

BASE CIENTÍFICA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

VOLUME 1 - PRIMEIRO RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO NACIONAL



pbmc

painel brasileiro de mudanças climáticas

Base científica das mudanças climáticas

Volume 1 - Primeiro relatório de avaliação nacional



pbmc

painel brasileiro de
mudanças climáticas

Carlos Afonso Nobre
Presidente do Conselho Diretor

Suzana Kahn Ribeiro
Presidente do Comitê Científico

Andrea Souza Santos
Secretária-Executiva

Bruno Alleinato Martins da Silva
Giovana Maria Tadaieski Arruda
Assessora Técnica do Grupo de Trabalho 1

Erico Leiva
Fabiana Soares
Unidade de Apoio Técnico do Grupo de Trabalho 1

Papier Brasil
Revisão ortográfica

Duoeme Brasil
Projeto gráfico

Ficha Técnica

PBMC, 2014: Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 pp.

ISBN: 978-85-285-0207-7

ÍNDICE GERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO E PRINCIPAIS QUESTÕES DISCUTIDAS

CAPÍTULO 2: OBSERVAÇÕES AMBIENTAIS ATMOSFÉRICAS E DE PROPRIEDADES DA SUPERFÍCIE

CAPÍTULO 3: OBSERVAÇÕES COSTEIRAS E OCEÂNICAS

CAPÍTULO 4: INFORMAÇÕES PALEOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS

CAPÍTULO 5: CICLOS BIOGEOQUÍMICOS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

CAPÍTULO 6: AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS E NUVENS

CAPÍTULO 7: FORÇANTE RADIATIVA NATURAL E ANTRÓPICA

CAPÍTULO 8: AVALIAÇÃO DE MODELOS GLOBAIS E REGIONAIS CLIMÁTICOS

CAPÍTULO 9: MUDANÇAS AMBIENTAIS DE CURTO E LONGO PRAZO: PROJEÇÕES E ATRIBUIÇÃO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E PRINCIPAIS QUESTÕES DISCUTIDAS

Autores principais: Tércio Ambrizzi – USP e Moacyr Araújo - UFPE

Autores revisores: Pedro Leite da Silva Dias - LNCC e Ilana Wainer - USP

ÍNDICE

SUMÁRIO EXECUTIVO	9
1.1 ESTRUTURA DO CAPÍTULO	9
1.2 PRINCIPAIS QUESTÕES DISCUTIDAS	10
1.2.1 CAPÍTULO 2: OBSERVAÇÕES AMBIENTAIS ATMOSFÉRICAS E DE PROPRIEDADES DA SUPERFÍCIE	10
1.2.2 CAPÍTULO 3: OBSERVAÇÕES COSTEIRAS E OCEÂNICAS	11
1.2.3 CAPÍTULO 4: INFORMAÇÕES PALEOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS	13
1.2.4 CAPÍTULO 5: CICLOS BIOGEOQUÍMICOS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS	14
1.2.5 CAPÍTULO 6: AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS E NUVENS	15
1.2.6 CAPÍTULO 7: FORÇANTE RADIATIVA NATURAL E ANTRÓPICA	17
1.2.7 CAPÍTULO 8: AVALIAÇÃO DE MODELOS GLOBAIS E REGIONAIS CLIMÁTICOS	19
1.2.8 CAPÍTULO 9: MUDANÇAS AMBIENTAIS DE CURTO E LONGO PRAZO: PROJEÇÕES E ATRIBUIÇÃO	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23

SUMÁRIO EXECUTIVO

Os Relatórios de Avaliação elaborados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) têm destacado, progressivamente, o papel das forçantes antrópicas sobre o processo de aquecimento global. Estas avaliações baseiam-se na análise acumulada de grandes quantidades de dados observacionais, sobre os quais são utilizadas técnicas mais ou menos sofisticadas visando à compreensão dos mecanismos atuantes e das margens de incerteza em suas determinações.

Diante da complexidade do clima planetário e da importância dos mecanismos remotos e de suas teleconexões, é de se esperar que a qualidade das análises realizadas e a redução de incertezas nas projeções das mudanças climáticas globais e regionais sejam diretamente relacionadas à quantidade de estudos científicos e de levantamentos existentes nas diferentes regiões do planeta. Nesse sentido, uma análise simples da literatura referenciada pelo Grupo de Trabalho 1 – Bases das Ciências Físicas do Quarto Relatório de Avaliação (AR4) do IPCC evidencia o desequilíbrio interhemisférico e regional nos quantitativos de produção científica e de levantamentos observacionais utilizados na avaliação, traduzindo a necessidade de esforços adicionais para minimizar estas diferenças.

Ciente do potencial de contribuição do Brasil para a compreensão das mudanças climáticas globais, e da necessidade de uma abordagem nacionalizada sobre o tema, foi instituído em Setembro de 2009 o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC). O PBMC é um organismo científico nacional criado pelos Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e do Meio Ambiente (MMA). Com estrutura espelhada no Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, o PBMC objetiva fornecer avaliações científicas sobre as mudanças climáticas de relevância para o Brasil, incluindo os impactos, vulnerabilidades e ações de adaptação e mitigação. As informações científicas levantadas pelo PBMC são sistematizadas por meio de um processo objetivo, aberto e transparente de organização dos levantamentos produzidos pela comunidade científica sobre as vertentes ambientais, sociais e econômicas das mudanças climáticas. Desta forma, o Painel poderá subsidiar o processo de formulação de políticas públicas e tomada de decisão para o enfrentamento dos desafios representados por estas mudanças.

O Primeiro Relatório de Avaliação Nacional (RAN1) do PBMC publicado em 2014 é composto de três volumes, correspondentes às atividades de cada Grupo de Trabalho (www.pbmc.coppe.ufrj.br). O presente documento traz uma síntese das principais contribuições para o RAN1 do Grupo de Trabalho 1 (GT1) – Base Científica das Mudanças Climáticas, cujo objetivo é avaliar os aspectos científicos do sistema climático e de suas mudanças.

1.1 ESTRUTURA DO CAPÍTULO

O documento está estruturado de acordo com o escopo do GT1, que foi previamente definido, coletivamente, com os Autores Principais dos Capítulos. Os levantamentos aqui apresentados resultam de uma extensa pesquisa bibliográfica, quando se procurou, de um lado, evidenciar as implicações para o Brasil dos principais pontos do IPCC-AR4, e de outro, registrar e discutir os principais trabalhos científicos publicados após 2007, com destaque para aqueles relacionados mais diretamente às mudanças climáticas na América do Sul e no Brasil.

As sínteses de cada Capítulo são apresentadas a seguir, e foram organizadas de modo a responder a questões-chaves específicas de cada domínio da pesquisa. O conjunto das respostas a estas questões forma a primeira contribuição do Grupo de Trabalho 1 (GT1) – Base Científica das Mudanças Climáticas para o Primeiro Relatório de Avaliação Nacional (RAN1) do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.

1.2 PRINCIPAIS QUESTÕES DISCUTIDAS

1.2.1 CAPÍTULO 2: OBSERVAÇÕES AMBIENTAIS ATMOSFÉRICAS E DE PROPRIEDADES DA SUPERFÍCIE

Questão 1: Quais são os resultados observacionais relacionados às variações de parâmetros ambientais que podem representar efeitos da variabilidade climática natural de longo período e, em alguns casos, indicações de efeitos da ação humana ?

Esta questão é abordada no Capítulo 2 do GT1. Conforme apresentado a seguir, os resultados descritos revelam o grande impacto da variabilidade interanual, que pode produzir alterações por um fator maior que quatro nas chuvas sazonais em certas regiões, como a Amazônia.

