

CIÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SUA INTERDISCIPLINARIDADE

TERCIO AMBRIZZI
PEDRO ROBERTO JACOBI
LÍVIA MÁRCIA MOSSO DUTRA
(organizadores)

Ciência das Mudanças Climáticas e sua Interdisciplinaridade

TERCIO AMBRIZZI
PEDRO ROBERTO JACOBI
LÍVIA MÁRCIA MOSSO DUTRA

(organizadores)



COLEÇÃO CIDADANIA E MEIO AMBIENTE

Comitê Editorial: Pedro Roberto Jacobi (Coordenador), Ana Paula Fracalanza,
Cristina Adams, Julia Guivant, Leandro Giatti, Maria Luisa Schmidt e Wagner Costa Ribeiro

A coleção Cidadania e Meio Ambiente tem como objetivo publicar textos que abordem a questão ambiental nas suas múltiplas dimensões. A coleção publica textos teóricos, coletâneas temáticas e textos que apresentam trabalhos de pesquisa acadêmica de autores nacionais e estrangeiros sobre políticas ambientais, educação ambiental, conflitos socioambientais e justiça ambiental, desenvolvimento e sustentabilidade.

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecária Juliana Farias Motta CRB7- 5880

S569 Ciência das mudanças climáticas e sua interdisciplinaridade /
Organização Tercio Ambrizzi, Pedro Roberto Jacobi, Livia Márcia Mosso Dutra . - São Paulo:
Annablume , 2015.

272 p.: il. mapas ; 16 x 23 cm . (Cidadania e Meio Ambiente)

ISBN: 978-85-391-0714-8.

1. Circulação atmosférica. 2. Climatologia. 3. Vento. 4. Oceanografia física. I. Ambrizzi, Tercio, org. II. Jacobi, Pedro Roberto. III. Dutra, Livia Márcia Mosso, org. IV. Ciência das mudanças climáticas e sua interdisciplinaridade.

CDD 551.69811

Índice para catálogo sistemático:

1. Circulação atmosférica
2. Climatologia
3. Vento
4. Oceanografia física

CIÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS
E SUA INTERDISCIPLINARIDADE

Capa

Fímbria; Jeferson Santiago de França

Projeto e Produção
Coletivo Gráfico Annablume

Annablume Editora
Área Geografia e Meio Ambiente
Conselho Científico
Antônio Carlos Robert Moraes
Pedro Roberto Jacobi
Rita de Cássia Ariza da Cruz

1ª edição: novembro de 2015

© Tercio Ambrizzi | Pedro Roberto Jacobi | Livia Márcia Mosso Dutra

Annablume Editora
Rua Dr. Virgílio de Carvalho Pinto, 554, Pinheiros.
05415-020 . São Paulo . SP . Brasil
Teleendas: (11) 3539-0225 – Tel.: (11) 3539-0226
www.annablume.com.br

SUMÁRIO

- 7 Apresentação: Ciência das Mudanças Climáticas e sua Interdisciplinaridade

Parte A: Ciência Básica

- 13 A1. Mecanismos dinâmicos e físicos associados às ciclogêneses no Atlântico Sul: estudos observacionais e numéricos
- 39 A2. A Amazônia em processo de mudanças ambientais
- 57 A3. Medições e estimativas numéricas da irradiância solar descendente em superfície na região Amazônica – estudos de casos em Humaitá, AM
- 75 A4a. A mudança do clima e seus impactos no oceano Atlântico Sul em escala regional
- 95 A4b. Inter-relações entre o Atlântico Sul, plataforma continental e regiões costeiras do sul e sudeste do Brasil
- 111 A5. Megacidades e sua interação com o clima global: o exemplo de São Paulo
- 135 A6. Evolução histórica e futura dos extremos de chuva diária em São Paulo
- 159 A7. Evolução climática e oceanográfica no Brasil e no oceano adjacente durante o Pleistoceno Superior e o Holoceno: uma atualização

Parte B: Estudos de Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade

- 181 B1. Recursos hídricos e mudanças climáticas
- 205 B2. Cidades e mudanças globais: redes acadêmicas e desafios interdisciplinares
- 229 B3. Análise dos efeitos de variáveis ambientais e das mudanças climáticas na população geriátrica da cidade de São Paulo
- 249 B4. Economia das mudanças climáticas: a experiência brasileira com a utilização de modelos integrados para avaliação de impactos de MCG
- 261 B5. Governança ambiental

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

APRESENTAÇÃO: CIÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SUA INTERDISCIPLINARIDADE

A ação humana na natureza está promovendo alterações de grande escala na superfície terrestre há pelo menos um século. A compreensão dos fatores determinantes dos padrões climáticos mundiais desafia tanto os pesquisadores especializados como a população em geral, sobretudo devido às recentes conclusões do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas¹.

Num contexto marcado pela degradação permanente do meio ambiente e dos seus ecossistemas, chama atenção a prevalência da racionalidade cognitivo-instrumental que agravou a situação ambiental do planeta. Para tanto, coloca-se o desafio de ruptura com a compartimentação do conhecimento, e isto envolve um conjunto de atores do universo educativo em todos os níveis. Abre-se a possibilidade de potencializar outras racionalidades para o engajamento dos diversos sistemas de conhecimento, da formação e capacitação de profissionais em geral, fortalecendo conteúdos e conhecimentos baseados em valores e práticas sustentáveis, indispensáveis para estimular o interesse, o engajamento e a responsabilização.

Essa busca de respostas na interdisciplinaridade deve-se à constatação de que os problemas que afetam a vida no nosso planeta são de natureza global e suas causas não se restringem apenas aos fatores estritamente biológicos, pois revelam dimensões políticas, econômicas, institucionais, sociais e culturais.

Os diálogos interdisciplinares e intersetoriais demandam novas formas de abordagem, sendo necessário focar nas questões colocadas pelo sociólogo alemão Ulrich Beck sob a denominação de “sociedade de risco” que

1. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

reforçam a necessidade de colocar em debate temas que têm, nos diferentes tipos de incerteza, a necessidade de multiplicar conhecimentos e diálogos. O desafio da interdisciplinaridade precisa ser visto como um processo de conhecimento que busca estabelecer cortes transversais na compreensão e explicação em contextos de pesquisas, gerando desdobramentos nos processos de ensino e de intervenção na realidade. Atualmente o avanço rumo a uma sociedade sustentável é permeado de obstáculos, na medida em que existe uma restrita consciência a respeito das implicações do modelo hegemônico de desenvolvimento. Pode se afirmar que as causas básicas que provocam atividades ecologicamente predatórias podem ser atribuídas às instituições sociais, aos sistemas de informação e comunicação e às práticas e valores adotados pela sociedade. Isto implica principalmente na necessidade de estimular uma participação mais ativa da sociedade no debate dos seus destinos, como uma forma de estabelecer um conjunto socialmente identificado de problemas, objetivos e soluções.

O caminho a ser desenhado passa necessariamente por uma mudança no acesso ao conhecimento, à informação e por transformações institucionais e da lógica de governança governamental e corporativa.

A multiplicação dos problemas ambientais tem imposto às diversas disciplinas científicas temas para os quais estas não estavam anteriormente preparadas e para cujo enfrentamento se demanda reformular os parâmetros de ensino e pesquisa. Sem renunciar às especialidades disciplinares atualmente em vigor, mas certamente contribuindo para sua reformulação e desenvolvimento, a noção dos problemas socioambientais recoloca o ser humano no centro das preocupações e dos programas científicos. Assim, a sustentabilidade como novo critério básico e integrador precisa estimular permanentemente as responsabilidades éticas, na medida em que a ênfase nos determinantes extra-econômicos serve para reconsiderar os aspectos relacionados com a equidade, a justiça social e a ética com os seres vivos.

A ênfase em práticas que estimulam a interdisciplinaridade e a transversalidade revela o grande potencial que existe para sair do lugar comum e o trabalho com temáticas que incitam mudanças no comportamento, na responsabilidade socioambiental e na ética ambiental, o que estimula outro olhar. Trata-se da importância de compreender a complexidade envolvida nos processos e o desafio de ter uma atitude mais reflexiva e atuante e, por conseguinte, que os cidadãos se tornem mais responsáveis, cuidadosos e engajados em processos colaborativos com o meio ambiente.

Este livro é composto por artigos elaborados por pesquisadores do Núcleo de Apoio à Pesquisa em Mudanças Climáticas / INterdisciplinary CLimate INvestigation cEnter (NapMC / INCLINE) da Universidade de São Paulo.

O INCLINE possui caráter interdisciplinar, envolvendo dezenas de projetos de pesquisa oriundos de diversas áreas do conhecimento e integrados na temática de mudanças globais, com o objetivo de promover e potencializar colaborações essenciais ao tema de Mudanças Climáticas.

A primeira parte deste livro (parte A) é composta por 7 capítulos, e apresenta abordagens da ciência básica em suas múltiplas dimensões. No capítulo A1, de autoria de Rosmeri P. da Rocha e colaboradores, é apresentada uma revisão dos mecanismos dinâmicos e físicos associados à formação dos ciclones no setor sudoeste do Atlântico Sul, próximo à costa leste da América do Sul. Paulo Artaxo e colaboradores mostram no capítulo A2 como a região amazônica está sofrendo um importante processo de mudança de uso do solo, com impactos no funcionamento do ecossistema amazônico e no clima da região e também com efeitos globais. O capítulo A3, de autoria de Marcia A. Yamasoe e colaboradores, a partir da análise dos resultados de alguns experimentos de campo realizados na região amazônica em estações de queimadas de anos distintos, ilustra o estado da arte em se calcular numericamente a irradiância solar descendente em superfície em diferentes regiões espectrais na presença de partículas de aerossol emitidas por queimadas. O capítulo A4a, de José Edson Pereira e Ilana Wainer, discute os efeitos regionais das mudanças climáticas no oceano Atlântico Sul, enquanto que o capítulo A4b, de autoria de Edmo J. D. Campos e colaboradores apresenta as Inter-Relações entre o Atlântico Sul, Plataforma Continental e Regiões Costeiras do Sul e Sudeste do Brasil, através do desenvolvimento e instalação de plataformas de observação e do uso de modelos numéricos oceânicos. O tema das megacidades e sua interação com o clima global, exemplificando o caso de São Paulo, é abordado por Maria de Fatima Andrade e colaboradores no capítulo A5. A evolução histórica e futura dos extremos de chuva diária em São Paulo é abordada no capítulo A6, elaborado por Maria Assunção F. Silva Dias e colaboradores, notando-se um aumento do número de dias com chuvas extremas durante o século XX e discutem-se possíveis impactos na disponibilidade hídrica da região. Ao fim da primeira parte do livro, o capítulo A7 discorre sobre a evolução climática e oceanográfica no Brasil e oceano adjacente durante o Pleistoceno Superior e o Holoceno, com autoria de Adriana R. Perretti e colaboradores.

Na segunda parte do livro (parte B) são apresentados cinco artigos associados com impactos, adaptação e vulnerabilidade. O capítulo B1, de autoria de Eduardo M. Mendiondo e Humberto R. da Rocha, discute as relações entre recursos hídricos e serviços ambientais sob um contexto de mudanças climáticas. O capítulo B2 aborda o tema das cidades e as mudanças globais com ênfase nas redes acadêmicas e desafios interdisciplinares, de autoria de Sonia M. V. Coutinho e colaboradores. O capítulo B3, de Fábio L. T.

Gonçalves e colaboradores, é resultado de um estudo multidisciplinar que visa avaliar o impacto de variáveis meteorológicas em adultos acima de 65 anos associadas ao conforto térmico humano, no contexto da climatologia atual e de mudanças climáticas. A temática da economia das mudanças climáticas é discutida no capítulo B4, de Eduardo A. Haddad e Eliane T. dos Santos, com base na experiência brasileira e a utilização de modelos integrados para avaliação de impactos. Por fim, o capítulo B5, de autoria de Pedro R. Jacobi e colaboradores, aborda o tema da governança ambiental, apresentando os princípios e características do conceito de governança e como esta é praticada nos processos decisórios referentes às questões ambientais brasileiras, não só como princípio de políticas públicas, mas também no processo de elaboração e discussão de novas legislações.

Este diversificado conjunto de textos propõe aos leitores uma reflexão pautada pela premissa de que a emergência da questão ambiental induz um processo mais complexo do conhecimento e do saber para entender os processos materiais, enfatizando a visão de complexidade e incerteza. As transformações sociais em curso demandam cada vez mais concepções interdisciplinares para orientar estratégias de pesquisa e de formação de políticas ambientais e de desenvolvimento sustentável, devendo-se reconhecer os efeitos das políticas econômicas vigentes sobre a dinâmica dos ecossistemas e sobre as condições de vida das sociedades. Os enfoques de conhecimento se consolidam tendo como referência os estudos em torno dos efeitos da problemática ambiental sobre as transformações metodológicas, e os diálogos interdisciplinares que abrem um novo horizonte para o diagnóstico das mudanças sócio-ambientais.

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

PARTE A : CIÊNCIA BÁSICA

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

A1. MECANISMOS DINÂMICOS E FÍSICOS ASSOCIADOS ÀS CICLOGÊNESES NO ATLÂNTICO SUL: ESTUDOS OBSERVACIONAIS E NUMÉRICOS

ROSMERI PORFÍRIO DA ROCHA¹, TERCIO AMBRIZZI¹, MICHELLE SIMÕES REBOITA², LUIZ FELIPPE GOZZO¹, CLARA MIHO NARUKAWA IWABE³

INTRODUÇÃO

Os ciclones estão entre os sistemas sinóticos de latitudes médias mais explorados cientificamente, tanto em termos observacionais como teóricos e numéricos. Estes sistemas exercem forte controle nas condições de tempo onde atuam e também no clima médio global, já que participam do transporte de calor, umidade e momento entre equador e pólo (Peixoto e Oort, 1992). Desde as pesquisas pioneiras de Bjerkness (1919) e Bjerkness e Solberg (1922) a dinâmica segundo a qual os ciclones se desenvolvem sofreu enormes avanços através das teorias de instabilidades baroclínica e barotrópica (Charney, 1947; Eady, 1949; Kuo, 1949) e da teoria quase-geostrófica (Holton, 2004). No entanto, o desenvolvimento destes sistemas pode sofrer modificações devido às forçantes diabáticas que não estão contempladas nestas teorias. Adicionalmente, o desenvolvimento dos ciclones extratropicais é influenciado pela distribuição de terra e mar, pela proximidade de zonas baroclínicas climatológicas assim como sua localização e orientação (Simmonds e Keay, 2000).

A costa leste da América do Sul, e em especial o Oceano Atlântico Sul sudoeste (ASO), é uma área de desenvolvimento e intensificação de ciclones que também vêm sendo bastante estudados, principalmente os ciclones com rápido aprofundamento. Já outros eventos com menor taxa de aprofundamento, que também produzem condições de tempo severo na costa brasileira, têm recebido menor atenção. Buscando preencher esta lacuna, o presente trabalho irá apresentar um breve resumo dos estudos

1. Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, IAG/USP

2. Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI

3. Faculdade de Ciências de Bauru, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP.

recentes que têm aprofundado o conhecimento da climatologia e da importância de fontes diabáticas de calor nas ciclogêneses sobre o ASO. Entre os estudos aqui apresentados destacam-se a identificação e descrição de estruturas de desenvolvimento até então não documentadas como os ciclones secundários (Iwabe e da Rocha, 2009), ciclones evoluindo segundo modelo conceitual de Shapiro-Keyser (Shapiro e Keyser, 1990; da Rocha *et al.*, 2004), além da climatologia dos ciclones na costa sul-sudeste do Brasil, obtida tanto com dados observacionais como através de um modelo regional de clima (Reboita *et al.* 2010).

MECANISMOS DE GÊNESE DOS CICLONES EXTRATROPICAIS

Os mecanismos de gênese e evolução dos ciclones extratropicais têm sido amplamente estudados desde os trabalhos pioneiros de Bjerkness. Atualmente, está bem estabelecido que estes ciclones formam-se basicamente em função do aquecimento diferencial entre pólo-equador e rotação da Terra. Porém, outras forçantes podem influenciar as ciclogêneses, tais como a topografia (Gan e Rao, 1994; Seluchi e Saulo, 1998; Reboita *et al.*, 2012), liberação de calor latente por convecção (Gutowski e Jiang, 1998; Seluchi e Saulo, 1998; Iwabe e da Rocha, 2009), interação troposfera-estratosfera (Hoskins *et al.*, 1985), interação superfície-atmosfera (Nuss e Anthes, 1987), entre outros.

