; LIMA, L. M. J. M.; SILVA, T. D. S. da. **Práticas de manejo e conservação do solo e da água na gestão sustentável de agroecossistemas da bacia leiteira caprina integrada da Paraíba e Pernambuco**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2023. 47 p. il. color. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1160131/1/CNPS-DOC-241-2023.pdf>

SLEUTEL, S.; DE NEVE, S.; HOFMAN, G. Estimates of carbon stock changes in Belgian cropland. **Soil Use and Management**, v. 19, n. 2, p. 166-171, 2006.

WANDERLEY, H.S.; JUSTINO, F.B. Increase of concentration of water vapor atmospheric in the Greenland. **Santa Maria, Ciência e Natura**, v. 37, Edição Especial SIC, 2015, p.153-158.

WATSON, R. T. (Ed.). **Aclimate chance 2001:** synthesis report: third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001