A maior fonte de variabilidade interanual de precipitação são os eventos *El Niño* e *La Niña*. As variações decadais/interdecenais apresentam menor diferença entre fases opostas (alterações por até fator de dois), mas são relevantes em termos de adaptação porque são persistentes, podendo causar secas prolongadas ou décadas com mais eventos extremos de chuva. Os modos de variabilidade interdecenal produziram forte variação climática na década de 1970, devido à superposição de efeitos da mudança de fase de diferentes modos nesta década. Portanto, análises de tendências em séries relativamente curtas de parâmetros climáticos, que compreendem períodos antes e depois desta década, são mais sugestivas do que conclusivas. Parte das tendências detectadas na precipitação do Brasil pode ser explicada por mudanças de fase em oscilações interdecadais, no entanto, é possível que outra porcentagem já seja uma consequência do atual aquecimento global observado. Por exemplo, algumas das tendências detectadas são consistentes com a variação produzida na segunda metade do século passado pelo primeiro modo interdecenal de chuvas anuais, que é significativamente correlacionado com um modo de tendência de temperatura da superfície do mar (TSM), mas também com a Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) e com a Oscilação Interdecadal do Pacífico. Estes resultados mostram tendências negativas no norte e oeste da Amazônia, positivas no sul da Amazônia, positivas no Centro-Oeste e Sul do Brasil, e ausência de tendência no Nordeste. A tendência de aumento da precipitação entre 1950-2000 no Sul do Brasil e outras partes da baixa Bacia do Paraná/Prata, principalmente entre o período anterior e posterior à década de 1970, aparece em outros modos interdecadais, principalmente no quarto modo, sendo que esta tendência é suportada por séries um pouco mais longas.

Para verificar se as tendências associadas com o 1º modo interdecadal de precipitação se devem apenas a mudança de fase da OMA ou se são parte de comportamento consistente de mais longo período, seriam necessárias: (i) séries mais longas de precipitação e (ii) consistência entre estas tendências e as mudanças de precipitação apontadas nessas regiões pelas projeções de mudanças climáticas feitas por numerosos modelos. Portanto, é necessário esperar algum tempo para ter certeza sobre tendências na precipitação do Brasil e também verificar sua consistência com projeções climáticas. Da mesma forma, ainda é difícil de analisar o quanto as mudanças antrópicas tem influenciado os eventos extremos de precipitação, cujas variações também podem estar mais relacionadas a oscilações climáticas naturais.

Estudos de tendência da temperatura utilizando dados de estação sobre a América do Sul limitam-se, na sua maioria, ao período entre 1960-2000. Os resultados mais significativos referem-se às variações de índices baseados na temperatura mínima diária, que indicam aumento de noites quentes e diminuição de noites frias na maior parte da América do Sul, com conseqüente diminuição da amplitude diurna da temperatura, especialmente na primavera e no outono. Estes resultados são mais robustos para as estações localizadas nas costas leste e oeste dos continentes e são confirmados para séries em períodos mais longos.

Embora a influência da variabilidade dos oceanos Atlântico e Pacífico no comportamento de longo prazo das temperaturas sobre a América do Sul também precise ser levada em conta, a influência antrópica sobre os extremos de temperatura parece ser mais provável do que aquela verificada sobre os extremos de precipitação. A enorme escassez de dados de estação sobre vastas áreas tropicais como a Amazônia

e o centro-oeste e leste do Brasil limitam o estabelecimento de conclusões acuradas para estas regiões usando dados de estação. Estudos recentes mostraram que fatores como mudança de uso da terra e queima de biomassa podem influenciar a temperatura nestas regiões, sobretudo na Amazônia e no Cerrado; porém a magnitude e extensão espacial do sinal de longo prazo dessas influências sobre a temperatura em superfície ainda precisam ser investigados. Conforme será discutido nas próximas seções, o efeito da mudança de uso da terra e da liberação de calor antrópico nos grandes centros urbanos, conhecido como ilha de calor urbana, podem ser importantes agentes contribuindo para o aumento da temperatura média global.

Dados de reanálises, desde 1948, fornecem evidência de aumento de temperatura em baixos níveis na atmosfera de forma mais acentuada em direção aos trópicos do que nos subtropicais da América do Sul durante o verão austral. Neste caso, a temperatura média anual de superfície nos trópicos tem apresentado tendência positiva desde então, enquanto nos subtropicais há tendência negativa desde meados da década de 1990. O aumento da temperatura também foi verificado sobre o Atlântico Tropical, sugerindo que possam ter ocorrido mudanças no contraste oceano-atmosfera e, portanto, no desenvolvimento do sistema de monções. Estas mudanças podem causar alterações no regime de precipitação e nebulosidade e criar efeitos de retroalimentação ainda desconhecidos na temperatura e no clima local. Mudanças nos campos médios globais e na TSM, antes e após o período conhecido como “climate shift”, no final dos anos 70, podem ter exercido importante papel no regime de temperaturas e respectivas tendências e precisam ser considerados para se avaliar corretamente o efeito do aquecimento global sobre a América do Sul. Neste contexto, também é importante avaliar o impacto de oscilações climáticas naturais interdecenais sobre a temperatura na América do Sul.

1.2.2 CAPÍTULO 3: OBSERVAÇÕES COSTEIRAS E OCEÂNICAS

Questão 2: Qual o papel dos oceanos, e em particular do Atlântico tropical e subtropical sul, como indutor e como indicador das variabilidades climáticas de origem natural e antrópica observadas no Brasil e na América do Sul ?

O Capítulo 3 trata do sistema oceânico, que participa de forma decisiva no equilíbrio climático. Devido à sua grande extensão espacial, e à alta capacidade térmica da água, é indiscutível que o aumento do conteúdo de calor dos oceanos e o aumento do nível do mar são indicadores robustos de aquecimento do planeta. Apesar da grande dificuldade de se observar o oceano, com a cobertura espacial e temporal necessária para melhor monitorar e entender mudanças nos oceanos e as respostas dessas mudanças no clima, há de se reconhecer que grandes progressos têm sido obtidos nos últimos anos. Observações remotas por satélite tem sido realidade já há algumas décadas e programas observacionais *in situ*, como o sistema de bóias perfiladoras Argo, tem permitido a obtenção de conjuntos de dados valiosos desde a superfície até profundidades intermediárias do oceano. Recentemente vários esforços têm sido despendidos na reavaliação de dados históricos, possibilitando interpretações mais confiáveis por mais longos períodos de tempo.

Com base em um número considerável de trabalhos publicados nas últimas décadas, o Quarto Relatório de Avaliação do Clima do IPCC (*IPCC-AR4, 2007*) concluiu, de forma inequívoca, que a temperatura do oceano global aumentou entre 1960 e 2006. Apesar das controvérsias decorrentes de alguns pequenos enganos no *IPCC-AR4*, a grande maioria dos estudos científicos realizados nos últimos 5 anos têm confirmado, de forma indiscutível, o aquecimento das águas oceânicas. Em particular, a TSM do Atlântico tem aumentado nas últimas décadas. No Atlântico sul, esse aumento é intensificado a partir da segunda metade do Século XX, possivelmente devido a mudanças na camada de ozônio sobre o Polo Sul e também ao aumento dos gases de efeito estufa. De forma consistente com um clima mais quente, o ciclo hidrológico tem também se alterado, refletindo em mudanças na salinidade da superfície do mar. Esses estudos mostram que a região subtropical do Atlântico Sul está se tornando mais quente e mais salina.

Abaixo da superfície, também há evidências claras do aumento da temperatura nas camadas superiores do oceano. Reanálise de dados históricos, obtidos por batitermógrafos descartáveis (XBTs), mostram uma clara tendência de aquecimento nos primeiros 700 m da coluna de água. Estudos independentes com dados obtidos até 2000 m de profundidade com perfiladores Argo sugerem um aquecimento significativo também abaixo de 700 m.

Os estudos analisados pelo *IPCC-AR4* e outros mais recentes também apontam para variações no conteúdo de calor e na elevação do nível do mar, em escala global. Variações nessas propriedades promovem alterações nas características das diferentes massas de água, o que fatalmente leva a alterações nos padrões de circulação do oceano. Por sua vez, mudanças na circulação oceânica resultam em alterações na forma como o calor e outras propriedades biológicas, físicas e químicas são redistribuídas na superfície da Terra.