Nos processos de interação superfície-atmosfera, os fluxos turbulentos de calor sensível (SH) e latente (LH), ou a soma dos dois (SLHF), se destacam como importante fonte de energia influenciando o desenvolvimento de ciclones extratropicais, especialmente sobre os oceanos. O real papel destes fluxos, e a maneira como interagem com sistemas atmosféricos é um tópico controverso. Alguns estudos mostram que os SLHF intensificam as circulações ciclônicas (Kuo e Low-Nam, 1990; Chang *et al.*, 1996; Piva *et al.*, 2008; Piva *et al.*, 2011), aquecendo a baixa troposfera e aumentando a liberação de calor latente através de processos convectivos, o que favorece o abaixamento de pressão em superfície. Outros estudos sugerem que tais fluxos podem enfraquecer alguns sistemas (Branscombe *et al.*, 1989; Reed e Simmons, 1991), através da redução da baroclinia em superfície ao aquecer o setor frio do ciclone. A atuação dos SLHF no deslocamento dos ciclones também é incerta, com alguns estudos indicando que estes fluxos não alteram a trajetória (Reed e Simmonds, 1991; Piva *et al.*, 2008) e outros que mostram menor velocidade de deslocamento do ciclone (Gozzo, 2010).

De forma geral, sobre a interação entre os ciclones extratropicais e os SLHF, muitas conclusões foram obtidas em experimentos numéricos de ciclones idealizados, e a quase totalidade dos trabalhos observacionais ou simulações de casos reais focaram principalmente em ciclones explosivos,

que apresentam aprofundamento anormalmente rápido nos quais os SLHF têm papel fundamental na fase anterior ao rápido aprofundamento (Bosart e Lin, 1984; Uccellini *et al.*, 1987; Atlas, 1987; Kuo *et al.*, 1991). Vários estudos numéricos investigaram a influência dos SLHF em eventos de ciclones extratropicais no Pacífico (Chen *et al.*, 1983), Atlântico Norte (Holt e Chang, 1993) e Mediterrâneo (Lagouvardos *et al.*, 2007), enquanto na costa leste da América do Sul o número de estudos ainda é pequeno (Piva *et al.*, 2008; Oda, 2005, Gozzo, 2010). Neste contexto, a influência dos SLHF será abordada aqui através de: (I) modelagem climática regional, buscando identificar quais das regiões ciclogênicas da costa leste da América do Sul são mais afetadas pelos SLHF; (II) experimento numérico do ciclone tipo Shapiro-Keyser ocorrido no final de maio de 1997, que gerou ventos intensos e ondas sobre o mar com forte impacto na costa sul-sudeste do Brasil (da Rocha, 1999); (III) análise sinótica e dinâmica da interação entre a alta troposfera e os SLHF durante o desenvolvimento de um ciclone secundário. Adicionalmente, a presença de fontes diabáticas na baixa e média troposfera, resultante da atividade convectiva, também contribui para modificar ciclogêneses em latitudes médias (Carlson, 1991) e possivelmente nos subtropicais. Então, investiga-se também o impacto destas fontes diabáticas no desenvolvimento, deslocamento e aprofundamento de um ciclone Shapiro-Keyser.

FLUXOS DE SLHF E CICLOGÊNESES NO ATLÂNTICO SUL: SIMULAÇÃO CLIMÁTICA

Experimentos numéricos para eventos de ciclones extratropicais em diversas regiões do globo mostram resultados às vezes conflitantes sobre o impacto dos SLHF. Simulações climáticas regionais apresentam-se como metodologia alternativa para entender o impacto dos SLHF não em um evento individual, mas sim nas características médias das ciclogêneses. Reboita *et al.* (2012) realizaram simulações climáticas para o ano de 1990 com o RegCM3 (*Regional Climate Model version 3*; Pal *et al.*, 2007) para investigar como estes fluxos impactam a climatologia de ciclones no ASO. Foram realizadas uma simulação controle (ExpCTRL), que incluiu toda a física disponível no RegCM3, e outra onde foram desligados os SLHF na camada superficial (ExpFlux).

A figura A1.1 apresenta a climatologia de 10 anos da densidade ciclogênica obtida da reanálise 2 do NCEP-DOE (R2; Kanamitsu *et al.*, 2002) e do RegCM3 (Reboita *et al.*, 2010). Para o ano de 1990 (figura não mostrada), o RegCM3 simula densidade ciclogênica similar à climatologia, ou seja, maior densidade de ciclones na costa sul da Argentina, leste do Uruguai e costa sul/sudeste do Brasil. A diferença entre o ExpFlux e ExpCTRL

(ExpFlux – ExpCTRL) para a atividade ciclogênica (Figura A1.2a) indica decréscimo na densidade de ciclogêneses sobre o ASO, com maiores decréscimos no setor central do oceano, costa sul-sudeste do Brasil (RG1) e costa Sudeste da Argentina (RG3). Isto resultaria do aumento da estabilidade estática na baixa troposfera e redução da disponibilidade de umidade na ausência dos SLHF; ambos os processos desfavorecem as ciclogêneses. Na costa do extremo sul do Brasil e Uruguai (RG2), a exclusão destes fluxos praticamente não afeta a densidade ciclogênica, indicando predomínio de processos dinâmicos no desenvolvimento de ciclones nesta área.

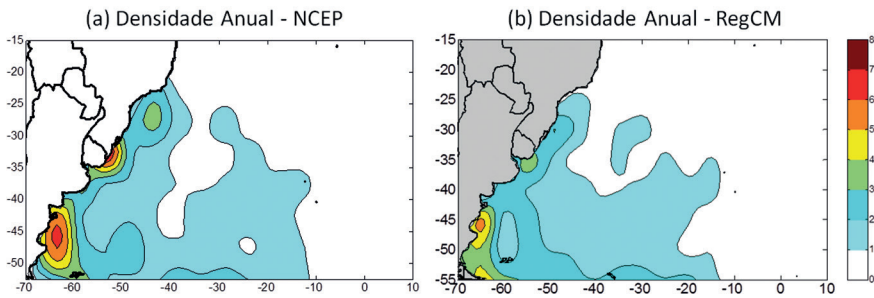


Figura A1.1: Densidade anual de ciclogêneses (10^{-4} km^{-2}) no período 1990-1999, obtida (a) da Reanálise NCEP R2 e (b) do RegCM3. A densidade é (número de sistemas/ km^2) $\times 10^4$, onde na escala de cores o valor 1,5 corresponde a aproximadamente 37,5 sistemas. A vorticidade inicial utilizada foi de $\zeta \leq -1,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (Fonte: Reboita, 2008).

A evolução temporal da vorticidade relativa durante o ciclo de vida mostra que, em média, inicialmente (até 6-12 horas após o início) os ciclones possuem intensidade similar nos experimentos ExpCTRL e ExpFlux (Figura A1.2b). No entanto, 12 horas após o início as diferenças começam a aumentar e crescem quase que linearmente, tornando-se grandes após 36 horas e mantendo-se assim até 72 horas. Isto indica que os SLHF possuem maior influência na intensidade no estágio maduro do ciclone, com impacto menor na fase inicial. Influência similar foi obtida em experimentos numéricos para eventos individuais de Piva *et al.* (2008) e Gozzo (2010).

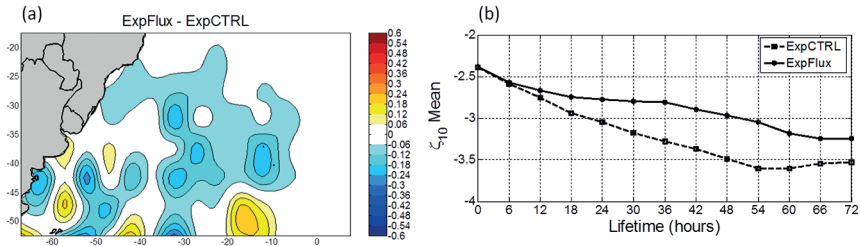


Figura A1.2: Média para 1990 da (a) diferença entre ExpFlux e ExpCTRL (ExpFlux – ExpCTRL) da densidade ciclogénica ($\times 10^{-4} \text{ km}^{-2}$); (b) vorticidade relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) média ao longo do ciclo de vida dos ciclones no ExpCTRL (linha tracejada) e ExpFlux (linha contínua). (Fonte: Reboita *et al.*, 2012).

A vorticidade na primeira posição dos ciclones nas regiões RG1, RG2 e RG3 (ver Reboita *et al.*, 2010) é ligeiramente menor no ExpFlux do que no ExpCTRL (Figura A1.3a), mas as diferenças são maiores quando se considera a média ao longo do tempo de vida dos sistemas (Figura A1.3b). Isto mostra que os fluxos de calor e umidade na interface ar-mar atuam principalmente como mecanismo de intensificação dos ciclones ao longo do ciclo de vida e não como disparador, como obtido também em simulações de eventos individuais (Piva *et al.*, 2008; Oda, 2005; Gozzo, 2010). Adicionalmente, diferenças também são notadas no tempo de vida médio e distância percorrida pelos ciclones, principalmente na RG1 (Figuras A1.3c,d). Nesta região, a ausência dos fluxos reduz em 40% o tempo de vida médio dos ciclones, enquanto a redução na distância percorrida é de $\sim 70\%$. Resultado similar foi obtido na simulação do ciclone de maio de 1997 (Gozzo e da Rocha, 2013), mas é diferente das pequenas alterações obtidas na trajetória e velocidade de ciclones explosivos na costa leste da América do Sul na ausência dos SLHF (Piva *et al.*, 2008; Oda, 2005). No entanto, este tipo de sistema não é comum na RG1, onde predominam ciclones inicialmente fracos (Reboita *et al.*, 2010). Nestes últimos, os SLHF mostram-se mais importantes para o desenvolvimento do que para os mais intensos, mais comuns nas RG2 e RG3 (Figuras A1.3c,d) onde forçantes dinâmicas são, em geral, mais intensas (Reboita, 2008).

Algumas diferenças entre o ExpCTRL e o ExpFlux ocorrem também em baixos níveis da atmosfera (850 hPa), onde o anticiclone subtropical do Atlântico no ExpFlux é mais intenso desde o dia que antecede até um dia após as ciclogêneses. Como consequência, a convergência de umidade no ExpFlux é mais fraca na RG1 desde o dia anterior até o dia da ciclogênese, explicando então a redução na densidade ciclogénica na RG1 no ExpFlux (Figura A1.2a). Como discutido em Reboita *et al.* (2012), existe forte

dependência dos ciclones na RG1 na disponibilidade de umidade na baixa troposfera, enquanto este mecanismo possui contribuição secundária para os ciclones das RG2 e RG3.

Do ponto de vista climático, as Figuras A1.2 e A1.3 mostram que os SLHF possuem importância menor na fase inicial dos sistemas, mas esta importância cresce ao longo do ciclo de vida. Adicionalmente, as simulações indicam maior impacto no tempo de vida e trajetória dos ciclones do que documentado previamente.

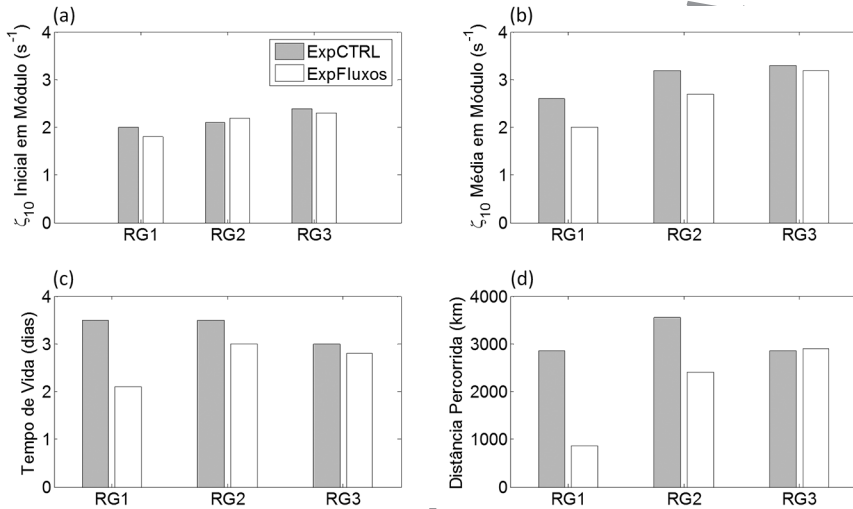


Figura A1.3: Valores médios para 1990 de: (a) vorticidade relativa ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) na primeira posição dos ciclones, (b) vorticidade relativa média ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) ao longo do tempo de vida dos ciclones, (c) tempo de vida (dias) e (d) distância percorrida pelos ciclones (km) para experimentos ExpCTRL e ExpFlux nas regiões RG1, RG2 e RG3 (Fonte: Reboita, 2008).

FONTES DIABÁTICAS DE CALOR: EXPERIMENTOS NUMÉRICOS PARA UM CICLONE SHAPIRO-KEYSER

A interação entre a estrutura dinâmica e fontes diabáticas de calor é abordada aqui através de experimentos numéricos de sensibilidade dos SLHF e parametrização da convecção. O ciclone para estas análises se formou na costa leste de Santa Catarina ($\sim 28^\circ\text{S}$) em 28 de maio de 1997. Após iniciado, este ciclone deslocou-se lentamente para leste-sudeste, mantendo-se em latitudes subtropicais até 07 de junho, totalizando 10 dias de vida, um valor bem superior ao tempo de vida médio de 3,0 dias para os ciclones na região (Reboita *et al.* 2010). Este sistema nos primeiros dias gerou intensos ventos e ondas no mar que atingiram as costas sul e sudeste do Brasil causando mortes e naufrágios entre os dias 29 e 31 de maio de

1997 (Campos, 1999; da Rocha, 1999). Além do tempo severo associado, uma motivação adicional para estudar esse evento foi a inabilidade do modelo global do CPTEC/INPE (Bonatti, 1996), operacional na época, em prever o desenvolvimento deste ciclone, assim como ocorreu também mais recentemente com o ciclone “Catarina” (Bonatti *et al.*, 2004), indicando a necessidade de se conhecer melhor os processos físicos atuantes nas ciclogêneses sobre o ASO.

Uma particularidade na evolução sinótica deste ciclone foi a presença de seclusão quente, frentes fria e quente exibindo padrão T-bone e frente quente mais intensa do que a fria, ou seja, características de ciclo de vida de ciclone tipo Shapiro-Keyser (Shapiro e Keyser, 1990). Desta forma, daqui em diante, este sistema será referido como ciclone Shapiro-Keyser. Dois processos diabáticos são explorados: sensibilidade aos SLHF e aos processos convectivos.

INFLUÊNCIA DE PROCESSOS DE INTERAÇÃO AR-MAR: ExpCTRL e ExpFLUX

Dois experimentos numéricos foram conduzidos com o modelo WRF (Skamarock *et al.*, 2008): ExpCTRL e ExpFlux que incluem e suprimem, respectivamente, os SLHF na camada limite superficial. Estas simulações utilizaram resolução horizontal de 30 km, 27 níveis na vertical e foram iniciadas (0000 UTC de 27 maio de 1997) e dirigidas pela R2.

A Figura A1.4 apresenta a pressão ao nível médio do mar e a chuva acumulada em duas diferentes fases (desenvolvimento e estágio maduro) do ciclone no ExpCTRL e ExpFlux. Durante o desenvolvimento (0000 UTC do dia 29 de maio de 1997), o ciclone no ExpFlux situa-se a ~500 km a oeste daquele do ExpCTRL (Figuras A1.4a,b). Além disto, o ExpCTRL simula chuva mais intensa ao longo da frente quente, orientada quase leste-oeste (centrada em aproximadamente 32°S), enquanto no ExpFlux a chuva ocorre em uma área menor a sudeste do centro do ciclone (Figuras A1.4a,b). Em 31 de maio, quando o ciclone atinge a fase madura, as diferenças são maiores entre os experimentos (Figuras A1.4c,d). No ExpCTRL o ciclone ocupa uma grande área sobre o ASO, com maior parte da chuva distribuída em torno do seu centro, ao longo e na retaguarda da frente quente. No ExpFlux o anticiclone polar (4 hPa mais intenso do que no ExpCTRL) na retaguarda do ciclone alonga-se para leste, enquanto o ciclone em si é muito fraco (1020 hPa de pressão central) e permanece estacionário próximo à costa sudeste do Brasil. Além disto, no ExpFlux a chuva é muito mais fraca do que no ExpCTRL e ocupa pequena área no sudeste do ciclone (Figura A1.4d).

A estrutura de frente fria e quente quase perpendiculares e fratura frontal, que caracterizam um ciclone do tipo Shapiro-Keyser, é evidente no

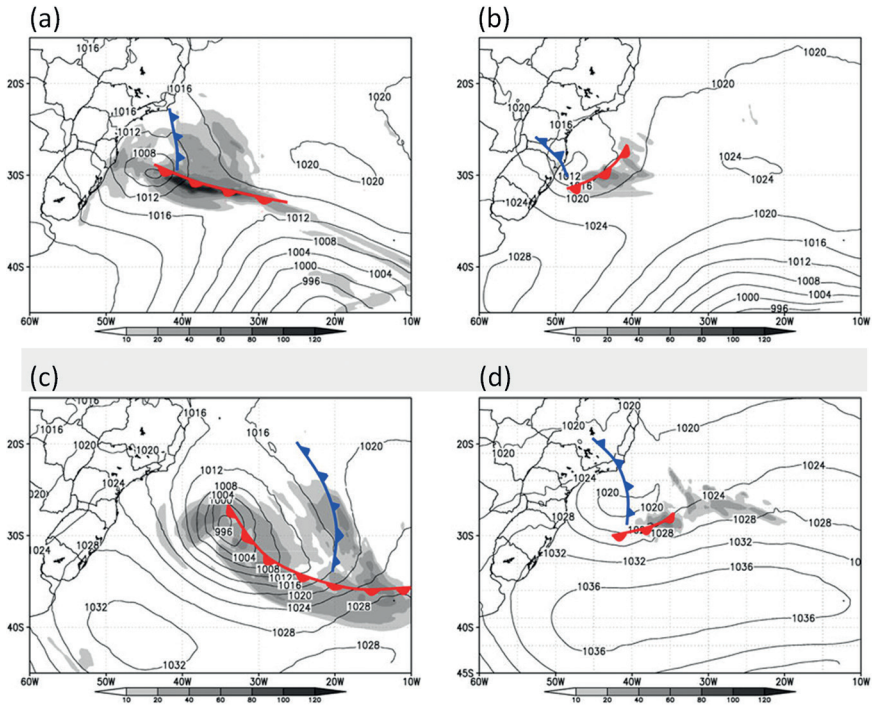


Figura A1.4: Pressão ao nível médio do mar (hPa, linhas contínuas) as 0000 UTC do dia 29 e precipitação acumulada em 24 horas (sombreado, $\text{mm } 24 \text{ h}^{-1}$) durante o dia 29 para experimentos (a) ExpCTRL, (b) ExpFlux; (c)-(d) mesmo que (a)-(b), mas para o dia 31 de maio (Fonte: Gozzo e da Rocha 2013).

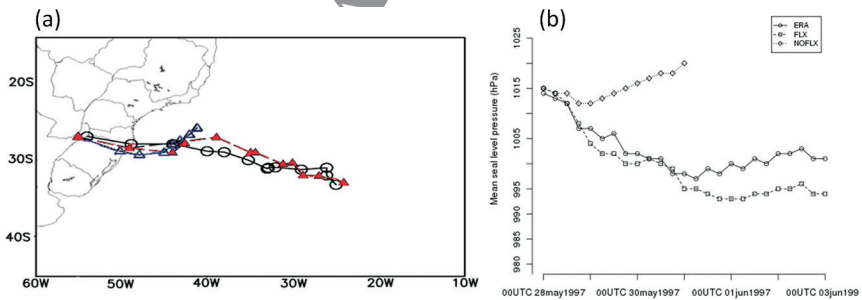


Figura A1.5: (a) Trajetória do ciclone de acordo com os dados Era-Interim (círculos abertos), ExpCTRL (triângulos preenchidos) e ExpFlux (triângulos abertos) e (b) pressão central no ciclone. A trajetória inicia-se em 0000 UTC de 28 de maio e termina às 0000 UTC de 03 de junho de 1997, com pontos marcados a cada 12 horas (Fonte: Gozzo e da Rocha 2013).

ExpCTRL na fase madura (0000 UTC do dia 31; Figura A1.4c). O ExpCTRL reproduz o padrão frontal T-bone e frente quente mais intensa do que a frente fria, o que não ocorre no ExpFlux (Figura A1.4d).

A Figura A1.5 apresenta a trajetória e intensidade do ciclone, desde 0000 UTC de 28 de maio até 0000 UTC de 03 de junho de 1997. No ExpCTRL o ciclone segue trajetória similar à da reanálise ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011), enquanto no ExpFlux o ciclone primeiro se move para leste e depois para nordeste, desaparecendo do campo de pressão ao nível médio do mar às 0000 UTC de 31 de maio. Os menores tempo de vida e distância percorridos pelo ciclone no ExpFlux estão de acordo com o comportamento climatológico dos ciclones no ASO na ausência de SLHF. Estes fluxos também impactam a taxa de aprofundamento do sistema (Figura A1.5b). No ExpCTRL, a pressão central evolui no tempo com intensidade semelhante à da reanálise ERA-Interim: fraco aprofundamento desde o estágio inicial (28 maio) até a fase madura (31 maio), de 1014 para 998 hPa, e após 1 de junho a pressão permanece quase constante até o dia 3, com valores de aproximadamente 996 e 1000 hPa no ExpCTRL e ERA-Interim, respectivamente. Esta diferença de 4 hPa é muito menor do que a encontrada por da Rocha e Caetano (2010) ao analisar numericamente o impacto do calor latente associado à convecção cumulus neste evento. No ExpFlux, a menor pressão do ciclone é 1013 hPa às 0000 UTC de 29 de maio, e nos horários seguintes ocorre enfraquecimento contínuo até o ciclone desaparecer do campo de pressão às 0000 UTC de 31 de maio. Ainda comparando com da Rocha e Caetano (2010), nota-se maior influência do SLHF do que da convecção cumulus na taxa de aprofundamento do ciclone, onde os SLHF atuam fornecendo vapor d'água e calor para a atmosfera ativar a atividade convectiva.

As diferenças nas trajetórias (Figura A1.5a) seriam principalmente atribuídas à intensidade da advecção de temperatura e aquecimento diabático nos experimentos. Inicialmente (entre os dias 27 e 28), estas diferenças são pequenas, mas aumentam ao longo do ciclo de vida do ciclone. Em baixos níveis, tanto a advecção quente, no setor quente, como a fria, no setor frio do ciclone, são similares nos experimentos ExpCTRL e ExpFlux às 0000 UTC do dia 29 (Gozzo, 2010). No entanto, o aquecimento diabático integrado na camada 900-500 hPa é muito mais intenso e ocupa grande área em torno do centro do ciclone no ExpCTRL (atinge até 30 K dia^{-1}) do que no ExpFlux (atinge até 10 K dia^{-1} ; Gozzo e da Rocha, 2013). O maior aquecimento ocorre ao longo da frente quente, onde o movimento vertical ascendente e convecção cumulus são também mais intensos, do que ao longo da frente fria. Fisicamente, na ausência de SLHF a circulação vertical é mais fraca, com conseqüente redução das taxas de precipitação e de aquecimento diabático.

Existem diferenças consideráveis entre os experimentos ExpCTRL e ExpFlux em níveis tão altos quanto 250 hPa (Figura A1.6). Em termos de estrutura vertical, o ciclone em superfície mantém-se estacionário próximo à costa do sul do Brasil e situado abaixo do eixo do cavado em 250 hPa no ExpFlux, ou seja, a oeste da região onde a advecção de vorticidade ciclônica neste nível favorece divergência de massa e movimento vertical ascendente em níveis inferiores. Esta estrutura vertical desfavorece o aprofundamento futuro do ciclone. No ExpCTRL o acoplamento vertical é bastante definido, com o ciclone situado corrente abaixo do cavado sob advecção de vorticidade ciclônica em altos níveis favorecendo divergência de massa e, portanto, queda de pressão em superfície.

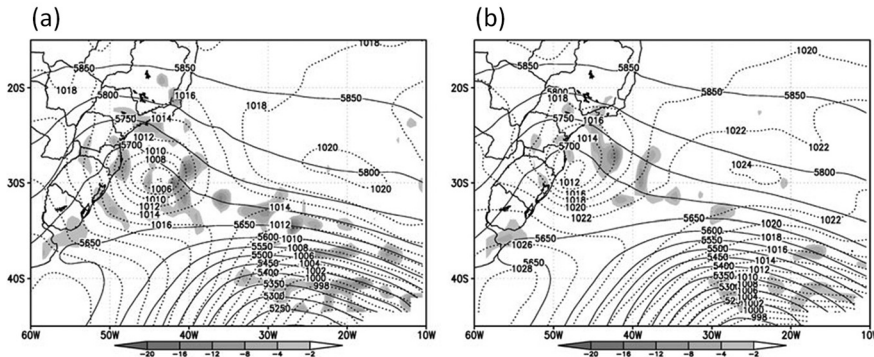


Figura A1.6: 0000 UTC de 29 de maio de 1997: altura geopotencial (linhas contínuas em m), advecção de vorticidade relativa ciclônica (sombreado em $\times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$) em 250 hPa e pressão ao nível médio do mar (linhas tracejadas) nos experimentos (a) ExpCTRL e (b) ExpFlux. (Fonte: Gozzo e da Rocha 2013).

Simulações anteriores para ciclones do tipo Shapiro-Keyser (Nielsen e Sass, 2003; Kuwano-Yoshida e Asuma, 2008) não mostraram mudanças no deslocamento nem na estrutura frontal na ausência de liberação de calor latente, já que estes sistemas foram forçados principalmente por processos em altos níveis, como advecção de vorticidade ciclônica. Uma possível explicação para as diferenças encontradas entre ExpFlux e ExpCTRL é a de que ao mudar o deslocamento do ciclone, com conseqüente desacoplamento vertical entre a onda em altos níveis e o ciclone em superfície, esse situa-se sob região desfavorável ao seu aprofundamento.

PARAMETRIZAÇÕES DE CONVECÇÃO E AQUECIMENTO DIABÁTICO NO CICLONE SHAPIRO-KEYSER

Experimentos numéricos com o modelo de área limitada MAL (da Rocha e Caetano, 2010) foram conduzidos utilizando 75 km e 25 km de resolução

horizontal para o ciclone Shapiro-Keyser. Os experimentos com 75 km utilizaram as parametrizações de Kuo (CKUO), Kain-Fritsch (CKF) e desativaram os processos úmidos (CDRY). Foram realizados experimentos similares com 25 km de grade horizontal (FKUO, FKF e FDRY) para investigar a importância de processos de mesoescala na fase de crescimento/amadurecimento do sistema. As simulações CKUO, CKF e CDRY (FKUO, FKF e FDRY) foram iniciadas às 1200 UTC do dia 27 (1200 UTC de 28 de maio) e integradas por 60 horas (36 horas), com condições iniciais/fronteiras fornecidas pelo modelo global do CPTEC/COLA (CKUO).

A Figura A1.7 apresenta a trajetória e pressão central do ciclone nos diferentes experimentos numéricos e na R2. O experimento CKF apresenta trajetória mais próxima à da R2, e ao final da simulação (0000 UTC de 30 de maio) o ciclone situa-se a cerca de 140 km ao sul da R2. Nos experimentos CKUO, FKF e FKUO o ciclone sempre situa-se ao sul da R2, implicando em erro final de posição de aproximadamente 370 km no CKUO. O FKF simula posições mais próximas ao CKUO do que o CKF, principalmente devido à utilização do CKUO como condições inicial e de fronteira. O CKUO e FKUO, que diferem em resolução horizontal, simulam o ciclone com trajetória similar, indicando pequeno impacto da resolução horizontal no posicionamento do ciclone. McInnes *et al.* (1994) também encontraram frentes frias com posições/deslocamentos semelhantes em previsões numéricas utilizando 150 e 50 km de espaçamento de grade horizontal. Pequena diferença na posição de um ciclone extratropical também ocorreu nos experimentos numéricos conduzidos com 50 e 25 km por Gyakum *et al.* (1996).

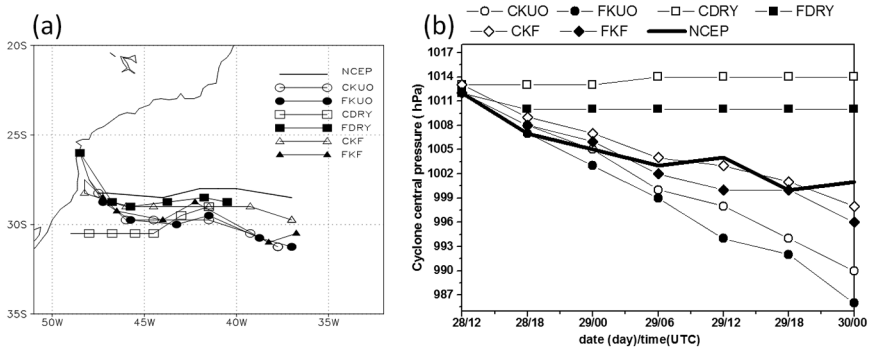


Figura A1.7: (a) Trajetória do ciclone a cada 6 horas partindo de 1200 UTC de 28 de maio até 0000 UTC de 30 de maio e (b) série temporal da pressão no centro do ciclone (hPa) para os experimentos numéricos e a R2 (Fonte: da Rocha e Caetano, 2010).

Nos experimentos CDRY e FDRY, que excluem a liberação de calor latente, as posições sucessivas do ciclone estão defasadas em aproximadamente 12

horas em relação à R2, levando aos maiores erros de posicionamento ao final da simulação (450 km no CDRY e 340 km no FDRY). No entanto, estes erros são menores do que no ExpFlux (Figura A1.5a), indicando maior controle dos SLHF do que da liberação de calor latente devida à convecção no deslocamento do ciclone.

Em termos de intensidade, os experimentos “secos” simulam pressão central constante de 1014 e 1011 hPa no CDRY e FDRY ao longo do ciclo de vida do ciclone (Figura A1.7b), ou seja, não aprofundam o sistema. O ciclone “seco” é até 12 hPa mais fraco do que na R2. A menor pressão central no FDRY comparado ao CDRY resulta principalmente da utilização do CKUO como condições inicial e de fronteira para o FDRY. Comparativamente, a intensidade do ciclone “seco” (na ausência de aquecimento diabático associado à convecção cumulus) é mais próxima da análise do que na ausência de SHLF, onde a pressão central aumenta com o tempo (Figura A1.5b). Por outro lado, até 0000 UTC de 29 de maio (fase inicial do ciclone), a taxa de aprofundamento do ciclone é semelhante nos experimentos úmidos. A partir deste horário, CKUO e FKUO simulam um ciclone muito mais intenso, com diferença de pressão de -14 hPa entre FKUO e R2. No CKF e FKF a taxa de aprofundamento do ciclone é menor e segue à da R2, implicando que ao final da simulação (0000 UTC de 30 de maio) a intensidade do ciclone no CKF é muito próxima à da R2 (Figura A1.7b).

Em síntese, a Figura A1.7 indica (a) fraco impacto da resolução horizontal na intensidade e trajetória do ciclone; (b) a importância da liberação de calor latente, já que os maiores erros de posição e intensidade do ciclone ocorrem na ausência deste processo; (c) após formado (0000 UTC do dia 29 de maio) a parametrização de convecção KF fornece menores erros de posição e intensidade do que a de Kuo. Portanto, é importante discutir como estas parametrizações aquecem a atmosfera através da liberação de calor latente durante as diferentes fases do ciclone.

Os perfis verticais de aquecimento por calor latente (convectivo, grande-escala e total) sobre a área do ciclone (60°W-48°W e 32°S-20°S) são apresentados nas Figuras A1.8 e A1.9, respectivamente, para as fases inicial (27-28 de maio de 1997) e madura do ciclone (28-29 maio de 1997). Como inicialmente a convecção ocorre em um ambiente úmido (da Rocha, 1999), a massa processada pela corrente ascendente no esquema de KF aumenta com a altura (isto é, não ocorre entranhamento de ar seco na corrente ascendente), implicando em máximo aquecimento convectivo na troposfera superior (próximo a 400 hPa na Figura A1.8a). Duas camadas de resfriamento são evidentes no CKF: abaixo de 850 e acima de 300 hPa, associadas, respectivamente, com a inclusão explícita de corrente descendente e ultrapassagem (*overshooting*) do nível de equilíbrio pela corrente ascendente (Kain e Fritch, 1990). O CKUO apresenta um perfil

vertical mais simples, com máximo aquecimento convectivo próximo de 600 hPa e uma camada muito fina de resfriamento próximo da superfície, devida à ascensão pela adiabática úmida desde a superfície (Geleyn, 1985).

Os perfis verticais devido à precipitação na escala da grade (Figura A1.8b) mostram máximo aquecimento em ~500 hPa que supera o aquecimento convectivo (Figura A1.8a). Nota-se que no CKF a condensação na escala da grade produz maior aquecimento nas camadas onde o aquecimento convectivo é menor, ou seja, abaixo de 500 hPa e acima de 300 hPa resultante, respectivamente, do resfriamento pela corrente descendente e *overshooting* do topo de nuvens. A estrutura vertical da diferença entre CKUO e CKF do aquecimento diabático total (Figura A1.8b) é muito semelhante à diferença de temperatura potencial entre estes experimentos (da Rocha e Caetano, 2010), i.e., maior aquecimento no CKUO em baixos e altos níveis da atmosfera. Esta diferença contribui para explicar o maior aprofundamento inicial do ciclone no CKUO do que no CKF (Figura A1.7b).