O nível do mar está aumentando. Grande parte das projeções de aumento do nível do mar para todo o Século XXI deve ser alcançada ao longo das primeiras décadas, o que faz com que se configurem perspectivas mais preocupantes do que aquelas divulgadas no início dos anos 2000. Variações de 20 a 30 cm, inicialmente esperadas para o fim do Século XXI, já devem ser atingidas, em algumas localidades, até meados do século ou até antes disso. Deverá haver também maior variabilidade espacial da mudança no nível do mar entre os distintos locais do globo. Na costa do Brasil são poucos os estudos realizados com base em observações *in situ*. Mesmo assim, taxas de aumento do nível do mar na costa sul-sudeste já vêm sendo reportadas pela comunidade científica brasileira desde o final dos anos 80 e início dos anos 90.

O aumento do nível do mar assim como o aumento de temperatura atmosférica, mudanças no volume e distribuição das precipitações e concentrações de CO₂ afetarão de modo variável o equilíbrio ecológico de manguezais, dependendo da amplitude destas alterações e das características locais de sedimentação e espaço de acomodação.

Ao longo da extensão da linha de costa brasileira são vários os trechos em erosão, distribuídos irregularmente e muitas vezes associados aos ambientes dinâmicos de desembocaduras de rios. Diversas são as áreas costeiras densamente povoadas que se situam em regiões planas e baixas, nas quais os já existentes problemas de erosão, drenagem e inundações serão amplificados em cenários de mudanças climáticas. Importantes massas de água estão se alterando. As “águas modo” (águas de 18°C) do Oceano Sul e as Águas Profundas Circumpolares se aqueceram no período de 1960 a 2000. Essa tendência continua durante a presente década. Aquecimento similar ocorreu também nas águas modo da Corrente do Golfo e da Kuroshio. Os giros subtropicais do Atlântico Norte e Sul têm se tornado mais quentes e mais salinos. Como consequência, segundo conclusão do *IPCC-AR4* e de estudos mais recentes, é bastante provável que pelo menos até o final do último século a Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (CRMA) venha se alterando significativamente em escalas de interanuais a decenais.

No Atlântico Sul, vários estudos nos últimos anos sugerem variações importantes nas propriedades físicas e químicas das camadas superiores do oceano, associadas com alterações nos padrões da circulação atmosférica. Esses estudos mostram que, em consequência ao deslocamento do rotacional do vento em direção ao pólo, o transporte de águas do Oceano Índico para Atlântico sul, fenômeno conhecido como o “vazamento das Agulhas”, vem aumentando nos últimos anos. Análises de dados obtidos remotamente por satélite e *in situ* mostram mudanças no giro subtropical do Atlântico Sul associados a mudanças na salinidade das camadas superiores. Resultados de observações e modelos sugerem que o giro subtropical do Atlântico Sul vem se expandindo, com um deslocamento para sul da região da Confluência Brasil-Malvinas.

Há também fortes indícios que as características dos eventos de *El Niño* no Pacífico estão mudando nas últimas décadas. Como consequência, tem havido uma mudança nos modos de variabilidade da TSM no Atlântico Sul. Essas alterações nos padrões de TSM favorecem precipitações acima da média, ou na média sobre o norte e nordeste brasileiro, e mais chuvas no sul e sudeste do Brasil.

1.2.3 CAPÍTULO 4: INFORMAÇÕES PALEOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS

Questão 3: Quais as evidências observacionais do clima do passado que contribuem para o entendimento das variabilidades climáticas observadas no presente, e para a inferência de cenários prognósticos de mudanças no clima do Brasil e do continente sul americano ?

Esta questão é abordada no Capítulo 4, que traz o conjunto de estudos paleoclimáticos desenvolvidos com registros continentais e marinhos brasileiros e, subordinadamente, de outros países da América do Sul e dos oceanos adjacentes. As análises realizadas permitem afirmar que as mudanças na insolação recebida pela Terra em escala temporal orbital foram a principal causa de modificações na precipitação e nos ecossistemas das regiões tropical e subtropical do Brasil, principalmente aquelas regiões sob influência do Sistema de Monção da América do Sul. Valores altos de insolação de verão para o hemisfério sul foram associados a períodos de fortalecimento do Sistema de Monção da América do Sul e vice-versa.

Na escala temporal milenar foram observadas fortes e abruptas oscilações no gradiente de temperatura do Oceano Atlântico, bem como, na pluviosidade associada ao Sistema de Monções da América do Sul e à Zona de Convergência Intertropical. A causa destas mudanças climáticas abruptas reside aparentemente em marcantes mudanças na intensidade da Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico. Períodos de enfraquecimento desta célula foram associados a um aumento na precipitação das regiões tropicais e subtropicais do Brasil.

Marcantes alterações na circulação da porção oeste do Atlântico Sul foram reconstituídas para o Último Máximo Glacial (de 23 a 19 cal ka AP), a última deglaciação (de 19 a 11,7 cal ka AP) e o Holoceno (de 11,7 a 0 cal ka AP). Dentre elas pode-se citar: (i) uma diminuição na profundidade dos contatos entre as massas de água intermediária e profunda durante o Último Máximo Glacial que foi caracterizado por uma célula de revolvimento de intensidade similar à sua intensidade atual; (ii) um aquecimento das temperaturas de superfície do Atlântico Sul durante eventos de diminuição na intensidade da Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico em períodos específicos da última deglaciação (e.g., Heinrich Stadial 1 (entre ca. 18,1 e 14,7 cal ka AP) e Younger Dryas (entre ca. 12,8 e 11,7 cal ka AP)); e (iii) o estabelecimento de um padrão similar ao atual de circulação superficial na margem continental sul do Brasil entre 5 e 4 cal ka AP.

O nível relativo do mar na costa do Brasil atingiu até 5 m acima do nível atual entre ca. 6 e 5 cal ka AP e diminuiu gradativamente até o início do período industrial.

Análises paleoantracológicas indicam que por um longo período do Quaternário tardio o fogo tem sido um fator de grande perturbação em ecossistemas tropicais e subtropicais e, juntamente com o clima, de suma importância na determinação da dinâmica da vegetação no passado geológico.

Apesar de ainda existirem marcantes controvérsias a respeito de pontos importantes relacionados à ocupação humana das Américas (e.g. idade das primeiras migrações, quantas levas de migrações ocorreram, por que caminhos se processaram as migrações), pode-se afirmar que toda a América do Sul já estava ocupada pelo *Homo sapiens* ao redor de 12 cal ka AP e tais ocupações já mostravam padrões adaptativos e econômicos distintos entre si. A aparente estabilidade na ocupação humana do Brasil foi interrompida entre ca. 8 e 2 cal ka AP, com significativo abandono de sítios e de população em escala regional, que devem estar associados a marcantes mudanças climáticas.

A Pequena Idade do Gelo (de ca. 1500 a 1850 AD) foi caracterizada na porção Subtropical da América do Sul ao sul da linha do Equador por um aumento na precipitação que provavelmente está associado a um fortalecimento do Sistema de Monção da América do Sul e a uma desintensificação da Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico. Entretanto, os mecanismos climáticos associados não estão consolidados e o número de registros paleoclimáticos e paleoceanográficos disponíveis em ambientes subtropicais deste evento é particularmente reduzido.

Genericamente, se observa um número ainda bastante restrito de registros paleoclimáticos e paleoceanográficos provenientes do Brasil e da porção oeste do Atlântico Sul. De fato, apenas nos últimos anos foram publicados os primeiros estudos para algumas regiões (e.g., região Centro-Oeste, Zona de Confluência Brasil-Malvinas) e temas (e.g., temperatura da superfície do mar para o Holoceno, variabilidade multidecenal e secular na precipitação). Neste sentido, é de suma importância que lacunas nesta área do conhecimento sejam preenchidas nos próximos 10 anos.