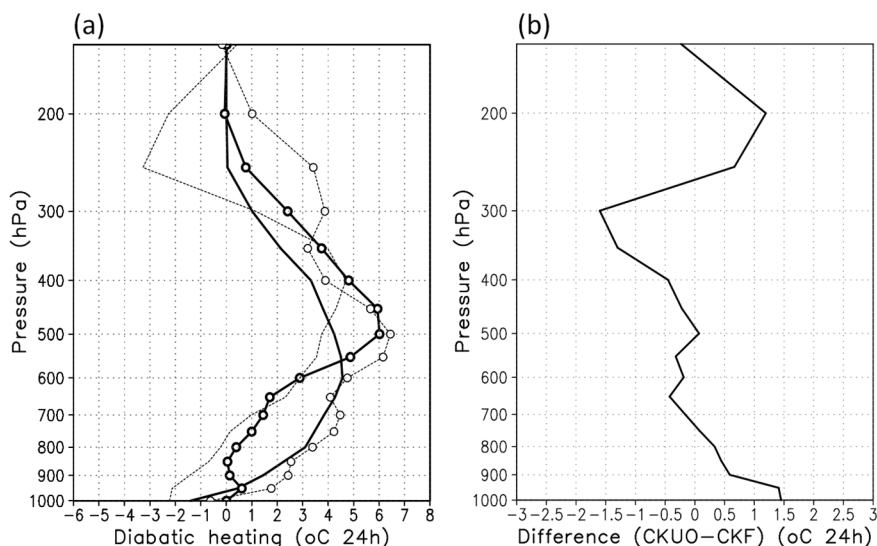


Figura A1.8: Perfil vertical médio na área do aquecimento diabático ($^{\circ}\text{C } 24\text{h}^{-1}$), entre 1200 UTC de 27-28 de maio de 1997, (a) convectivo (linhas) e na escala da grade (círculos abertos e linhas) para o experimento CKUO (linhas grossas) e CKF (linhas finas tracejadas) e (b) diferença entre CKUO e CKF (CKUO-CKF) do aquecimento diabático total (convectivo + escala da grade) (Fonte: da Rocha e Caetano, 2010).

Na fase madura do ciclone, as simulações (FKUO, FKF, CKUO e CKF) indicam chuva mais intensa no setor centro-sul do ciclone, ou seja, ao longo da frente quente como esperado para um ciclone Shapiro-Keyser. No entanto, existem algumas diferenças entre as simulações. No FKF a chuva no setor norte do ciclone é mais intensa e espalhada em área, enquanto

que o FKUO simula chuva mais intensa concentrada em uma área menor no centro-sul do ciclone. Considerando a mesma área em torno do centro do ciclone, a chuva média na área atinge 12,8 e 10,9 mm 24 h⁻¹ no FKF e FKUO, respectivamente, enquanto a observação fornece 11,6 mm 24 h⁻¹, indicando pequeno erro nas simulações.

O máximo aquecimento convectivo na fase madura ocorre próximo de 750 hPa no CKUO, isto é, em níveis mais baixos do que 24 horas antes (Figura A1.9a). Este abaixamento do nível de máximo aquecimento deve-se à maior atividade convectiva sobre o centro-norte do ciclone, onde o ar mais úmido está confinado na baixa troposfera sobreposto por uma camada seca acima (da Rocha e Caetano, 2010). De acordo com a formulação de Geleyn (1985) para o esquema de Kuo, o máximo aquecimento convectivo ocorre em níveis onde existe maior disponibilidade de umidade. O perfil de aquecimento do CKF apresenta uma estrutura vertical mais complexa, com um máximo em 750 hPa e outro em 450 hPa (Figura A1.9a). O máximo em 750 hPa resulta da convecção sobre o centro-norte do ciclone, onde o ar úmido em baixos níveis penetra na média troposfera mais seca, aumentando o entranhamento de ar seco e diminuindo a massa processada pela corrente ascendente em altos níveis. Por outro lado, o máximo em 450 hPa deve-se à convecção no centro-sul do ciclone ocorrendo em ambiente mais úmido, com conseqüente aumento do fluxo de massa com a altura e aquecimento convectivo máximo na alta troposfera (da Rocha e Caetano, 2010). Como a massa na corrente ascendente diminuiu (Figura A1.9a) comparado com 24 horas antes (Figura A1.8a) existe também redução no resfriamento na alta troposfera devido ao *overshooting* da nuvem no CKF.

Em ambos CKUO e CKF, o aquecimento na escala da grade maximiza na média troposfera (Figura A1.9a), sendo maior do que 24 horas antes (Figura A1.8a). Além disto, o aquecimento diabático total é mais intenso no CKUO do que no CKF, atingindo 8°C 24 h⁻¹ próximo à superfície (Figura A1.9b). O efeito da corrente descendente no esquema de KF reduz o aquecimento diabático, principalmente em baixos níveis, contribuindo para reduzir a taxa de aprofundamento do ciclone e aproximando-o da R2 (Figura A1.7b). Outro fator atuando para o menor aquecimento convectivo no CKF é o desentranhamento de massa na corrente ascendente quando penetra um ambiente mais seco acima, reduzindo a massa processada nesta corrente e o aquecimento diabático. Ambos os processos contribuem para um ambiente mais estável e inibem o aquecimento diabático excessivo e o super-aprofundamento do ciclone no CKF.

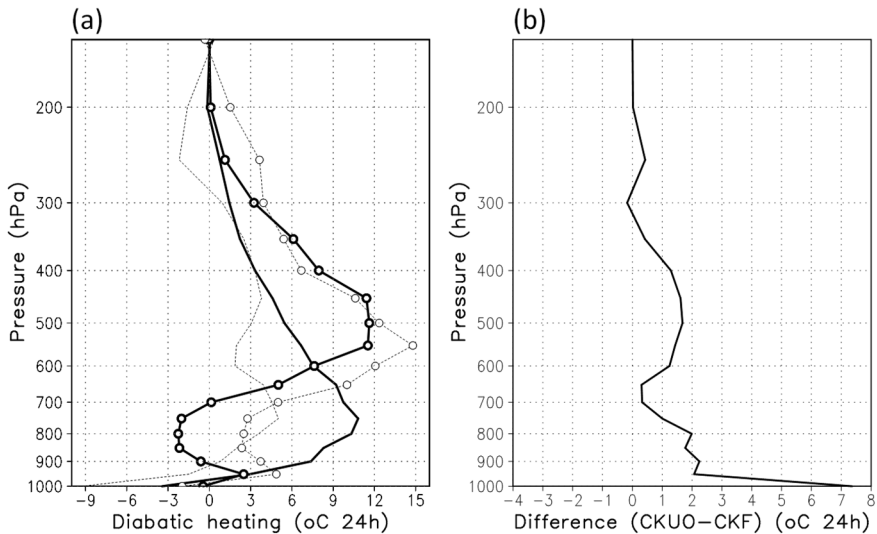


Figura A1.9: Idem à Figura A1.8, mas para 1200 UTC de 28-29 de maio (Fonte: da Rocha e Caetano 2010).

INTERAÇÃO ENTRE FONTES DIABÁTICAS E VORTICIDADE POTENCIAL: O CICLONE SECUNDÁRIO DE ABRIL DE 1999

Sistemas meteorológicos em baixos níveis podem ser influenciados pela dinâmica de interação entre a estratosfera e troposfera (Hoskins *et al.*, 1985; Appenzeller e Davies, 1992; Holton *et al.*, 1995; Davies e Rossa, 1998; Delden e Neggers, 2003; Stohl *et al.*, 2003). Em 17 de abril de 1999 às 0600 UTC uma ciclogênese secundária ocorreu na costa sul do Brasil impondo fortes ventos próximos a superfície e ondas intensas na superfície do mar que se propagaram para as costas do sul e sudeste do Brasil (da Rocha *et al.* 2004). Normalmente, após a passagem de uma frente fria ocorre aumento da pressão. Entretanto, em algumas situações é possível o desenvolvimento de um novo ciclone em superfície, com conseqüente abaixamento de pressão, embebido na mesma forçante de níveis médios e altos. Em abril de 1999, um ciclone secundário iniciou-se 30 horas após e na mesma região de desenvolvimento do ciclone primário (associado à frente fria principal). Depois de formado, este ciclone secundário contribuiu para diminuir a velocidade de deslocamento para leste (para o Oceano Atlântico) do anticiclone polar na retaguarda, induzindo incursão generalizada de ar frio para o norte da América do Sul (Satyamurty *et al.*, 2002).

As análises sinótica e dinâmica deste ciclone secundário utilizaram a reanálise R2 e imagens de satélite no canal infravermelho (IV) do GOES-8 obtidas do DSA-CPTEC-INPE.

Às 0000 UTC de 17 de abril de 1999, o ciclone primário L1 (que se formou no dia 16/04) está no Oceano Atlântico (38°S-40°W), com seu setor oeste estendendo-se ciclonicamente para a costa do sul do Brasil e Uruguai e aumentando o gradiente horizontal de pressão em superfície abaixo da anomalia de VP (vorticidade potencial) em 300 hPa (Figura A1.10a). Neste horário, nota-se intensa atividade convectiva sobre a parte central do continente, no setor quente da frente fria associada ao L1 (Figura A1.10b). Já a nebulosidade sobre o Uruguai mostra um padrão de vírgula invertida, com o centro livre de nuvens, indicativo de intrusão de ar seco estratosférico (Semple, 2003; Browning, 1997).

No dia 17 às 1200 UTC a aproximadamente 2200 km a noroeste de L1 (centrado em aproximadamente 38°S-40°W) ocorre o desenvolvimento de um novo centro de baixa pressão indicado por L2 (Figura A1.10c). O ciclone L2, cujo desenvolvimento está ocorrendo na massa de ar frio, situa-se abaixo da anomalia de VP em 300 hPa e no lado polar do eixo do jato, podendo ser denominado de ciclone secundário. Na imagem de satélite a nebulosidade associada à L2 apresenta forma de vírgula invertida (Figura A1.10d).

Após 12 horas de seu início, às 1800 UTC do dia 17, o ciclone L2 mantém-se próximo à costa do sul do Brasil e continua abaixo do núcleo de anomalia de VP em 300 hPa. O sistema L1, associado com a frente fria orientada na direção noroeste-sudeste, enfraquece e move-se para sudeste. O centro de alta pressão, na retaguarda de L2, já cruzou a Cordilheira dos Andes e atinge neste horário a Bolívia, Paraguai e centro-oeste do Brasil, favorecendo a incursão de ar frio para latitudes subtropical e tropical da América do Sul. Segundo Satyamurty *et al.* (2002), este anticiclone provocou quedas de temperatura de até 16° C em 24 horas em algumas regiões e ocasionou geadas na manhã do dia 17 de abril no sul do Brasil.

O ciclone L1 deslocou-se para leste-sudeste, com velocidade média de 11,5 m s⁻¹ e dois dias de duração, valores estes próximos aos climatológicos (Reboita *et al.*, 2010), enquanto o L2 manteve-se praticamente estacionário (próximo à 35°S-42,5°W) e com duração de cinco dias. Adicionalmente, embora apresentasse fraco aprofundamento, o ciclone L2 (menor pressão central de 994 hPa) produziu ventos fortes sobre o ASO, gerando ondas no mar que atingiram as costas do sul e sudeste do Brasil (da Rocha *et al.*, 2004). Os ventos máximos mais intensos foram registrados no início de L2, e se mantiveram acima de 20 m s⁻¹ entre 0600 UTC do dia 17 e 1200 UTC do dia 18 de abril, enfraquecendo a seguir.

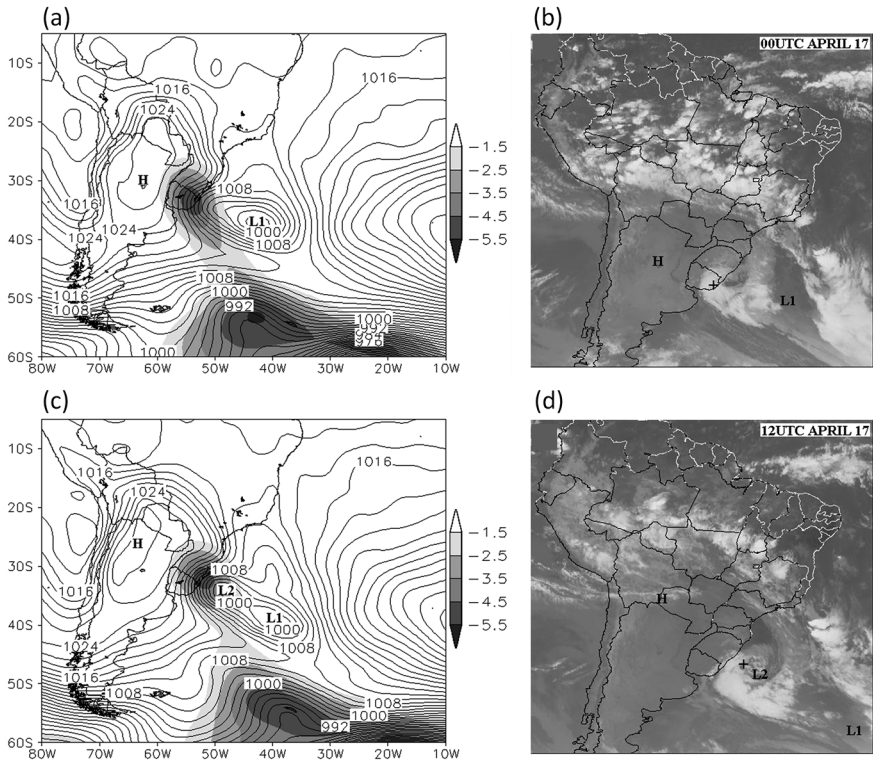


Figura A1.10: Pannel esquerdo: anomalia de VP em 300 hPa (UVP, mostrando somente valores negativos que estão sombreados) e pressão ao nível médio do mar (linhas contínuas a cada 2 hPa) válidas para: (a) 0000 UTC de 17 e (c) 0600 UTC de abril de 1999. L1 e L2 indicam o centro de baixa pressão respectivamente das ciclogêneses primárias e secundárias e H indica o centro de alta pressão. Pannel direito: imagem no infravermelho do GOES-8 para (a) 0000 UTC de 17 e (b) 1200 UTC de 17 (Fonte: Iwabe e da Rocha, 2009).

De acordo com as equações do sistema quase-geostrófico (Sutcliffe, 1947; Sutcliffe e Forsdyke, 1950; Petterssen, 1956), a advecção de vorticidade ciclônica em 500 hPa e advecção quente na baixa troposfera são importantes mecanismos para formação e intensificação de ciclones extratropicais. No entanto, às 0600 UTC de 17 de abril, associado ao ciclone L2 incipiente, o movimento é ascendente em 925 hPa exatamente abaixo do eixo do cavado de 500 hPa (Figura A1.11a), ou seja, não a leste do eixo do cavado como esperado da teoria quase-geostrófica. Em 1000 hPa, nota-se que L2 se desenvolve (0000 UTC de 17 de abril) em região onde predomina advecção fria (ver Iwabe e da Rocha, 2009), enquanto L1 se formou (0600 UTC de 16 de abril) sob advecção quente e fria nos seus setores leste e oeste, respectivamente. Adicionalmente, a máxima advecção de vorticidade ciclônica em 500 hPa situa-se ao norte de L2 (Figura A1.11a), não favorecendo divergência de massa na média troposfera sobre

L2. De acordo com Carlson (1991) estes fatores indicam que a ascensão do ar não seria forçada por advecções de vorticidade e temperatura, mas por outros mecanismos físicos. Então, a teoria clássica quase-geostrofica para o desenvolvimento de ciclones extratropicais não explicaria o início do ciclone secundário L2. No entanto, a secção vertical em 55°W mostra intrusão de ar seco, com umidade relativa abaixo de 10%, desde a parte inferior da troposfera até a baixa troposfera na mesma região de anomalia negativa de VP (Figura A1.11b). Esta anomalia pode induzir vorticidade ciclônica na atmosfera superior.

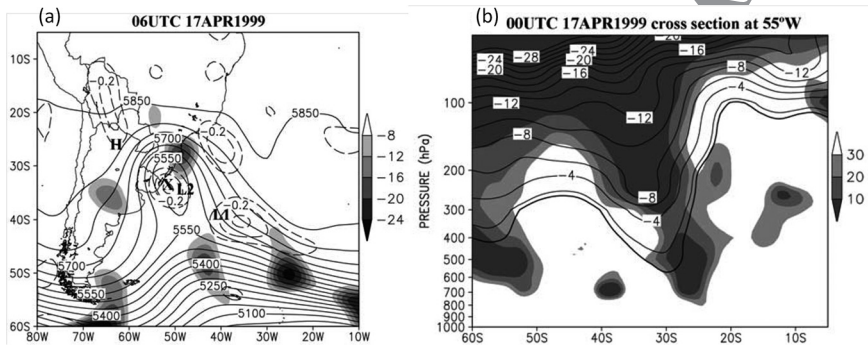


Figura A1.11: (a) 06 UTC de 17 de abril de 1999: altura geopotencial (linha contínua), advecção de vorticidade absoluta ciclônica ($\times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$, tons de cinza) em 500 hPa e movimento vertical ascendente (Pa s^{-1} linhas tracejadas) em 925 hPa; (b) 00 UTC de 17 de abril de 1999: seção vertical meridional através da longitude de 55°W de umidade relativa (%), em tons de cinza e VP (linha contínua a cada 2 UVP). L1, L2, e H são como na Figura A1.10 (Fonte: Iwabe e da Rocha, 2009).