1.2.4 CAPÍTULO 5: CICLOS BIOGEOQUÍMICOS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Questão 4: Como os principais processos biogeoquímicos seriam afetados pelas mudanças climáticas nos biomas e sistemas hídricos brasileiros ?

No Brasil são esperadas mudanças profundas e variáveis no clima conforme a região do país. É esperado que essas mudanças afetem os ecossistemas aquáticos e terrestres do Brasil. Neste quesito, o país é um dos mais ricos do mundo, tendo seis biomas terrestres (Amazônia, Mata Atlântica, Pantanal, Pampa, Cerrado e Caatinga), que englobam alguns dos maiores rios do mundo, como o Amazonas, Paraná e São Francisco; e uma costa com cerca de 8.000 km, contendo pelo menos sete grandes zonas estuarinas e toda a plataforma continental. O foco principal deste capítulo será investigar como os principais processos biogeoquímicos seriam afetados pelas mudanças climáticas nos principais biomas e bacias brasileiras.

Devido à falta de informações espaciais compatíveis com as escalas dos biomas brasileiros, as análises feitas neste capítulo serão concentradas em regiões de cada bioma onde informações encontram-se disponíveis. Ao mesmo tempo em que esse tipo de limitação nos impede de fazer uma generalização para um determinado bioma, serve como um alerta sobre a limitação destas informações em escalas compatíveis com as grandes áreas de nossos biomas. Há uma carência de informações crítica para determinados biomas como o Pampa, o Pantanal e a Caatinga. Um volume maior de informações se encontra na Amazônia e, secundariamente, no Cerrado. Somente recentemente estudos têm sido desenvolvidos na Mata Atlântica, mas ainda concentrados em algumas poucas áreas.

A Mata Atlântica estoca quantidades apreciáveis de carbono e nitrogênio em seus solos, principalmente em maiores altitudes. Os aumentos previstos para a temperatura do ar na região Sudeste do Brasil levaria a um aumento nos processos de respiração e decomposição, gerando um aumento nas perdas de carbono e nitrogênio para a atmosfera. A pergunta que permanece por falta de informações é se essas perdas seriam compensadas por um aumento na produtividade primária líquida do sistema. Nos campos sulinos do Pampa, similarmente à Mata Atlântica, os solos detêm um apreciável estoque de carbono. Portanto, aumentos na temperatura previstos para o futuro aumentariam as emissões de CO₂ para a atmosfera.

O balanço entre a vegetação lenhosa e a vegetação herbácea é um importante aspecto da fisiologia do Cerrado. A vegetação lenhosa tem estoques de nutrientes mais recalcitrantes na forma de raízes profundas e caules, enquanto a vegetação herbácea é mais prontamente decomposta pelo fogo. Em áreas onde a duração da seca fosse maior, seria favorecido, em tese, um aumento na incidência de fogo, que por sua vez, favoreceria o aparecimento de uma vegetação herbácea, implicando em mudanças importantes no funcionamento do Cerrado. A produtividade primária do Cerrado pode potencialmente ser reduzida frente às mudanças climáticas projetadas para este bioma. O aumento da temperatura provavelmente resultará em uma redução do processo fotossintético nas plantas do Cerrado, implicando em um possível decréscimo de sua biomassa. Adicionalmente, na estação seca o Cerrado passa a ser uma fonte de carbono para a atmosfera. Portanto, um aumento na duração deste período implicaria também em uma redução na produtividade primária do Cerrado. O mesmo aumento na duração do período seco pode potencialmente resultar em um aumento na vulnerabilidade ao fogo do Cerrado. O aumento da ocorrência de eventos de fogo resultaria em uma diminuição nos estoques de biomassa e nutrientes através de escoamento profundo, erosão, transporte de partículas e volatilização.

De forma geral há uma grande incerteza em relação aos efeitos de alterações climáticas nos recursos hídricos do Brasil. As bacias hidrográficas mais importantes do país, segundo seus atributos hidrológicos e ecológicos são a do Amazonas, Tocantins-Araguaia, Paraná, Paraguai e São Francisco. Essas bacias cortam regiões que devem sofrer diferentes impactos relacionados à alterações de temperatura e precipitação (volume e frequência de chuvas), com efeitos distintos na disponibilidade de água ao uso humano assim como na manutenção de processos ecológicos. Regionalmente, o aumento de eventos extremos associados à frequência e volume de precipitação também é previsto. Os cenários apontam para diminuição na pluviosidade nos meses de inverno em todo país, assim como no verão no leste da Amazônia e Nordeste. Da mesma forma, a frequência de chuvas na região Nordeste e no Leste da Amazônia (Pará, parte do Amazonas, Tocantins, Maranhão) deve diminuir, com aumento na frequência de dias secos consecutivos. Este cenário deverá impor um maior comprometimento dos já escassos recursos hídricos da região Nordeste. Em contraste, o país deve observar o aumento da frequência e da intensidade das chuvas intensas na região subtropical (região Sul e parte do Sudeste) e no extremo oeste de Amazônia.

1.2.5 CAPÍTULO 6: AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS E NUUVENS

Questão 5: Como as mudanças antrópicas sobre o campo de aerossóis podem interferir sobre a precipitação e a circulação atmosférica? Quais as incertezas na representação dos processos envolvendo a modelagem de aerossóis e nuvens?

Neste capítulo é apresentada uma revisão de algumas das principais contribuições científicas para a caracterização dos aerossóis atmosféricos sobre o Brasil, incluindo o papel exercido por suas fontes naturais e antrópicas, como queima de biomassa, poluição urbana, dentre outras, e para o entendimento dos processos de microfísica de nuvens.

Ainda que em anos recentes tenha sido observada uma redução nas taxas de desmatamento é certo que as queimadas na Amazônia são ainda a principal fonte antrópica de partículas de aerossol em escala continental na América do Sul e no Brasil. Em menor escala, mas com importante impacto no clima regional, também ocorrem queimadas nas culturas de cana de açúcar. Por outro lado, há uma importante contribuição de emissões antrópicas situadas em regiões urbanas, fruto principalmente de emissões veiculares. Ainda que não sejam majoritárias no conteúdo total de emissões, as partículas de aerossol das emissões urbanas exercem papel importante no clima urbano e na saúde pública das metrópoles brasileiras.

Diversos experimentos realizados na região amazônica, quase todos dentro do contexto do experimento LBA (Experimento de Larga Escala da Biosfera Atmosfera da Amazônia), foram capazes de qualificar e quantificar a composição do aerossol presente na atmosfera amazônica. A composição do aerossol natural na região amazônica pode ser observada durante a estação chuvosa, quando atividades relacionadas às queimadas são desprezíveis. A conclusão geral dos trabalhos focados na região é de que o aerossol natural amazônico é uma soma das contribuições do transporte de aerossol marinho para dentro do continente, de episódios de transporte de poeira do Saara, e de emissões biogênicas da vegetação. Em termos de contribuição absoluta à massa do material particulado, as emissões biogênicas primárias são dominantes.

O papel dos aerossóis no balanço de energia do sistema Terra-atmosfera é normalmente classificado como efeito direto e indireto, sendo o primeiro dado pela interação direta com a radiação (absorção e espalhamento) e o segundo através da modificação das propriedades microfísicas e, por consequência, na dimensão e no ciclo de vida das nuvens. Neste último caso, um parâmetro chave é o número de partículas de aerossol com capacidade de atuar como núcleos de condensação (CCN - Cloud Condensation Nuclei) e pelos Núcleos de Gelo (IN - Ice Nuclei).

A maioria dos estudos das propriedades dos CCN e das nuvens na América do Sul se concentra na Região Amazônica (e, em menor extensão, sobre o Nordeste). Esse número limitado de experimentos de campo, e a inexistência de medidas em grande parte do Brasil, impõem óbvias limitações à representação dos processos microfísicos em modelos aplicados sobre o território nacional.