Na presença de anomalia de VP em altos níveis, ciclogênese em superfície tornam-se possíveis na baixa troposfera. Quando a anomalia de VP ciclônica em altos níveis se aproxima de região baroclínica na baixa troposfera, a circulação ciclônica induz advecção quente, que por sua vez, induz anomalias de temperatura, um pouco à frente da anomalia de VP em altos níveis (Hoskins *et al.*, 1985). Esta anomalia quente induz circulação ciclônica em superfície que somada à circulação de altos níveis contribui para as ciclogêneses em superfície. Com o tempo, as anomalias de altos e de baixos níveis tenderão a entrar em fase promovendo intensificação mútua. A anomalia de superfície tenderá a intensificar a circulação ciclônica de altos níveis e proporcionará maior advecção de VP ciclônica atrás da anomalia de VP de altos níveis. Esta interação afeta o movimento do ciclone diminuindo o seu deslocamento para leste. Entretanto, durante a formação de L2 predominava advecção fria na baixa troposfera (Figura A1.12b), sugerindo então a atuação de outro mecanismo para aquecer a baixa troposfera.

Os perfis verticais dos termos da equação da termodinâmica em 32,5°S-47,5°W são mostrados na Figura A1.12a. Durante a formação de L2 (0600 UTC de 17 de abril), nota-se intensa advecção fria em baixos níveis da atmosfera, sobreposta por advecção de ar quente acima (Figura A1.12a). Por outro lado, o termo diabático atuava aquecendo a coluna vertical com máximo em 600 hPa, resultante da formação de nuvens (Figura A1.10b). Como discutido em Bonatti e Rao (1987) a modificação da instabilidade baroclínica através do aquecimento por condensação pode explicar alguns fatores observados em sistemas ciclônicos no sul do Brasil. Por exemplo, o aquecimento diabático intenso reduz a escala horizontal do distúrbio e aumenta a taxa de crescimento quando o aquecimento máximo desce de 500 para 750 hPa (Bonatti e Rao, 1987). Além disto, entre a superfície e 925 hPa nota-se, na figura A1.12, aumento do termo diabático, sugerindo aquecimento da baixa troposfera através de SLHF em superfície que foram intensos durante a formação de L2.

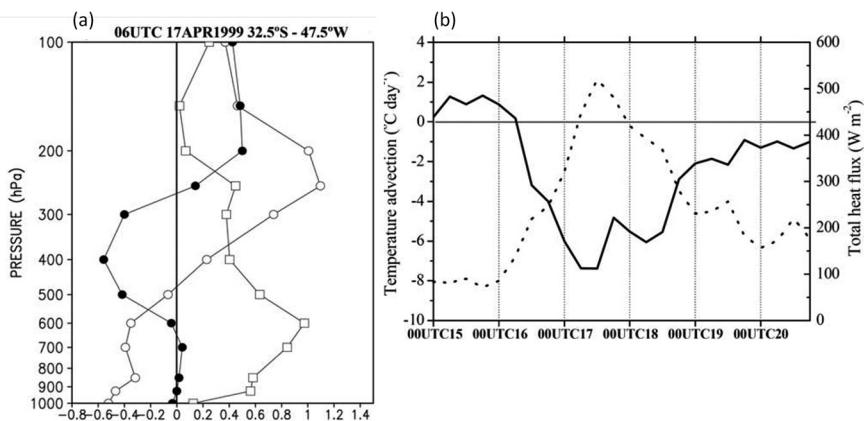


Figura A1.12: (a) Perfil vertical de tendência local de temperatura (círculos sólidos), advecção horizontal de temperatura (círculos abertos) e termo adiabático (quadrados abertos, em K/h) calculados para o ponto 32,5°S-47,5°W e válido para 0600 UTC de 17 de abril de 1999; (b) evolução no tempo da advecção horizontal de temperatura em 1000 hPa (linha contínua, em °C dia⁻¹) e fluxo de calor total em superfície (linha pontilhada, em W m⁻²) médio na área (52,5°W-37,5°W e 40°S-25°S) (Fonte: Iwabe e da Rocha, 2009).

Seguindo Neiman e Shapiro (1993), a tendência Lagrangeana de temperatura potencial equivalente próximo à costa sul do Brasil foi calculada usando valores da R2 para 0600 e 1200 UTC do dia 17, mas a espessura da camada de inversão próximo à superfície ($D_p = 450$ hPa) foi estimada da sondagem de 0000 UTC do dia 17 em Porto Alegre. Estes cálculos indicam tendência Lagrangeana de temperatura potencial equivalente de aproximadamente $+28$ K dia⁻¹ (entre 0600 e 1200 UTC do dia 17), contrapondo-se à de resfriamento devido à advecção térmica de $+20$ K dia⁻¹ e $19,8$ K dia⁻¹,

respectivamente às 0600 UTC e 1200 UTC. A tendência Lagrangeana de temperatura potencial (considerando apenas os fluxos de calor sensível) chega a $7,5 \text{ K dia}^{-1}$ às 0600 UTC e $6,3 \text{ K dia}^{-1}$ às 1200 UTC, indicando a relevância de incluir a contribuição dos fluxos de calor latente para aquecer o ar. Os fluxos de SH próximos à superfície contribuem para o máximo do termo diabático em baixos níveis com consequente redução da estabilidade estática (Figura A1.12b). Nota-se ainda atuação bastante distinta da advecção de temperatura e SLHF na formação dos ciclones L1 e L2. Os fluxos de calor total foram mais intensos e se opuseram à intensa advecção de ar frio durante a formação do ciclone secundário L2 (0600–1200 UTC do dia 17), enquanto durante o desenvolvimento de L1 (0000 UTC do dia 16) estes fluxos foram fracos e existia advecção quente (Figura A1.12b).

O aquecimento e umedecimento da baixa troposfera, através dos fluxos turbulentos de calor e umidade, foram importantes para intensificar a zona baroclínica paralela à costa sul do Brasil (entre 25°S – 35°S e 45°W – 50°W), exatamente abaixo da anomalia de VP em 300 hPa, favorecendo o desenvolvimento de L2, mesmo sob forte advecção fria na baixa troposfera.

A evolução sinótica descrita indica várias similaridades entre o ambiente que favorece a formação do ciclone secundário L2 e os ciclones do tipo 3 descritos por Holland *et al.* (1987). Ambos formam-se na retaguarda de uma frente fria de um ciclone primário (L1) e justamente abaixo do eixo do cavado em 500 hPa, além de estarem associados com distúrbios na tropopausa e considerável baroclinia em superfície. Apesar das similaridades, destacam-se algumas diferenças importantes. Por exemplo, o ciclone tipo 3 ocorreu em ambiente com um bloqueio do tipo dipolo, referido localmente com *easterly dip*, e apresentou escala horizontal muito menor (100 km) e menor tempo de vida (24 horas) do que L2.

COMENTÁRIOS FINAIS

A presente revisão teve como objetivo contribuir para aprofundar o conhecimento sobre os ciclones que se desenvolvem no Oceano Atlântico Sul, principalmente no seu setor sudoeste (ASO) próximo à costa leste da América do Sul. Desta forma foram descritas análises que utilizaram simulações numéricas (climáticas e de tempo) e estudos de casos. As simulações climáticas realizadas com o RegCM3 foram utilizadas para construir a climatologia de ciclogêneses no ASO. Para o período 1990–1999, os resultados mais importantes são: (a) o número médio anual de todos os ciclones simulados pelo RegCM3 é muito próximo ao da análise, (b) análise e RegCM3 indicam a existência de três regiões ciclogênicas principais denominadas RG1 (costa sul-sudeste do Brasil), RG2 (costa do extremo sul do Brasil e Uruguai) e RG3 (costa sudeste da Argentina), (c) o RegCM3

apresenta maior subestimativa de ciclones inicialmente mais intensos. Metodologia similar foi utilizada para avaliar impactos de mudanças climáticas nas ciclogêneses no ASO. Embora não tenha sido discutido na presente revisão, os resultados obtidos quando o RegCM3 foi aninhado às projeções climáticas do modelo global HadAM3 (*Hadley Centre Atmospheric Model version 3*) indicam redução da atividade ciclogênética no ASO, com maior redução para os ciclones inicialmente mais intensos (Krüger *et al.*, 2012). Simulações numéricas climáticas e de eventos ciclônicos indicam que a troca de calor e umidade ar-mar impactam substancialmente o tempo de vida e trajetória de ciclones sobre o ASO. Estudo observacional indicou que esta fonte diabática de calor mostrou-se fundamental para o desenvolvimento de um ciclone secundário no sul do Brasil, contribuindo para aumentar a baroclinia em baixos níveis (intensificando o setor quente do ciclone) abaixo de uma perturbação de vortacidade potencial em altos níveis.

O presente trabalho descreve de forma resumida estudos desenvolvidos dentro do Grupo de Estudos Climáticos (GREC) do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (DCA/IAG/USP) cuja pesquisa está vinculada ao INCLINE (Núcleo de Apoio à Pesquisa em Mudanças Climáticas). Um estudo mais amplo dos ciclones sobre o ASO pode ser encontrado em da Rocha (2012).

REFERÊNCIAS

- APPENZELLER, C.; Davies, H. C. Structure of stratospheric intrusions into the troposphere. *Nature*, v. 358, p. 570-572, 1992.
- ATLAS, R. The role of oceanic fluxes and initial data in the numerical prediction of an intensive coastal storm. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, v. 10, p. 359-388, 1987.
- BJERKNES, J. On the Structure of Moving Cyclones. *Geof. Publ.*, v. 1, n. 2, p. 1-8, 1919.
- BJERKNES, J.; SOLBERG, H. Life Cycle of Cyclones and the Polar Front Theory of Atmospheric Circulation. *Geof. Publ.*, v. 3, n. 1, p. 3-18, 1922.
- BONATTI, J. P. Modelo de circulação geral do CPTEC. [online]. *Climanálise Especial 10 anos*, 26, 5p, outubro 1996.
- BONATTI, J. P.; RAO, V. B. Moist Baroclinic Instability in the Development of North Pacific and South American Intermediate-Scale Disturbances. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 44, p. 2657-2667, 1987.

BONATTI, J. P.; RAO, V. B.; DA SILVA DIAS, P. L. Estudo observacional da propagação para leste do fenômeno Catarina e sua simulação com modelo global de alta resolução. In: *XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza, Brasil. 29 de agosto a 03 de setembro. Anais. CD-ROM, 16 p, 2004.

BOSART, L. F.; LIN, S. C. A diagnostic analysis of the Presidents' day storm of February 1979. *Monthly Weather Review*, v. 112, n. 11, 2148-2177, 1984.

BRANSCOMBE, L. E.; GUTOWSKI, W. J.; Stewart, D. E. Effect of surface fluxes on the nonlinear development of baroclinic waves. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 46, p. 460-475, 1989.

BROWNING, K. A. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development. *Meteorological Applications*, v. 4, p. 317-324, 1997.

CAMPOS, C. N. Estudo da frontogênese em um ciclone do tipo Shapiro-Keyser. *Dissertação de Mestrado*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, SP, Brasil, 1999.

CARLSON, T. Mid-Latitude Weather Systems. *Harper Collins*, New York, 512 pp, 1991.

CHANG, S. W.; HOLT, T. R.; SASHEGYI, K. D. A Numerical Study of the ERICA IOP 4 Marine Cyclone. *Monthly Weather Review*, v. 124, p. 27-46, 1996.

CHARNEY, J. G. The Dynamics of Long Waves in a Baroclinic Westerly Currents. *Journal of Meteorology*, (5), p. 135-162, 1947.

CHEN, T. C.; CHANG, C. B.; PERKEY, D. J. Numerical Study of an AMTEX'75 Oceanic Cyclone. *Monthly Weather Review*, v. 111, p. 1818-1829, 1983.

da ROCHA, R. P. Impacto de Parametrização de Convecção em Ciclogênese sobre o Oceano. *Tese de Doutorado*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP, 201p, 1999.

da ROCHA, R. P. Ciclones sobre o Oceano Atlântico Sul: Aspectos observacionais, numéricos e projeções climáticas. *Tese de Livre-docência*, Depto. de Ciências Atmosféricas, IAG-USP, 184pp, 2012.

da ROCHA R. P.; SUGAHARA S.; da SILVEIRA, R. B. Sea waves generated by extratropical cyclones in the South Atlantic Ocean: Hindcast and validation against altimeter data. *Weather and Forecasting*, 19, 398-410, 2004

da ROCHA, R. P.; CAETANO NETO, E. S. The role of convective parameterization in the simulation of a cyclone over the South Atlantic. *Atmósfera (México)*, v. 23, p. 1-23, 2010.

- DAVIES, H. C.; ROSSA, A. M. PV Frontogenesis and upper-tropospheric fronts. *Monthly Weather Review*, v. 126, p. 1528-1539, 1998.
- DEE, D. P.; e co-autores. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, v. 137, p. 553-597, doi: 10.1002/qj.828, 2011.
- DELLEN, A.; NEGGERS, R. A case study of tropopause cyclogenesis. *Meteorological Applications*, v. 10, p. 187-199, 2003.
- EADY, E. T. Long Waves and Cyclones Waves. *Tellus*, v. 1, n. 3, p. 35-52, 1949.
- GAN, M. A.; RAO, B. V. The Influence of the Andes Cordillera on Transient Disturbances. *Monthly Weather Review*, v. 122, p. 1141-1157, 1994.
- GELEYN, J.-F. On a Simple, Parameter-Free Partition between Moistening and Precipitation in the Kuo Scheme. *Monthly Weather Review*, v. 113, p. 405-407, 1985.
- GOZZO, L. F. Simulação numérica da influência dos fluxos de superfície em ciclones na costa leste do sul do Brasil. *Dissertação* (Mestrado em Meteorologia), Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- GOZZO, L. F.; da ROCHA, R. P. Air-Sea Interaction Processes Influencing the Development of a Shapiro-Keyser Type Cyclone over the Subtropical South Atlantic Ocean. *Pure and Applied Geophysics* (Printed ed.), v. 170, p. 917-934, 2013.
- GUTOWSKI, W. J.; JIANG, W. Surface-Flux Regulation of the Coupling between Cumulus Convection and Baroclinic Waves. *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 55, p. 940-953, 1998.
- GYAKUM, J. R.; e co-autores. A Regional Model Intercomparison Using a Case of Explosive Oceanic Cyclogenesis. *Wea. Forecasting*, v. 11, p. 521-543, 1996.
- HOLLAND, G. J.; LYNCH, A. H.; LESLIE, L. M. Australian east-coast cyclones. Part I: Synoptic overview and case study. *Monthly Weather Review*, v. 115, p. 3024-3036, 1987.
- HOLT, T. R.; CHANG, S. W. A numerical investigation of the effects of timing of diabatic processes in the coastal cyclogenesis of GALE IOP 2. *Monthly Weather Review*, v. 121, p. 1007-1029, 1993.
- HOLTON, J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology. *Elsevier Academic Press*, New York, 4th Edition, 535 pp, 2004.

HOLTON, J. R.; HAYNES, P. H.; MCINTYRE, M. E.; DOUGLASS, A. R.; ROOD, R. B.; PFISTER, L. Stratosphere-troposphere exchange. *Reviews of Geophysics*, v. 33, p. 403-439, 1995.

HOSKINS, B. J.; MCINTYRE, M. E.; ROBERTSON, W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 111, p. 877-946, 1985.

IWABE, C. M. N.; da ROCHA, R. P. An event of stratospheric air intrusion and its associated secondary surface cyclogenesis over the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, v. 114, p. 1-15, 2009.

KAIN, J. S.; FRITSCH, J. M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 47, p. 2784-2802, 1990.

KANAMITSU, M.; e co-autores. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, p. 1631-1643, 2002.

KRÜGER, T. F.; da ROCHA R. P.; REBOITA M. S.; AMBRIZZI T. RegCM3 nested in HadAM3 scenarios A2 and B2: projected changes in extratropical cyclogenesis, temperature and precipitation over the South Atlantic Ocean. *Climatic Change*, 113 (3-4), 599-621, 2012.

KUO, H.-L. Dynamic Instability Of Two-dimensional Nondivergent Flow In A Barotropic Atmosphere. *J. Meteor.*, v. 6, p. 105-122, 1949.

KUO, Y.-H.; LOW-NAM, S. Prediction of Nine Explosive Cyclones over the Western Atlantic Ocean with a Regional Model. *Monthly Weather Review*, v. 118, p. 3-25, 1990.

KUO, Y.-H.; LOW-NAM, S.; REED, R. J. Effects of Surface Energy Fluxes during the Early Development and Rapid Intensification Stages of Seven Explosive Cyclones in the Western Atlantic. *Monthly Weather Review*, v. 119, p. 457-476, 1991.

KUWANO-YOSHIDA, A.; ASUMA, Y. Numerical Study of Explosively Developing Extratropical Cyclones in the Northwestern Pacific Region. *Monthly Weather Review*, v. 136, p. 712-740, 2008.

LAGOUVARDOS, K.; KOTRONI, V.; DEFER, E. The 21-22 January 2004 explosive cyclogenesis over the Aegean Sea: Observations and model analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 133, p. 1519-1531, 2007.

MCINNIS, K. L.; MCBRIDE, J. L.; LESLIE, L. M. Cold Fronts over Southeastern Australia: Their Representation in an Operational Numerical Weather Prediction Model. *Wea. Forecasting*, v. 9, p. 384-409, 1994.

- NEIMAN, P. J.; SHAPIRO, M. A. The Life Cycle of an Extratropical Marine Cyclone. Part I: Frontal- Cyclone Evolution and Thermodynamic Air-Sea Interaction. *Monthly Weather Review*, v. 121, p. 2153-2176, 1993.
- NIELSEN, N.W.; SASS, B. H. A numerical, high-resolution study of the life cycle of the severe storm over Denmark on 3 December 1999. *Tellus*, 55A, p. 338-351, 2003.
- NUSS, W. A., ANTHES, R. A. A Numerical Investigation of Low-Level Processes in Rapid Cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, v. 115, p. 2728-2743, 1987.
- ODA, T. O. Efeitos da Distribuição Espaço-Temporal da Temperatura do Mar no Desenvolvimento de Ciclones Extratropicais. 125 f. *Tese* (Doutorado em Meteorologia). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- PAL, J. S.; Giorgi, F.; Bi, X.; Elguindi, N.; Solomon, F.; Rauscher, S. A.; Gao, X.; Francisco, R.; Zakey, A.; Winter, J.; Ashfaq, M.; Syed, F. S.; Sloan, L. C.; Bell, J. L.; Diffenbaugh, N. S.; Karmacharya, J.; Konaré, A.; Martinez, D.; da Rocha, R. P.; Steiner, A. L. Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and Reg CNET. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 88, 1395-1409, 2007.
- PEIXOTO, J. P.; OORT, A. H. Physics of Climate. *American Institute of Physics*, 520 pp, 1992.
- PETTERSEN, S. *Weather analysis and forecasting*. Vol. I: Motion and motion systems, New York, McGraw Hill Book Co. Inc. 428p, 1956.
- PIVA, E. D; MOSCATI, M. C. L.; GAN, M. A. Papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície associado a um caso de ciclogênese na costa leste a América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 4, p. 450-476, 2008.
- PIVA, E. D.; GAN, M. A.; MOSCATI, M. C. L. The Role of Latent and Sensible Heat Fluxes in an Explosive Cyclogenesis over the South American East Coast. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 89, p. 637-663, 2011.
- REBOITA, M. S. Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade. *Tese* (Doutorado em Meteorologia). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- REBOITA, M. S.; da ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T.; SUGAHARA, S. South Atlantic Ocean Cyclogenesis Climatology Simulated by Regional Climate Model (RegCM3). *Climate Dynamics*, v. 1, p. 1-17, 2010.

REBOITA, M. S.; da ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Dynamic and Climatological Features of Cyclonic Developments over the Southwestern South Atlantic Ocean. In: B. Veress; J. Szigethy. (Org.). *Horizons in Earth Science Research*, v. 6, p. 135-160, 2012.

REED, R. J.; SIMMONS, A. J. Numerical Simulation of an Explosively Deepening Cyclone over the North Atlantic that was Unaffected by Concurrent Surface Energy Fluxes. *Wea. Forecasting*, v. 6, p. 117-122, 1991.

SATYAMURTY, P.; FONSECA, J. F. B.; BOTTINO, M. J.; SELUCHI, M. E.; LOURENÇO, M. C. M.; GONÇALVES, L. G. G. An early freeze in southern Brazil in April 1999 and its NWP guidance. *Met. Apps.*, v. 9, p. 113-128, 2002.

SELUCHI, M. E.; SAULO, A. C. Possible mechanisms yielding an explosive coastal cyclogenesis over South America: experiments using a limited area model. *Australian Meteorological Magazine*, v. 47, p. 309-320, 1998.

SEMPLE, A. T. A review and unification of conceptual models of cyclogenesis. *Meteorological Applications*, v. 10, p. 39-59, 2003.

SHAPIRO, M. A.; KEYSER, D. Fronts, jet streams and the tropopause. Extratropical Cyclones, *The Erik Palmén Memorial Volume*, C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., Amer. Meteor. Soc., p. 167-191, 1990.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; WANG, W.; POWERS, J. G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Technical Note TN-468+STR*. 113 pp, 2008.

SIMMONDS, I.; KEAY, K. Mean Southern Extratropical Cyclone Behavior in the 40-Year NCEPNCAR Reanalysis. *Journal of Climate*, v. 13, p. 873-885, 2000.

STOHL, A.; e co-autores. Stratosphere-troposphere exchange: A review, and what we have learned from STACCATO. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n. D12, 8516, 2003.

SUTCLIFFE, R. C. A contribution to the problem of development. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. v. 73, p. 370-383, 1947.

SUTCLIFFE, R. C.; FORSDYKE, A. G. The theory and use of upper air thickness patterns in forecasting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 76, p. 189-217, 1950.

UCCELLINI, L. W.; PETERSEN, R. A.; KOCIN, P. J.; BRILL, K. F.; TUCCILLO, J. J. Synergistic Interactions between an Upper-Level Jet Streak and Diabatic Processes that Influence the Development of a Low-Level Jet and a Secondary Coastal Cyclone. *Monthly Weather Review*, v. 115, p. 2227-2261, 1987.

A2. A AMAZÔNIA EM PROCESSO DE MUDANÇAS AMBIENTAIS

PAULO EDUARDO ARTAXO NETTO¹, HENRIQUE DE MELO JORGE BARBOSA¹, JOEL FERREIRA DE BRITO¹, ELISA TOMÉ SENA¹, LUCIANA VARANDA RIZZO², GLAUBER GUIMARÃES CIRINO³, ANA MARIA YANEZ SERRANO³

INTRODUÇÃO

A Amazônia é uma região muito especial não somente do ponto de vista de sua biodiversidade e extensão tropical, mas também pelos fortes mecanismos de interação com a atmosfera e o clima regional e global (Artaxo *et al.*, 2013). A biologia da floresta controla uma série de processos críticos para a precipitação regional, bem como o controle da concentração de gases e partículas na atmosfera. A interação entre a floresta e a atmosfera é mediada por uma série de processos associados ao funcionamento biológico da floresta, como a respiração e fotossíntese (caso do CO₂), sinalização e resposta a *stress* ambiental (casos dos compostos orgânicos voláteis - COV) e na emissão de partículas de aerossóis biogênicas (Davidson e Artaxo, 2004, Artaxo e Hansson, 1995). As emissões de partículas biogênicas pela floresta que controlam a população de “Cloud Condensation Nuclei” (CCN) na atmosfera são um ingrediente essencial no ciclo hidrológico da região amazônica (Pöschl *et al.*, 2010). A Figura A2.1 ilustra as complexas interações entre a floresta e a atmosfera, onde a floresta controla emissões de acordo com uma série de processos associados ao seu metabolismo. É impossível a separação entre a biologia, química e física dos processos associados. A transpiração da floresta domina o fluxo de vapor de água na atmosfera amazônica e a reciclagem de água ao longo do ecossistema (Andreae *et al.*, 2002). Mas a vegetação faz outro papel fundamental,

1. Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IF/USP), Rua do Matão, Travessa R, 187, CEP 05508-090, São Paulo, Brasil.

2. Departamento de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de São Paulo, UNIFESP - Campus Diadema, Rua Prof. Artur Riedel, 275, CEP 09972-270, Diadema - São Paulo, Brasil.

3. INPA – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Av. André Araújo, 2.936 - CEP 69067-375, Manaus, Brasil.

lançando na atmosfera COVs que se transformam em partículas de aerossóis que evoluem para CCN e afetam propriedades de nuvens. Estas partículas atuam como CCN, nucleando gotas de nuvens e afetando a precipitação e o balanço radiativo atmosférico através da mudança na refletividade de nuvens (Martin *et al.*, 2010, Artaxo *et al.*, 1988). Estas fortes associações entre a floresta e a atmosfera fazem do ecossistema amazônico um ambiente único em nosso planeta. Uma abordagem científica integrada é fundamental no estudo do efeito dos ecossistemas no clima regional e global e vice versa (Artaxo, 2012). Trabalhos recentes (Poehlker *et al.*, 2012) mostram que mesmo partículas tão pequenas quanto 20 a 30 nanômetros possuem traços de sais emitidos pela vegetação como o potássio em sua constituição, mostrando que mesmo partículas nanométricas tem origem em emissões da vegetação. Estas partículas biogênicas também atuam como núcleos de condensação de gelo, do inglês “Ice Nuclei” (IN), que são responsáveis pela formação de nuvens convectivas que atingem até 15-19 km de altura na Amazônia e são responsáveis pela maior parte da taxa de precipitação na região (Prenni *et al.*, 2009).

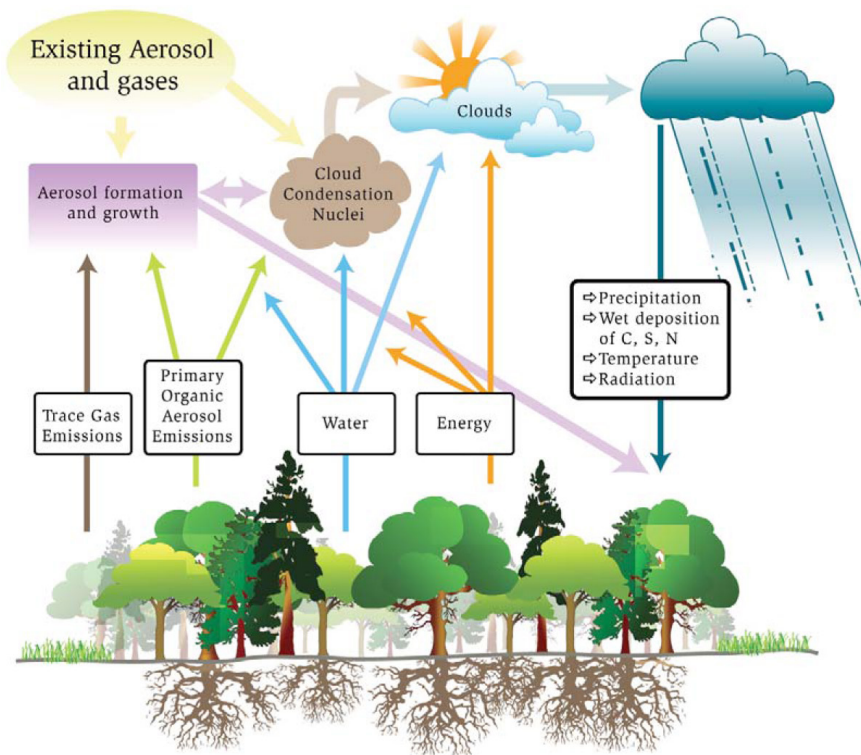


Figura A2.1: Esquema dos principais mecanismos de interação entre a biosfera e atmosfera da Amazônia, onde o funcionamento biológico da floresta determina uma série de propriedades de aerossóis, gases traços e nuvens na atmosfera amazônica.

A Amazônia é criticamente importante no ciclo do carbono global, pois contém cerca de 95 a 120 PgC na biomassa viva, e cerca de 160 PgC adicionais no solo (Malhi *et al.*, 2006, Gloor *et al.*, 2012), que se forem mobilizados à atmosfera podem intensificar rapidamente o efeito estufa, responsável pelo atual aumento de temperatura global. Estudos recentes mostram um potencial de forte modulação na absorção ou emissão de carbono pelo ecossistema amazônico devido a forçantes climáticas e às alterações no balanço de radiação (Phillips *et al.*, 2009, Cirino *et al.*, 2013, Quesada *et al.*, 2012, Booth *et al.*, 2012). Os efeitos das mudanças climáticas na Amazônia indicam que o ciclo hidrológico poderia ser alterado, com menor taxa de precipitação, especialmente na região leste da Amazônia, afetando fortemente os estoques de carbono (Marengo *et al.*, 2008, 2011, Malhi *et al.*, 2009). Duas fortes secas em 2005 e 2010 foram associadas com fortes perdas de carbono pelo ecossistema, aumentando a preocupação em relação à estabilidade e vulnerabilidade do ecossistema amazônico às mudanças climáticas globais em curso.

A região amazônica está sofrendo uma série de transformações associadas ao processo caótico de mudança de uso do solo ao longo das últimas décadas (Soares-Filho *et al.*, 2006, Gloor *et al.*, 2013). O trabalho de Davidson *et al.*, 2012 analisa os diferentes aspectos da transição que o ecossistema amazônico está sofrendo, observando que a expansão da agricultura e a variabilidade climática tornaram-se importantes agentes de alterações do ecossistema amazônico. É possível observar sinais que indicam uma transição para um regime dominado por alterações ambientais, em particular no ciclo hidrológico e no balanço de energia nas porções sul e este da bacia. As interações entre a mudança de uso de solo, incêndios florestais, hidrologia, mudanças climáticas e dimensões humanas na Amazônia formam um quadro complexo com potenciais efeitos fortes no desequilíbrio do ecossistema. A Figura A2.2 ilustra as interações entre mudanças globais, uso do solo, queimadas, hidrologia, ecologia e dimensões humanas na Amazônia. Nesta figura, os forçantes são indicados por ovais vermelhas, que afetam os processos, (mostrados em quadros verdes) e as consequências são mostradas nos quadros azuis. Setas indicam os relacionamentos entre estes processos, que interagem fortemente entre si e com o clima da região. Por exemplo, secas fortes como as de 1997, 2005 e 2010 afetam além dos processos fotossintéticos, também a emissão de COVs, aerossóis e vapor d'água, o que por si próprio realimenta a redução na precipitação. Cheias como as de 2009 e 2012 associadas a fenômenos La Niña também afetam as emissões de metano e de vapor de água para a atmosfera regional e global, novamente realimentando o funcionamento do ecossistema (Marengo *et al.*, 2008).

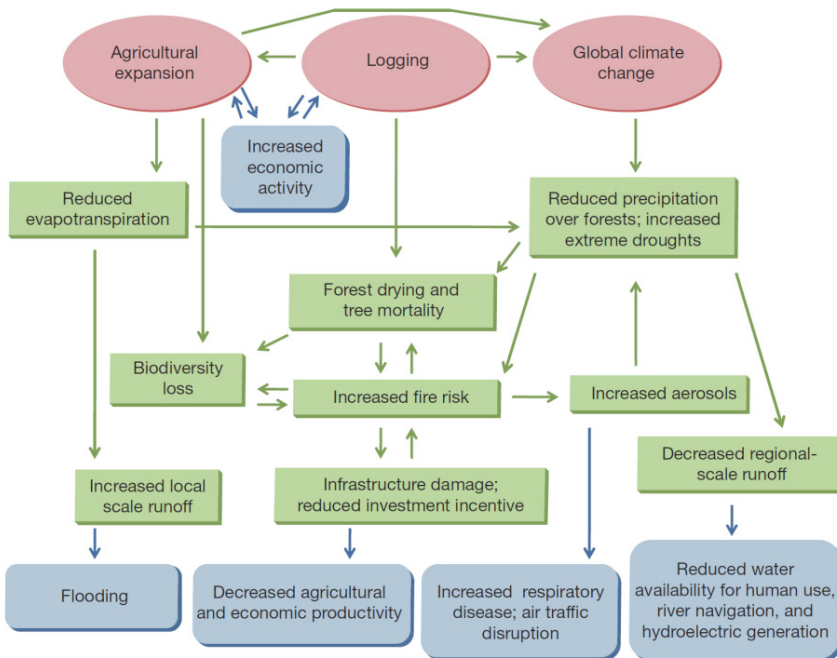


Figura A2.2: Interações entre mudanças globais, uso do solo, queimadas, hidrologia, ecologia e dimensões humanas na Amazônia. Os forçantes são indicados por ovais vermelhas, que afetam os processos, (mostrados em quadros verdes) e as consequências mostradas nos quadros azuis. Setas indicam os relacionamentos entre estes processos.

Evidências recentes mostram que o ciclo hidrológico na Amazônia pode estar se intensificando nas últimas duas décadas (Gloor *et al.*, 2013). Esta intensificação do ciclo hidrológico é concentrada na estação chuvosa, com aumento de amplitude entre as cheias e vazantes. Esta intensificação do ciclo hidrológico pode estar associada a uma maior temperatura da superfície do Oceano Atlântico tropical, ou também à variabilidade decadal da circulação tropical no Atlântico. Observa-se que a vazão do Rio Amazonas em óbitos está em processo de forte aumento nos últimos 20 anos, como resultado do aumento da taxa de precipitação na bacia (Gloor *et al.*, 2013). É fundamental que tenhamos séries temporais de observações em longo prazo para uma correta atribuição das mudanças observadas no momento no ciclo hidrológico e vazão do Amazonas.