Os trabalhos existentes baseiam-se na análise de dados de satélite e, em menor número, em campanhas intensivas de medidas de campo. Por exemplo, medidas *in situ* realizadas na bacia amazônica durante o experimento LBA/SMOCC 2002 em região de pastagem em Rondônia, que cobriram um período com intensa atividade de queimadas (setembro), transição (outubro) e o início da estação chuvosa (novembro), indicam um grande aumento no número de partículas no período seco em função das queimadas. Medições realizadas com aeronave estudaram as propriedades dos CCN na Região Amazônica, comparando regiões limpas e regiões sob intensa atividade de queima de biomassa. Observou-se um decréscimo generalizado na concentração de CCN desde o final da estação seca até o início da estação chuvosa. A comparação entre dias poluídos por queimas e dias limpos mostra uma concentração pelo menos cinco vezes maior para os dias poluídos. Diferenças ainda maiores são verificadas quando áreas limpas e poluídas foram comparadas para uma mesma data, indicando que a atividade de queima de biomassa é mais eficiente em produzir, principalmente, partículas pequenas e com pequena fração solúvel. Outros estudos mostraram que partículas finas, faixa em que predominam os CCN, são preponderantemente compostas de material orgânico secundário formado pela oxidação de precursores biogênicos, enquanto que partículas grossas, importantes nucleadores de gelo, consistem de material biológico emitido diretamente pela floresta.

Os chamados efeitos indiretos dos aerossóis constituem os mecanismos através dos quais estes modificam a microestrutura das nuvens, com consequências para suas propriedades radiativas e seu ciclo de vida. Jones e Christopher (2010) estudaram as propriedades estatísticas da interação aerossóis-nuvens-precipitação sobre a América do Sul em busca de indicativos do efeito indireto dos aerossóis sobre os processos associados a nuvens quentes. Os autores trabalharam com a hipótese de que se os efeitos indiretos (e também o semidireto) se manifestarem, em condições poluídas, como consequência da redução nos processos de colisão e coalescência ou aumento na estabilidade, deveria haver uma diminuição na precipitação estratiforme em comparação com condições mais limpas no mesmo ambiente. Comparando amostras sem chuva, com chuva e chuva intensa, concluíram, porém, que as condições atmosféricas de grande escala são mais importantes para o desenvolvimento da precipitação do que a concentração de aerossóis.

A fumaça produzida a partir das queimadas na Amazônia produz efeitos significativos sobre a microestrutura das nuvens, com uma redução no diâmetro médio das gotículas, inibindo a colisão-coalescência. Esta noção é corroborada por Freud *et al.* (2008) que discutem que há um aumento consistente em cerca de 350 m na altitude sobre a base da nuvem na qual a colisão-coalescência dispara a formação de chuva quente para cada 100 núcleos de condensação (a uma supersaturação de 0,5%) adicionados por cm³. Índices no mesmo sentido são também apresentados por Costa e Pauliquevis (2009), cujos resultados apontam para altitudes de chuva quente (isto é, a altitude em que o processo de formação de chuva quente se inicia) indo de 1200-2300 m, em ambientes marítimos e costeiros, a 5400-7100 m em ambientes influenciados por queimadas.

Como apontam Wang e Penner (2010), o fato de nuvens *cirrus* cobrirem tipicamente mais de 20% do planeta faz com que as mesmas sejam importantes para o balanço radiativo planetário. Nuvens convectivas profundas, particularmente nos trópicos, são responsáveis por mecanismos de transporte vertical cruciais para a circulação geral atmosférica. Nesse sentido, os aerossóis cumprem um papel significativo na microestrutura de nuvens *cumulonimbus*, sendo que suas estimativas apontam para valores de diâmetro efetivo de 10 a 20% menores sobre o continente do que sobre o oceano e com uma marcada variabilidade sazonal nessa variável em regiões com queima de biomassa como a Amazônia. Medidas *in situ* das propriedades microfísicas de nuvens frias e de fase mista sobre o Brasil, no entanto, são extremamente limitadas, havendo indicações de dados coletados apenas durante um experimento de campo, o TRMM-LBA (*Tropical Rainfall Measuring Mission - Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia*).

A modelagem dos processos envolvendo nuvens na maior parte dos modelos globais e regionais utilizados para previsão de tempo e clima e para as simulações de mudanças climáticas no Brasil e no mundo ainda se caracteriza pela utilização de um grande número de simplificações nos processos envolvendo nuvens. É particularmente significativo que as escalas dos movimentos convectivos não sejam explicitamente resolvidas na maioria desses modelos. Isto se dá em função da limitação de recursos computacionais e pelo fato dos modelos atualmente disponíveis dependerem significativamente de parametrizações de convecção.

Outro aspecto importante a ser considerado é a variabilidade na forma da distribuição de tamanho das gotículas, que é ao mesmo tempo um fator fisicamente relevante no desenvolvimento da precipitação, assim como a fase gelo, que se constituem em fontes de incerteza importantes na modelagem dos processos de nuvens.

1.2.6 CAPÍTULO 7: FORÇANTE RADIATIVA NATURAL E ANTRÓPICA

Questão 6: Quais são as estimativas da forçante radiativa e dos efeitos radiativos, sobre a atmosfera e a superfície, causados por agentes naturais e antrópicos, sobre o Brasil e a América do Sul ?

O clima é controlado por diversos fatores, chamados agentes climáticos, que podem ser naturais ou originados de atividades humanas (antrópicos). Um certo agente climático pode contribuir para aquecer o planeta, como por exemplo, os gases de efeito estufa antrópicos, enquanto outro agente pode tender a resfriá-lo, como as nuvens. Ao tomador de decisões seria conveniente conhecer qual a influência quantitativa de cada agente climático. Por exemplo, conhecer qual a contribuição de cada agente para as variações de temperatura na superfície do planeta, ou mesmo no Brasil. No entanto, como qualquer ferramenta de modelagem do clima, os modelos climáticos atuais mais avançados, que vêm progressivamente fornecendo resultados cada vez mais confiáveis e consistentes para previsões de mudanças climáticas, devem ser alimentados com estimativas seguras das forçantes radiativas. No Capítulo 7 discutem-se estimativas da forçante radiativa e efeitos radiativos, sobre a atmosfera e a superfície, causadas por agentes naturais e antrópicos sobre o Brasil.

O conceito de forçante radiativa, tal como definido no relatório *IPCC-AR4*, é um passo intermediário que não necessita, em princípio, de modelos climáticos para seu cálculo, por isso, os valores de forçante radiativa podem ser mais objetivamente interpretáveis. Uma forçante radiativa positiva significa que um agente tende a aquecer o planeta, ao passo que valores negativos indicam uma tendência de resfriamento. Uma inconveniência do conceito de forçante radiativa é que em geral ela é expressa em termos de potência (Wm^{-2} , ou Watt por metro quadrado), que é uma unidade menos familiar que a temperatura (em graus Celsius). Uma vez determinado o valor da forçante radiativa de um agente, pode-se usar esse valor em modelos climáticos que procurarão traduzi-lo, por exemplo, em termos de mudanças de temperatura na superfície, ou mudanças no volume de chuvas. Dependendo do modelo climático escolhido e das condições em que ele é utilizado, um mesmo valor de forçante pode dar origem a diferentes respostas. É nesse contexto que o conceito de forçante radiativa oferece um meio de comparação entre diferentes agentes climáticos, independentemente da precisão dos modelos climáticos atuais. A quantificação numérica da intensidade da forçante radiativa permite ao tomador de decisão visualizar quais os agentes mais significativos, classificando-os por ordem de magnitude relativa. Calcular a forçante radiativa de um agente climático é como definir uma escala padrão, que permite a possibilidade de se estimar a intensidade de sua perturbação sobre o clima, para algum local ou região do globo.

Além de agentes climáticos independentes, ocorrem também situações de interdependência entre agentes, chamados processos de retroalimentação, que tornam ainda mais complexa a compreensão de qual o efeito climático final de um certo agente. Alguns agentes climáticos podem influenciar o ciclo hidrológico. Por exemplo, alguns pesquisadores afirmam que a fumaça emitida em queimadas na Amazônia pode alterar o funcionamento natural das nuvens, diminuindo o volume de chuvas que essas nuvens podem produzir (conforme o capítulo 6). Se isso acontece, então a menor ocorrência de chuvas pode favorecer a ocorrência de um número ainda maior de queimadas, e assim se estabelece um ciclo de retroalimentação. Em tais ciclos de retroalimentação, as relações de causa e efeito são complexas, e por esse motivo a avaliação do impacto sobre o clima é denominada efeito radiativo, e não uma forçante radiativa. Essa distinção é utilizada de forma rigorosa neste capítulo.

É importante levar em consideração escalas de tempo e espaço. Mudanças climáticas que ocorrem em longo prazo, em escalas de milhares a milhões de anos, são controladas por variações orbitais do planeta. No entanto, numa escala de centenas de anos as mudanças orbitais são virtualmente irrelevantes, e outros fatores predominam. Um exemplo é a influência antrópica sobre o clima devido à emissão de gases de efeito estufa, que vem causando um aumento anômalo da temperatura média na superfície do planeta.

Este capítulo apresenta a definição formal de forçante radiativa, do potencial de aquecimento global e do potencial de temperatura global, que são variáveis utilizadas para padronizar uma metodologia de comparação, e que permitem estimar quantitativamente os efeitos de diferentes agentes climáticos. O capítulo apresenta uma revisão bibliográfica de estudos recentes, efetuados sobre o Brasil ou sobre a América do Sul, que identificaram alguns dos principais agentes climáticos naturais e antrópicos atuantes no país. Embora a intenção fosse apresentar, em números, a contribuição para a forçante radiativa atribuída aos diferentes agentes, a inexistência de trabalhos científicos no país para vários deles trouxe outra dimensão ao capítulo. Os efeitos climáticos mais significativos em escalas de dezenas a centenas de anos, no Brasil, são os efeitos radiativos de nuvens, a forçante radiativa dos gases de efeito estufa, a forçante de mudança de uso do solo, e a dos aerossóis (fumaça) emitidos em queimadas por fontes antrópicas.

Nuvens exercem um efeito radiativo natural, mas suas propriedades podem ser alteradas pela ação humana (e.g. efeitos indiretos de aerossóis, mudança de propriedades da superfície, entre outros). Essas alterações podem envolver processos de retroalimentação, com possíveis impactos sobre o ciclo hidrológico, causando alterações na disponibilidade de água doce, ou na frequência de ocorrência de eventos extremos de precipitação, como secas ou tempestades severas. Os resultados compilados neste capítulo mostram que no clima presente as nuvens constituem o agente climático mais importante do ponto de vista de balanço de radiação sobre a Amazônia, reduzindo em até 110 Wm^{-2} a radiação à superfície, e contribuindo com cerca de $+26 \text{ Wm}^{-2}$ no topo da atmosfera. Isso significa que as nuvens na Amazônia atuam causando em média um resfriamento da superfície, mas um aquecimento do planeta. Cabe ressaltar que o modo como os estudos consideram a distribuição vertical das nuvens desempenha um papel fundamental nos resultados obtidos: nuvens altas tendem a contribuir com um efeito de aquecimento do planeta, enquanto nuvens baixas tendem a resfriá-lo. Desse modo, é importante destacar que esse resultado não pode ser automaticamente estendido para outras regiões, com padrões de nuvens e características de superfícies diferentes da região amazônica.

No Brasil, a principal fonte de gases de efeito estufa e aerossóis antrópicos é a queima de biomassa, utilizada como prática agrícola ou na mudança da cobertura do solo. Como técnica agrícola, as queimadas são empregadas no combate de pragas e na limpeza de lavouras com objetivo de facilitar a colheita, como no caso do cultivo da cana de açúcar. O uso de queimadas para alteração do uso do solo é observado especialmente na região amazônica. No caso dos gases de efeito estufa, grande parte do esforço das pesquisas no Brasil atualmente se concentra na elaboração de inventários de emissão. Não se encontram na literatura científica estimativas de cálculos da forçante radiativa desses gases considerando as condições das emissões brasileiras.

Aerossóis antrópicos, emitidos principalmente em queimadas, podem absorver e refletir a luz do Sol. Essa interação direta entre aerossóis e a luz (radiação) solar define a forçante radiativa direta de aerossóis. Vários estudos quantificaram essa forçante de aerossóis antrópicos, sobretudo na Amazônia. Uma média ponderada de alguns dos resultados compilados neste capítulo resultou em uma forçante radiativa de $-8,0 \pm 0,5 \text{ Wm}^{-2}$, indicando que, em média, a fumaça emitida em queimadas contribui para resfriar o planeta, contrapondo-se parcialmente ao aquecimento causado por gases de efeito estufa antrópicos. É muito importante, no entanto, ressaltar que aerossóis e gases de efeito estufa antrópicos têm escalas de tempo e espaço muito diferentes: enquanto gases de efeito estufa tendem a se espalhar aproximadamente de modo uniforme sobre o planeta, e têm tipicamente vida média de centenas de anos, aerossóis emitidos em queimadas na Amazônia espalham-se sobre grande parte do continente da América do Sul, e têm vida média de dias (são removidos da atmosfera e depositam-se sobre a superfície). Assim, a comparação das forçantes de aerossóis e gases de efeito estufa não pode ser feita diretamente.

As mudanças antrópicas no uso do solo, como por exemplo, o processo de longo prazo de urbanização das cidades brasileiras, ou a conversão de florestas para a agropecuária na região amazônica desde 1970, resultaram em modificações de propriedades da superfície vegetada como, por exemplo, o albedo (refletividade da superfície). No caso da Amazônia em geral, substituiu-se uma superfície mais escura (floresta), por superfícies mais brilhantes (e.g. plantações, estradas, construções, etc.), o que implica em uma maior fração da luz solar sendo refletida de volta ao espaço. Encontrou-se um trabalho sobre a mudança de albedo em regiões desmatadas desde 1970 na Amazônia, que estimou em $7,3 \pm 0,9 \text{ Wm}^{-2}$ como o a magnitude dessa forçante antrópica. Note-se que esse valor é semelhante à forçante de aerossóis antrópicos, porém, é importante salientar que o desmatamento na Amazônia tem caráter virtualmente “permanente” (i.e. a maioria das áreas degradadas em geral não volta a ser recomposta como floresta primária), enquanto aerossóis de queimada têm vida média da ordem de dias. Essas observações indicam a necessidade de se realizar estudos mais aprofundados sobre a forçante originada nos processos de mudança de uso do solo, em especial incluindo-se o efeito da urbanização histórica e da expansão agropecuária em nível nacional e em várias escalas temporais.

Aerossóis também interagem com nuvens, modificando suas propriedades. As nuvens modificadas, por sua vez, interagem com a radiação solar. Dessa forma, define-se a forçante indireta (i.e. mediada pela interação com nuvens) de aerossóis. As estimativas de forçante radiativa para os efeitos indiretos de aerossóis encontradas na literatura apresentaram uma ampla gama de valores. A maioria dos resultados tem sinal negativo, variando entre cerca de $-9,5$ a $-0,02 \text{ Wm}^{-2}$ para diferentes tipos de superfície, indicando condições de resfriamento climático. Este é um tópico que ainda necessita de mais estudos de caracterização e verificações independentes, para que esse componente da forçante antrópica sobre o Brasil possa ser adequadamente representado em modelos climáticos.