Do ponto de vista de ciclagem de carbono, os últimos trabalhos indicam que a Amazônia é neutra em termos de emissão/absorção de carbono nos últimos anos (Gloor *et al.*, 2012). A Amazônia passou de ser uma fonte de 0.3-0.4 PgC por ano na década de 80 para uma certa neutralidade atual. A absorção de carbono por florestas intactas, da ordem de -0.51 PgCa^{-1} equilibra de certo modo as emissões de carbono por desmatamento (Malhi *et al.*,

2006). Ao longo das décadas de 80-90, resultados do projeto RAINFOR mostraram que as florestas intactas da Amazônia estavam absorvendo carbono à uma taxa da ordem de 0.5 ton C/ha/ano. Durante a seca de 2009, esta absorção de carbono mudou para uma perda líquida de carbono devido ao *stress* hídrico experimentado em 2009. Observamos que a precipitação e a temperatura em aumento alteram a taxa fotossintética do ecossistema, mas ainda é difícil estabelecer uma relação entre causa e efeito no complexo ciclo de carbono amazônico.

Um dos grandes sucessos da política ambiental do Brasil foi a queda nas taxas de desmatamento da Amazônia (Artaxo, 2010). É importante salientar que as causas da redução das taxas de desmatamento ainda não são claras, e entre as hipóteses estão as alterações nos preços de *commodities*, maior fiscalização, controle ao financiamento bancário de empreendimentos na Amazônia, entre outros. A figura A2.3 mostra a série temporal do desmatamento anual, realizada pelo sistema de monitoramento de desmatamento operado pelo INPE. De uma taxa de desmatamento de 27.772 Km² em 2003-2004, tivemos uma redução para uma taxa de 4.571 Km² em 2011-2012. No último ano (2012-2013), a taxa de desmatamento sofreu um aumento para 5.843 km² por ano, o que coloca dúvidas na sustentabilidade a longo prazo das políticas públicas de controle de desmatamento na Amazônia. A contínua estratégia de desenvolvimento da Amazônia é baseada principalmente na mudança de uso de solo para criação de novas áreas agriculturáveis ou de pastagens. Esta estratégia deverá ser alterada se o Brasil reafirmar objetivo de redução das emissões de gases de efeito estufa, como a atual legislação preconiza. Houve uma forte redução das emissões de gases de efeito estufa pelo Brasil, mas esta redução deve se sustentar a longo prazo para que seja efetiva. É importante que tenhamos clareza de que, apesar de o Brasil ter tido um grande sucesso na redução do desmatamento de 2004 a 2012, vai ser cada vez mais difícil reduzir essa taxa a zero. A extensão da Amazônia e sua heterogeneidade econômica e social trazem desafios enormes. E se o país quiser seguir uma trajetória exemplar na redução de emissões de GEE não poderá abrir mão de políticas públicas integradas entre os governos municipais, estaduais e federal e também de muita fiscalização efetiva.

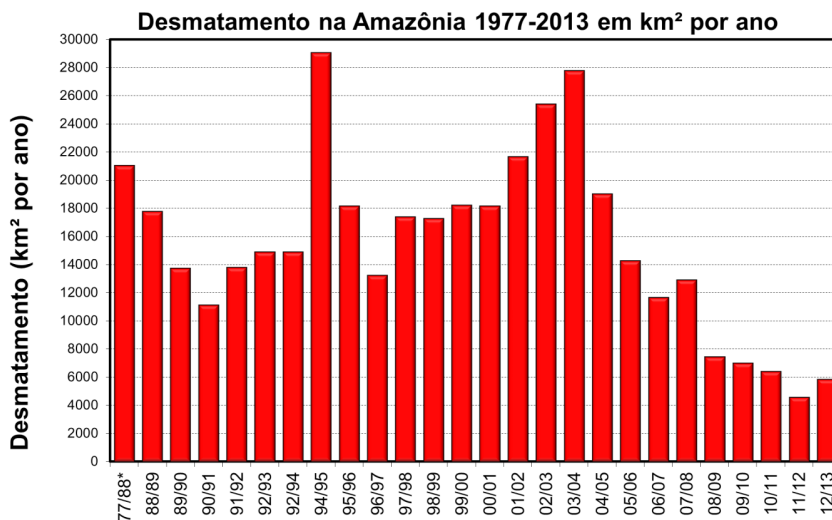


Figura A2.3: Taxas anuais de desmatamento na Amazônia de 1977 a 2013 segundo dados do sistema de monitoramento de desmatamento do INPE.

O complexo ciclo hidrológico da região amazônica ainda é muito pouco compreendido, e experimentos realizados na última década elucidaram alguns mecanismos chaves na formação de nuvens naturais e das influenciadas por partículas de queimadas na Amazônia (Artaxo *et al.*, 2009, Andreae *et al.*, 2004, Clayes *et al.*, 2004, Silva Dias *et al.*, 2002). Observou-se uma forte supressão da formação de nuvens rasas formadas a partir de aerossóis de queimadas, com possível impacto no ciclo hidrológico, em magnitude ainda a ser quantificada. A rede de radares meteorológicos do SIPAM/SIVAM está sendo utilizada para quantificar esta possível redução da precipitação pelo efeito das emissões de aerossóis em queimadas. Com o transporte a longa distância das emissões, o efeito da supressão de nuvens rasas certamente não se restringe somente à região amazônica. Está sendo investigado com técnicas de modelamento e medidas por sensoriamento remoto em alta resolução o possível impacto das emissões de queimadas no ciclo hidrológico no Sul do Brasil e na América do Sul em geral. As emissões de queimadas produzem ozônio em larga escala, e o ozônio é um gás fitotóxico. Estas emissões em queimadas de gases precursores de ozônio podem estar afetando a produtividade primária da floresta e culturas em áreas longe das regiões de queimadas (Davidson *et al.*, 2013).

O EFEITO DE PARTÍCULAS DE AEROSSÓIS NO BALANÇO RADIATIVO DA REGIÃO AMAZÔNICA

As partículas de aerossol na troposfera influenciam significativamente o clima regional e global, alterando o equilíbrio de energia radiativo, bem como o ciclo hidrológico (Forster *et al.*, 2007). As partículas de aerossóis podem espalhar e absorver radiação solar afetando diretamente o balanço radiativo terrestre (Boucher *et al.*, 2013). Este efeito depende da concentração, composição, tamanho, propriedades óticas e das distribuições horizontal e vertical dos aerossóis na atmosfera (Huffman *et al.*, 2012, Rizzo *et al.*, 2012). O balanço radiativo terrestre pode ser perturbado através de: i) alterações na quantidade de radiação solar incidente (por exemplo, mudanças na órbita terrestre; ii) alterações na fração de radiação solar que é refletida de volta para o espaço (mudanças na cobertura de nuvens, quantidade de partículas atmosféricas ou na refletividade da superfície terrestre; e iii) alterações na quantidade de radiação de onda longa emitida pela Terra de volta para o espaço (por exemplo, variações na concentração de gases de efeito estufa). O clima, por sua vez, pode ser afetado diretamente por essas mudanças, bem como indiretamente, através de diversos mecanismos de retroalimentação (do inglês, *feedbacks*) (Boucher *et al.*, 2013). Perturbações externas impostas no balanço de energia radiativa do sistema climático terrestre podem causar uma alteração no fluxo de radiação no topo da atmosfera, denominada forçante radiativa climática. De acordo com a definição adotada pelo IPCC, a forçante radiativa é definida como a diferença na irradiância líquida na tropopausa, entre um estado de referência e um estado perturbado por um agente climático externo (Boucher *et al.*, 2013, Forster *et al.*, 2007). Forçantes radiativas positivas indicam um efeito líquido de aquecimento do sistema Terra-atmosfera e forçantes negativas indicam efeitos de resfriamento.

Sena *et al.*, 2013 calcularam a forçante radiativa em toda a extensão espacial da Amazônia, levando em conta as emissões de aerossóis de queimadas, as alterações de albedo de superfície e também as alterações na coluna de vapor de água em áreas de florestas e de pastagens. Foram realizadas medidas simultâneas dos sensores CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*) e MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*), a bordo do satélite Terra, durante as estações secas de 2000 a 2009. A média diária da forçante radiativa direta no topo da atmosfera (TOA) para o período estudado foi de $-8,2 \pm 2,1 \text{ W/m}^2$ e $-5,2 \pm 2,6 \text{ W/m}^2$, dependendo da metodologia utilizada. As distribuições espaciais da forçante radiativa direta de aerossóis sobre a região amazônica mostram que, para altas concentrações de aerossóis (Aerosol Optical Depth, AOD, maior que 1), a média diária da forçante radiativa no topo da atmosfera pode alcançar

valores elevados de até -30 W/m^2 (consistindo em um resfriamento). Observamos também que a refletância da superfície (o albedo terrestre) influencia fortemente o efeito radiativo direto de aerossóis. O impacto dos aerossóis sobre diferentes tipos de superfície foi analisado, indicando que a forçante radiativa é sistematicamente mais negativa sobre áreas de floresta do que sobre áreas de cerrado. A média anual da forçante radiativa de mudança de albedo de superfície devida ao desflorestamento em Rondônia foi determinada, a partir de duas diferentes metodologias, em $-7,4 \pm 0,9 \text{ W/m}^2$ e $-8,1 \pm 1,0 \text{ W/m}^2$, respectivamente. As partículas de queimadas impactam o balanço radiativo por aproximadamente 2 a 3 meses por ano, enquanto o impacto do albedo de superfície pode ser observado ao longo de todo o ano. Esta diferença, devida à sazonalidade da estação de queimadas, indica que a média anual do impacto da mudança de albedo de superfície sobre o balanço radiativo amazônico é muito maior do que o impacto anual das partículas de aerossóis de queimadas. A influência do desmatamento na quantidade de vapor d'água atmosférico e seu impacto no balanço radiativo foi analisada a partir de medidas de vapor d'água integrado na coluna atmosférica obtidas pelos radiômetros solares da AERONET. Estas medidas mostram que a quantidade de vapor d'água integrado na coluna atmosférica é $0,35 \text{ cm}$ (cerca de 10% do total) menor sobre áreas desmatadas do que sobre áreas de florestas preservadas. Este decréscimo contribui para o aumento do impacto do desflorestamento no balanço radiativo de ondas curtas que varia entre $0,4$ e $1,2 \text{ W/m}^2$. Os altos valores de forçante radiativa determinados indicam que o desflorestamento pode ter forte implicação para a convecção, para o desenvolvimento de nuvens e para a razão entre radiação direta e difusa, afetando o balanço de carbono na Amazônia.

A figura A2.4 apresenta a distribuição espacial da forçante radiativa de aerossóis emitidos em queimadas, calculada para a estação seca de 2005 (Sena *et al.*, 2013). Valores são apresentados para o topo da atmosfera, na faixa de radiação de onda curta (SWARF), calculada para médias de 24 horas. A média da forçante radiativa de 24 horas ao longo do período de 2000 a 2009 foi de -6.5 W/m^2 em áreas de floresta e -3.3 W/m^2 em áreas de cerrado. Valores de até -30 W/m^2 foram observados localmente para a média diária da SWARF 24h. Ambos os valores são extremamente elevados e causam um resfriamento da superfície. Estes altos valores podem ser comparados com a forçante dos gases de efeito estufa que é de um aquecimento de $+2.6 \text{ w/m}^2$ (Forster *et al.*, 2007).

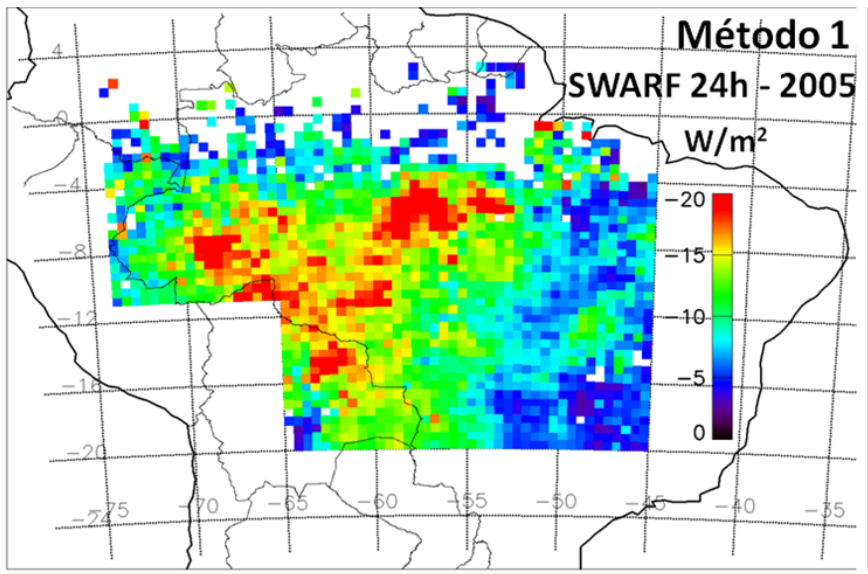


Figura A2.4: Distribuição espacial da forçante radiativa de aerossóis emitidos em queimadas calculada para a estação seca de 2005. Valores para o topo da atmosfera, na faixa de radiação de onda curta (SWARF), calculada para médias de 24 horas. (Sena *et al.*, 2013)

O EFEITO DE PARTÍCULAS DE AEROSSÓIS NO FLUXO DE CARBONO DA REGIÃO AMAZÔNICA

Além de causarem um esfriamento na superfície, as partículas de aerossóis também tem outro efeito importante no ecossistema, que é o de aumentar a taxa de radiação difusa comparada com a radiação direta (Yamasoe *et al.*, 2006, Oliveira *et al.*, 2007). Vários trabalhos realizados na Amazônia analisaram este efeito de alteração no balanço de radiação (por exemplo: Procópio *et al.*, 2003, 2004, Schafer *et al.*, 2002, 2008). O trabalho de Cirino *et al.*, 2013 estudou os efeitos das alterações no balanço radiativo devido a aerossóis e nuvens, sobre a fixação líquida de carbono (Net Ecosystem Exchange - NEE) por ecossistemas de floresta primária de Rondônia e da Amazônia central, próximo a Manaus. Foi avaliado também o impacto dos aerossóis sobre alguns dos principais fatores ambientais que afetam diretamente a atividade fotossintética dos vegetais, como a temperatura do ar e umidade relativa. Um modelo de irradiância de céu claro foi desenvolvido e utilizado para determinar a irradiância relativa (f), utilizada para quantificar a radiação solar extinta (absorvida e espalhada) devido à presença de aerossóis e nuvens na atmosfera. As medidas de espessura óptica de aerossóis foram realizadas com o sensor MODIS, validadas previamente com medidas de fotômetros solar da rede NASA/

AERONET (Aerosol Robotic Network). Os fluxos de carbono foram medidos por meio de técnicas de vórtices turbulentos (eddy-correlation) nas torres do experimento LBA. Dois ecossistemas de floresta constituíram os locais estudados, a Reserva Biológica do Jarú (localizada na região do arco do desflorestamento) e a Reserva Biológica do Cuieiras (localizada na Amazônia central). Na Reserva Biológica do Jarú foi observado um aumento de 29% na fixação de carbono (NEE) quando o AOT variou de 0,1 para 1,5. Já na Amazônia Central, este efeito foi da ordem de 26% quando o AOT variou de 0,10 para 0,50. O aumento de 29% e 26% do NEE, em ambos os sítios, é atribuído ao aumento de até 50% da fração difusa da radiação solar em relação à fração direta desta radiação. Para reduções ainda maiores da radiação solar incidente, associada a altas concentrações de aerossóis na atmosfera e/ou devido à alta cobertura de nuvens, o NEE passa a sofrer reduções significativas, até atingir valores próximos de zero, devido à ausência de luminosidade em quantidades suficientes, requerida pelo processo de fotossíntese. Alterações importantes na temperatura e na umidade relativa do ar pela interação da radiação solar com a alta carga de aerossóis emitidos em queimadas, também foram estudadas em ambos os sítios. Tendo em vista o transporte de aerossol em larga escala durante as queimadas, alterações no fluxo de carbono podem estar ocorrendo em amplas áreas na Amazônia, com importantes mudanças no potencial para os ecossistemas florestais absorverem quantidades significativas de CO_2 atmosférico.