Não foram encontrados trabalhos avaliando a forçante radiativa no Brasil devido ao aerossol de origem urbana, ao aerossol natural de poeira oriunda da África, ou de erupções vulcânicas, nem à formação de trilhas de condensação pelas atividades da aviação comercial. Essas forçantes radiativas, por hora desconhecidas podem, ou não, ser comparáveis àquelas devidas a gases de efeito estufa e aerossóis antrópicos. Os trabalhos analisados na elaboração deste capítulo evidenciam a existência de lacunas significativas em estudos de forçantes radiativas no Brasil. Conhecer com precisão a magnitude dessas forçantes, e aprimorar a compreensão de seus impactos, resultará em melhorias nos modelos de previsão de tempo e clima. Tais modelos são ferramentas importantes para instrumentalizar a tomada de decisões políticas e econômicas diante das mudanças climáticas que vêm atuando no país.

1.2.7 CAPÍTULO 8: AVALIAÇÃO DE MODELOS GLOBAIS E REGIONAIS CLIMÁTICOS

Questão 7: Qual a capacidade dos modelos numéricos em reproduzir o clima presente e futuro sobre o Brasil e a América do Sul ?

Este tema é abordado no Capítulo 8 do GT1. Nele são descritas as características e desenvolvimentos do modelo global atmosférico do CPTEC e modelos regionais climáticos. O Modelo de Circulação Global Atmosférico do CPTEC/INPE, base do Modelo Brasileiro do Sistema Climático Global (MBSCG) tem sido desenvolvido desde a sua versão inicial CPTEC/COLA de 1994. A variação sazonal da precipitação, pressão ao nível do mar, ventos em altos e baixos níveis, bem como a estrutura vertical dos ventos e temperatura têm sido bem representados pelo MCGA CPTEC/COLA. Os principais centros associados a ondas estacionárias nos dois hemisférios são razoavelmente bem reproduzidos. Entretanto, a precipitação é subestimada principalmente na região da Amazônia e centro-sul da América do Sul, e superestimada no Nordeste do Brasil e nas regiões de convergência intertropical (ZCIT) e do Atlântico Sul (ZCAS). Embora erros sistemáticos sejam mais destacados nas regiões tropicais, as melhores correlações entre anomalias de precipitação do modelo observadas ocorrem nessa região, que inclui o extremo norte do Nordeste do Brasil e leste da Amazônia.

Tendo em vista que os modelos regionais climáticos possibilitam um maior detalhamento dos cenários climáticos fornecidos pelos modelos globais, que geralmente apresentam baixa resolução espacial e o menor custo computacional, vários estudos com diferentes modelos têm sido realizados ao longo dos últimos anos.

Por exemplo, Marengo *et al.* (2009) utilizando três modelos regionais (HadRM3P, Eta-CCS e RegCM3) cujas simulações foram realizadas com as mesmas condições de contorno do modelo global HadAM3P, obtiveram simulações do clima atual e projeções de clima futuro para o final deste século sobre a América do Sul (AS). Em relação ao clima atual, os autores mostraram que os modelos têm um viés negativo de precipitação na parte mais norte da AS e também um viés negativo que domina quase todo o continente com exceção da parte mais central, que se mostrou mais dependente da sazonalidade. Os resultados indicaram que o Eta-CCS apresenta um maior aquecimento no oeste da Amazônia quando comparado aos modelos RegCM3 e HadRM3P, enquanto que estes últimos apresentam maior aquecimento na região leste da Amazônia. Os autores destacam ainda que as projeções destes modelos diferem em relação às regiões onde são verificados os maiores aquecimentos (acima de 8°C), por exemplo, na Amazônia oriental ou na Amazônia ocidental, dependendo do modelo regional utilizado. Conforme mencionado em Marengo *et al.* (2010, 2011) estas incertezas só podem ser reduzidas com avanços no conhecimento do sistema climático.

Vários estudos utilizando modelos globais/regionais e atmosféricos/acoplados abordaram fenômenos meteorológicos que atuam na AS, em particular no Brasil. Por exemplo, com relação à ZCAS, Pesquero *et al.* (2009) utilizaram o modelo Eta aninhado às condições do HadAM3P e verificaram a capacidade do modelo em reproduzir a circulação de monção da América do Sul e a frequência de eventos de ZCAS, tanto no clima presente (1961-1990), quanto no clima futuro (2070-2099), utilizando-se o cenário A1B do IPCC-SRES. Os resultados indicaram não haver diferenças importantes entre os fluxos de umidade em toda a estação chuvosa, quando comparado aos períodos de ZCAS sobre a Região SE. No entanto, em relação a precipitações intensas, constatou-se a ocorrência de valores de precipitação entre 90 e 140 mm/dia em diversas situações do clima futuro.

Outro fenômeno de importância para o clima da AS é o Jato de Baixo Nível (JBN). Os resultados de Soares e Marengo (2009), com a utilização do modelo HadRM3P, indicaram um total de 169 casos de JBNs detectados no período 1980-1989, enquanto que as ocorrências entre 2080 e 2089 totalizaram 224, evidenciando assim o impacto do SRES A2 na frequência de ocorrência de JBNs da AS.

Apesar dos acelerados avanços teóricos e computacionais verificados nos últimos anos, as projeções climáticas são cercadas de imperfeições e incertezas, oriundas da própria dinâmica do sistema climático. Existem pelo menos duas principais fontes de incerteza inerentes às projeções do clima: aquelas relacionadas aos cenários de emissões, e aquelas relacionadas à modelagem do clima e suas parametrizações. Embora os cenários de emissões sejam baseados em um conjunto de suposições coerentes e fisicamente consistentes sobre suas forçantes, tais como demografia, desenvolvimento sócio-econômico e mudanças tecnológicas, não se pode afirmar exatamente como estes vão evoluir ao longo das próximas décadas. Em relação às incertezas na modelagem do clima, técnicas diferentes de regionalização e/ou parametrização podem produzir diferentes respostas locais, ainda que todas as simulações sejam forçadas pelo mesmo modelo global, além da possibilidade de erros advindos dos próprios Modelos Climáticos Globais (MCGs).

1.2.8 CAPÍTULO 9: MUDANÇAS AMBIENTAIS DE CURTO E LONGO PRAZO: PROJEÇÕES E ATRIBUIÇÃO

Questão 8: Quais as mudanças climáticas projetadas para curto e longo prazo que irão afetar os principais biomas brasileiros ?

Cenários futuros do clima são projeções ou simulações geradas por modelos que levam em consideração os diferentes cenários de emissões globais de gases do efeito estufa (GEE) propostos pelo IPCC. Atualmente, a melhor ferramenta científica disponível para a geração das projeções de mudanças ambientais é o *downscaling* (regionalização) dinâmico, cuja técnica consiste em usar um modelo climático regional “aninhado” a um modelo climático global (maiores detalhes sobre modelagem encontram-se no Capítulo 9). Os resultados científicos consensuais das projeções regionalizadas de clima nos diferentes biomas do Brasil, considerando os períodos de início (2011-2040), meados (2041-2070) e final (2071-2100) do século XXI, são resumidos neste capítulo.

Em geral, as projeções climáticas possuem desempenho (*skill*) relativamente melhor nos setores norte/nordeste (Amazônia e Caatinga) e sul (Pampa) do Brasil, e desempenho pior no centro-oeste e sudeste (Cerrado, Pantanal e Mata Atlântica). As projeções consensuais para os biomas brasileiros, baseadas nos resultados científicos de modelagem climática global e regional, são as seguintes:

AMAZÔNIA: Reduções percentuais de -10% na distribuição de chuva e aumento de temperatura de 1° a 1,5°C até 2040, mantendo a tendência de diminuição de 25% a 30% nas chuvas e aumento de temperatura entre 3° e 3,5°C no período 2041-2070, sendo que no final do século (2071-2100) as mudanças são mais críticas com clima significativamente menos chuvoso (redução de 40% a 45% nas chuvas) e muito mais quente (aumento de 5° a 6°C de temperatura). Enquanto tais modificações de clima associados às mudanças globais podem comprometer o bioma em longo prazo (final do século), a questão atual do **desmatamento** decorrente das intensas atividades de uso da Terra, representa uma ameaça mais imediata para a Amazônia. Estudos observacionais e de modelagem numérica sugerem que caso o desmatamento alcance 40% na região, esperam-se mudanças drásticas no ciclo hidrológico com redução de 40% na pluviometria durante os meses de Julho a Novembro, prolongando a duração da estação seca, bem como provocando aquecimento superficial em até 4°C. Assim, as mudanças regionais pelo efeito do desmatamento somam-se àquelas provenientes das mudanças globais, constituindo, portanto, condições propícias à prevalência de vegetação do tipo cerrado, sendo que esse problema de savanização da Amazônia tende a ser mais crítico na porção oriental.

CAATINGA: Aumento de 0,5° a 1°C na temperatura do ar e decréscimo entre 10% e 20% na chuva durante as próximas três décadas (até 2040), com aumento gradual de temperatura para 1,5° a 2,5°C e diminuição entre 25% e 35% nos padrões de chuva no período de 2041-2070. No final do século (2071-2100) as projeções indicam condições significativamente mais quentes (aumento de temperatura entre 3,5° e 4,5°C) e agravamento do déficit hídrico regional com diminuição de praticamente metade (40 a 50%) da distribuição de chuva.

CERRADO: Aumento de 1°C na temperatura superficial com diminuição percentual entre 10% a 20% na precipitação durante as próximas três décadas (até 2040). Em meados do século (2041-2070) espera-se aumento entre 3° e 3,5°C da temperatura do ar e redução entre 20% e 35% da pluviometria. No final do século (2071-2100) o aumento de temperatura atinge valores entre 5° e 5,5°C e a retração na distribuição de chuva é mais crítica, com diminuição entre 35% e 45%.

PANTANAL: Aumento de 1°C na temperatura e diminuição entre 5% e 15% nos padrões de chuva até 2040, mantendo a tendência de redução nas chuvas para valores entre 10% e 25% e aumento de 2,5° a 3°C de temperatura em meados do século (2041-2070). No final do século (2071-2100) predominam condições de aquecimento intenso (aumento de temperatura entre 3,5° e 4,5°C) com diminuição acentuada nos padrões de chuva de 35% a 45%.

MATA ATLÂNTICA: Como este bioma abrange áreas desde o sul, sudeste até o nordeste brasileiro, as projeções apontam dois regimes distintos. **Porção Nordeste (NE):** Aumento relativamente baixo nas temperaturas de 0,5° a 1°C e decréscimo nas chuvas em torno de 10% até 2040, mantendo a tendência de aquecimento entre 2° e 3°C e diminuição pluviométrica entre 20% e 25% em meados do século (2041-2070). Para o final do século (2071-2100) esperam-se condições de aquecimento intenso (aumento de 3° a 4°C) e diminuição entre 30% e 35% nos padrões de chuva regional. **Porção Sul/Sudeste (S/SE):** Até 2040 as projeções

indicam aumento relativamente baixo de temperatura entre 0,5° e 1°C com intensificação nos padrões de chuva em torno de 5% a 10%. Em meados do século (2041-2070) continuam as tendências de aumento gradual de 1,5° a 2°C na temperatura e de 15% a 20% nas chuvas, sendo que essas tendências acentuam-se no final do século (2071-2100) com padrões de clima entre 2,5° e 3°C mais quente e entre 25% a 30% mais chuvoso.

PAMPA: No período até 2040 prevalecem condições de clima regional de 5% a 10% mais chuvoso e até 1°C mais quente, mantendo a tendência de aquecimento entre 1° e 1,5°C e intensificação das chuvas entre 15% e 20% até meados do século (2041-2070). No final do século (2071-2100) as projeções são mais agravantes com aumento de temperatura de 2,5° a 3°C e chuvas de 35% a 40% acima do normal.

Em virtude do alto grau de vulnerabilidade das regiões norte e nordeste do Brasil, ressalta-se que as projeções mais preocupantes para o final do século são para os biomas Amazônia e Caatinga, cujas tendências de aquecimento na temperatura do ar e de diminuição nos padrões regionais de chuva são maiores do que a variação média global. Em termos de atribuição de causa física, sugere-se que essa mudança climática de redução na pluviometria associa-se aos padrões oceânicos tropicais anormalmente mais aquecidos sobre o Pacífico e Atlântico (esperados num clima futuro de aquecimento global), os quais modificam o regime de vento de forma a induzir diminuição no transporte de umidade e prevalência de circulação atmosférica descendente (células de Hadley e Walker) sobre o Brasil tropical, inibindo a formação de nuvens convectivas e explicando assim as condições de chuva abaixo do normal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, M. F. *et al.*, 2010: Vehicle emissions and PM_{2.5} mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality, Atmosphere and Health*, vol. **4**, 108.
- Andreae, M. O. *et al.*, 2004: Smoking rain clouds over the Amazon. *Science*, **303**, 1337-1342.
- Cheng, H. *et al.*, 2009: Timing and structure of the 8.2 kyr B.P. event inferred from ⁻¹⁸O records of stalagmites from China, Oman, and Brazil. *Geology*, **37**, 1007–1010.
- Chiessi, C. M. *et al.*, 2009: Possible impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the South American summer monsoon. *Geophysical Research Letters*, **36**, L21707, doi:10.1029/2009GL039914.
- Costa, A. A. e T. Pauliquevis, 2009: Aerossóis, nuvens e clima: resultados do experimento LBA para o estudo de aerossóis e microfísica de nuvens. *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. **24**, 234-253.
- Freud, E. *et al.*, 2008: Robust relations between CCN and the vertical evolution of cloud drop size distribution in deep convective clouds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. **8**, 1661-1675.
- IPCC, 2007: Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor e H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Jones T. A. e S. A. Christopher, 2010: Statistical properties of aerosol-cloud-precipitation interactions in South America. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 2287-2305.
- Koren, I., L. A. Remer e K. Longo, 2007: Reversal of trend of biomass burning in the Amazon , *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L20404, doi:10.1029/2007GL031530.
- Laprida, C. *et al.*, 2011: Middle Pleistocene sea surface temperature in the Brazil-Malvinas Confluence Zone: Paleoceanographic implications based on planktonic foraminifera. *Micropaleontology*, **57**, 183-196.
- Lara, L. *et al.*, 2005: Properties of aerosols from sugar-cane burning emissions in Southeastern Brazil. *Atmospheric Environment*, **39** (26), 4627-4637. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.04.026.
- Marengo, J. A., M. Rusticucci, O. Penalba e M. Renom, 2010: An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends. *Climatic Change* (2010) **98**, 509-[529. doi: 10.1007/s10584-009-9743-7.
- Marengo J. *et al.*, 2011: Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTec/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins. *Submitted. Clim. Dyn.* 2011.
- Martins, J. A. *et al.*, 2009: Cloud condensation nuclei from biomass burning during the Amazonian dry-to-wet transition season. *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. **104**, 83-93.
- Pesquero *et al.*, 2009: Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. *Theor Appl Climatol.* doi:10.1007/s00704-009-0123-z.
- Pöschl, U. *et al.*, 2010: Rainforest Aerosols as Biogenic Nuclei of Clouds and Precipitation in the Amazon. *Science*, Vol. 329 n°. 5998 pp 1513-1516, doi:10.1126/science.1191056.

Soares W. R. e J. A. Marengo, 2008: Assessments of moisture fluxes east of the Andes in South America in a global warming scenario. *International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.1800.

Souto, D. *et al.*, 2011: Marine sediments from southeastern Brazilian continental shelf: A 1200 year record of upwelling productivity. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, **299**, 49-55.

Stríkis, N. *et al.*, 2011: Abrupt variations in monsoonal rainfall during the Holocene in central-eastern Brazil. *Geology*, **39**, 1075-1078, doi:10.1130/G32098.

Wang, M. e J. E. Penner, 2010: Cirrus clouds in a global climate model with a statistical cirrus cloud scheme. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 5449-5474