A figura A2.5 ilustra as mudanças relativas na taxa de fixação de carbono expressa como Net Ecosystem Exchange (NEE) e também como o fluxo de carbono bruto. Os resultados são apresentados para a torre do LBA K34 na reserva ecológica ZF2, em Manaus (à esquerda) e as mesmas quantidades para a torre de fluxos da Rebio Jarú em Rondônia (à direita). Observa-se que quando a quantidade de aerossóis aumenta de uma espessura óptica (AOD) de 0.1 (condições de background) para 0.5, que correspondente a uma mudança na irradiância relativa de 1.0 a 0.75, ocorre um forte aumento no fluxo de carbono, expresso como NEE e FluxC para os dois locais. No sítio K34 o aumento de 26 e 17% nas medidas de fluxo estão associadas ao aumento da AOT de 0,10 para 0,50. Já no sítio RBJ as variações da AOT, capazes de produzir o incremento mencionado de 26 e 17% nas medidas de fluxo, foram de 0,10 para 1,4, respectivamente. Os aerossóis de queimadas também produziram reduções de até 40% nas quantidades de radiação total solar incidente e também um aumento de 40-50% na radiação PAR (difusa), que é mais eficientemente utilizada pelo dossel da floresta no processo de fotossíntese. Os resultados mostram uma maior eficiência fotossintética nas situações em que a atmosfera encontra-se carregada de partículas e/ou nuvens. Um maior aproveitamento da fração difusa da radiação solar pode ser apontado como a principal causa do aumento da fixação de CO_2

nas áreas de floresta dos sítios estudados (Cirino *et al.*, 2013). Quando a espessura ótica de aerossóis aumenta além de 0.5 (em 550 nm) observamos uma forte redução na assimilação de carbono pelo ecossistema, como esperado por causa da redução do fluxo de radiação fotossinteticamente ativa (PAR). A redução na incidência de radiação causou um resfriamento de 2 graus centígrados na superfície em ambos os locais estudados.

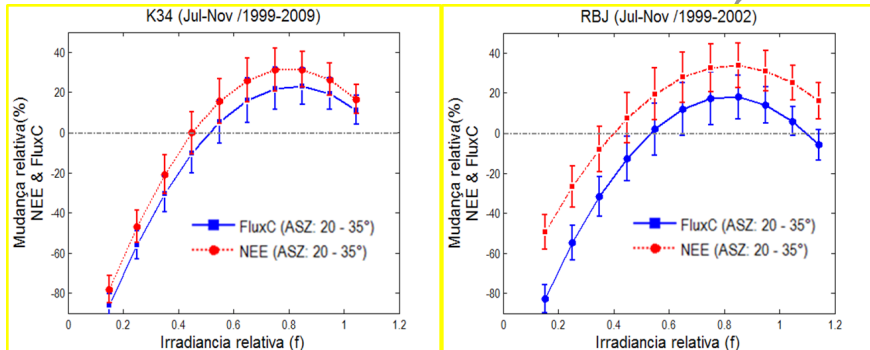


Figura A2.5: Mudança relativa na taxa de fixação de carbono expressa como “Net Ecosystem Exchange” (NEE) e também como o fluxo de carbono bruto para a torre do LBA K34 na reserva ecológica ZF2, em Manaus (à esquerda) e as mesmas quantidades para a torre de fluxos da Rebio Jarú em Rondônia (à direita). A irradiância relativa expressa a redução no fluxo de radiação devido à carga de aerossóis na atmosfera. Para detalhes, consulte Cirino *et al.*, 2013.

CONCLUSÕES

A região amazônica está sofrendo um processo de mudança de uso de solo importante, com impactos no funcionamento do ecossistema amazônico e no clima da região e também com efeitos globais. Diversos novos experimentos estão sendo realizados na região, tais como o experimento GoAmazon 2014-2015, visando entender o impacto que as mudanças de uso de solo na região estão tendo no ciclo hidrológico e na taxa de fixação de carbono no ecossistema. Ainda estamos longe de entender os processos chaves que regulam o funcionamento biológico, químico e físico do ecossistema, mas é fundamental que uma política de prevenção ao desmatamento seja implantada e seguida na Amazônia, pois os danos ao ecossistema podem ser irreversíveis. Outra ameaça vem na forma das mudanças climáticas globais, com potenciais alterações no clima da região, que podem afetar o armazenamento de carbono, o ciclo hidrológico e a estabilidade do ecossistema.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia) que coordena o Programa LBA (Experimento de Larga Escala da Biosfera e Atmosfera da Amazônia) pelo suporte aos vários sítios de pesquisa utilizado neste trabalho. Esta pesquisa foi financiada pela FAPESP através dos projetos 2008/58100-2, 2010/52658-1, 2011/50170-4, 2012/14437-9 e 2013/05014-0. Também agradecemos ao CNPq através dos projetos 475735-2012-9, INCT Amazônia e Projeto Universal 475735/2012-9. Agradecemos a Fernando G. Morais, Alcides C. Ribeiro, Ana L. Loureiro, Fábio de Oliveira Jorge e Simara Morais, pelo suporte técnico essencial nos diversos sítios de pesquisas que utilizamos na Amazônia.

REFERÊNCIAS

ANDREAE, M.O.; ROSENFELD, D.; ARTAXO, P.; COSTA, A. A.; FRANK, G. P.; LONGO, K. M.; SILVA-DIAS, M. A. F. Smoking rain clouds over the Amazon. *Science*, 303, 1337-1342, 2004.

ANDREAE, M. O.; e co-autores. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases and aerosols in Amazonia: The LBA-EUSTACH experiments. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. D20, p. 8066 – 8091, 2002.

ARTAXO, P.; Break down boundaries in climate research. World View Section, *Nature*, v. 481, p. 239, 2012.

ARTAXO, P.; HANSSON, H-C. Size distribution of biogenic aerosol particles from the Amazon basin. *Atmospheric Environment*, v. 29, n. 3, p. 393-402, 1995.

ARTAXO, P., RIZZO, L. V.; J. F. BRITO, H. M. J. BARBOSA, A. ARANA, E. T. SENA, G. G. CIRINO, W. BASTOS, S. T. MARTIN, M. O. ANDREAE. Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. *Faraday Discussions*, DOI:10.1039/C3FD00052D, 2013.

ARTAXO, P., RIZZO, L. V.; PAIXAO, M.; DE LUCCA, S.; OLIVEIRA, P. H.; LARA, L. L.; WIEDEMANN, K. T.; ANDREAE, M. O.; HOLBEN, B.; SCHAFFER, J.; CORREIA, A. L.; PAULIQUEVIS, T. M.; Aerosol particles in Amazonia: Their composition, role in the radiation balance, cloud formation and nutrient cycles. In: Amazonia and Global Change, Ed. M. Keller, M. Bustamante, J. Gash, P. S. Dias. *American Geophysical Union, Geophysical Monograph* 186, pg. 235-254, ISBN: 978-0-87590-449-8, 2009.

ARTAXO, P., Reductions in deforestation rates in Amazonia. *Global Atmospheric Pollution Forum Newsletter*, v.8, p. 2-3, 2010.

ARTAXO, P.; STORMS, H.; BRUYNSEELS, F.; VAN GRIEKEN, R.; MAENHAUT, W. Composition and sources of aerosols from the Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research*, v. 93, p. 1605-1615, 1988.

BOOTH, B. B. B., C. D. JONES, M. COLLINS, I. J. TOTTERDELL, P. M. COX, S. SITCH, C. HUNTINGFORD, R. A. BETTS, G. R. HARRIS e J. LLOYD, High sensitivity of future global warming to land carbon cycle processes, *Environ. Res. Lett.*, 7, 1–8, 2012.

BOUCHER, O., D. RANDALL, P. ARTAXO, C. BRETHERTON, G. FEINGOLD, P. FORSTER, V.-M. KERMINEN, Y. KONDO, H. LIAO, U. LOHMANN, P. RASCH, S. K. SATHEESH, S. SHERWOOD, B. STEVENS e X. Y. ZHANG: Clouds and Aerosols. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex e P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

BOWMAN, D. M. J. S., J. K. BALCH, P. ARTAXO, W. J. BOND, J. M. CARLSON, M. A. COCHRANE, C. M. D. ANTONIO, R. S. DEFRIES, J. C. DOYLE, S. P. HARRISON, F. H. JOHNSTON, J. E. KEELEY, M. A. KRAWCHUK, C. A. KULL, J. BRAD MARSTON, M. A. MORITZ, I. C. PRENTICE, C. I. ROOS, A. C. SCOTT, T. W. SWETNAM, G. R. VAN DER WERF, e S. J. PYNE, Fire in the Earth System. *Science*, 324, 481-484, DOI: 10.1126/science.1163886, 2009.

CIRINO, G.G., R. F. SOUZA, D. K. ADAMS e P. ARTAXO. The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in Amazonia. *Atmos. Chem. Phys.*, v. 14, p. 6523–6543, doi:10.5194/acp-14-6523-2014, 2014.

CLAEYS, M., B. GRAHAM, G. VAS, W. WANG, R. VERMEYLEN, V. PASHYNSKA, J. CAFMEYER, P. GUYON, M. O. ANDREAE, P. ARTAXO, e W. MAENHAUT, Formation of secondary organic aerosols through photooxidation of isoprene. *Science*, v. 303, p. 1173-1176, 2004.

DAVIDSON, E. A., A. C. DE ARAÚJO, P. ARTAXO, J. K. BALCH, I. F. BROWN, M. M. DA C. BUSTAMANTE, M. T. COE, R. S. DEFRIES, M. KELLER, M. LONGO, J. W. MUNGER, W. SCHROEDER, B. S. SOARES-FILHO, C. M. SOUZA JR., S. C. WOFSY. The Amazon Basin in Transition. *Nature*, v. 481, p. 321-328, doi:10.1038/nature10717, 2012.

DAVIDSON, E. A., e P. ARTAXO, Globally significant changes in biological processes of the Amazon Basin: results of the Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment. *Global Change Biology*, v. 10, p. 519-529, 2004.

FORSTER, P., V. RAMSWAMY, P. ARTAXO, T. BERNTSEN, R. A. BETTS, D. W. FAHEY, J. HAYWOOD, J. LEAN, D. C. LOWE, G. MYHRE, J. NGANGA, R. PRINN, G. RAGA, M. SCHULZ, R. VAN DORLAND. Changes in Atmospheric Constituents and Radiative Forcing. Chapter 2 of the Climate Change 2007: The Physical Science Basis, IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change Book, Cambridge University Press, UK, 2007.

GLOOR, M., GATTI, L., BRIENEN, R., FELDPAUSCH, T. R., PHILLIPS, O. L., MILLER, J., OMETTO, J. P., ROCHA, H., BAKER, T., DE JONG, B., HOUGHTON, R. A., MALHI, Y., ARAGÃO, L. E. O. C., GUYOT, J.-L., ZHAO, K., JACKSON, R., PEYLIN, P., SITCH, S., POULTER, B., LOMAS, M., ZAEHLE, S., HUNTINGFORD, C., LEVY, P., e LLOYD, J.: The carbon balance of South America: a review of the status, decadal trends and main determinants. *Biogeosciences*, v. 9, p. 5407-5430, doi:10.5194/bg-9-5407-2012, 2012.

GLOOR, M., R. J. W. BRIENEN, D. GALBRAITH, T. R. FELDPAUSCH, J. SCHÖNGART, J.-L. GUYOT, J. C. ESPINOZA, J. LLOYD, e O. L. PHILLIPS. Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophys Res Lett*, v. 40, p. 1–5, doi:10.1002/grl.50377, 2013.

HUFFMAN, J. A., B. SINHA, R.M. GARLAND, A. SNEE-POLLMANN, S.S. GUNTHER, P. ARTAXO, S.T. MARTIN, M.O. ANDREAE, e U. PÖSCHL. Size distributions and temporal variations of biological aerosol particles in the Amazon rainforest characterized by microscopy and real-time UV-APS fluorescence techniques during AMAZE-08. *Atmos. Chem. Phys.*, v. 12, p. 11997–12019, doi:10.5194/acp-12-11997-2012, 2012.

MALHI, Y. ET AL. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests, *Global Change Biol.*, v. 12, p. 1–32. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01120.x, 2006.

MALHI, Y., L. E. O. C. ARAGÃO, D. GALBRAITH, C. HUNTINGFORD, R. FISHER, P. ZELAZOWSKI, S. SITCH, C.MCSWEENEY, P. MEIR, Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rain forest, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, v. 106, p. 20610–20615, 2009.

MARENGO, J. A., C. A. NOBRE, J. TOMASELLA, M. F. CARDOSO, e M. D. OYAMA, Hydro-climatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005, *Philos. Trans. R. Soc., B*, v. 363, p. 1773–1778, doi:10.1098/rstb.2007.0015, 2008.

MARENGO, J. A., J. TOMASELLA, L. M. ALVES, W. R. SOARES, e D. A. RODRIGUEZ. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region, *Geophys Res Lett*, v. 38, p. L12703 doi:10.1029/2011GL047436, 2011.

MARTIN, S. T., M. O. ANDREAE, P. ARTAXO, D. BAUMGARDNER, QI CHEN, A. H. GOLDSTEIN, A. B. GUENTHER, C. L. HEALD, O. L. MAYOL-BRACERO, P. H. MCMURRY, T. PAULIQUEVIS, U. PÖSCHL, K. A. PRATHER, G. C. ROBERTS, S. R. SALESKA, M. A. SILVA DIAS, D. V. SPRACKLEN, E. SWIETLICKI, e I. TREBS. Sources and Properties of Amazonian Aerosol Particles. *Review of Geophysics*, v. 48, Article number RG2002, DOI: 10.1029/2008RG000280, 2010.

MARTIN, S.T., M. O. ANDREAE, D. ALTHAUSEN, P. ARTAXO, H. BAARS, S. BORRMANN, Q. CHEN, D. K. FARMER, A. GUENTHER, S. S. GUNTHER, J. L. JIMENEZ, T. KARL, K. LONGO, A. MANZI, T. PAULIQUEVIS, M. D. PETERS, A. J. PRENNI, U. PÖSCHL, L. V. RIZZO, J. SCHNEIDER, J. N. SMITH, E. SWIETLICKI, J. TOTA, J. WANG, A. WIEDENSOHLER, e S. R. ZORN. An overview of the Amazonian Aerosol Characterization Experiment 2008 (AMAZE-08). *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 10, p. 18139-18195, doi:10.5194/acp-10-11415-2010, 2010.

OLIVEIRA, P. H. F.; P. ARTAXO, C. PIRES JR, S. DE LUCCA, A. PROCÓPIO, B. HOLBEN, J. SCHAFER, L. F. CARDOSO, S. C. WOFSY, H. R. ROCHA. The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO₂ flux in Amazonia. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, v. 59B, n. 3, 338–349. 2007.

PHILLIPS, O. L., ET AL. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, v. 323, p. 1344–1347, 2009.

POEHLKER, C., K. T. WIEDEMANN, B. SINHA, M. SHIRAIWA, S. S. GUNTHER, M. SMITH, H. SU, P. ARTAXO, Q. CHEN, Y. CHENG, W. ELBERT, M. K. GILLES, A. L. D. KILCOYNE, R. C. MOFFET, M. WEIGAND, S. T. MARTIN, U. POSCHL, M. O. ANDREAE, Biogenic potassium salt particles as seeds for secondary organic aerosol in the Amazon. *Science*, v. 337, p. 1075-1078, doi: 10.1126/science.1223264, 2012.

PÖSCHL, U., S. T. MARTIN, B. SINHA, Q. CHEN, S. S. GUNTHER, J. A. HUFFMAN, S. BORRMANN, D. K. FARMER, R. M. GARLAND, G. HELAS, J. L. JIMENEZ, S. M. KING, A. MANZI, E. MIKHAILOV, T. PAULIQUEVIS, M. D. PETERS, A. J. PRENNI, P. ROLDIN, D. ROSE, J. SCHNEIDER, H. SU, S. R. ZORN, P. ARTAXO, M. O. ANDREAE. Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon. *Science*, v. 329, p. 1513-1516, 2010.

PRENNI, A. J., M. D. PETTERS, S. M. KREIDENWEIS, C. L. HEALD, S. T. MARTIN, P. ARTAXO, R. M. GARLAND, A. G. WOLLNY, U. POESCHL, Relative roles of biogenic emissions and Saharan dust as ice nuclei in the Amazon basin. *Nature Geosciences*, v. 2, p. 402-405, 2009.

PROCÓPIO, A. S., ARTAXO, P., KAUFMAN, Y. J., REMER, L. A., SCHAFER, J. S., HOLBEN, B. N. Multiyear analysis of Amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate. *Geophysical Research Letters*, v. 31, n. 3, p. L03108–L03112, doi:10.1029/2003GL018646, 2004.

PROCOPIO, A. S., REMER, L. A., ARTAXO, P., KAUFMAN, Y. J., HOLBEN, B. N. Modeled Spectral Optical Properties For Smoke Aerosols in Amazonia. *Geophysical Research Letters*, v. 30, n. 24, p. 2.265–2.270. doi: 10.1029/2003GL018063, 2003.

QUESADA, C. A., PHILLIPS, ET AL., Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. *Biogeosciences*, v. 9, p. 2203–2246, doi:10.5194/bg-9-2203-2012, 2012.

RIZZO, L. V., ARTAXO, P., MÜLLER, T., WIEDENSOHLER, A., PAIXÃO, M., CIRINO, G. G., ARANA, A., SWIETLICKI, E., ROLDIN, P., FORS, E. O., WIEDEMANN, K. T., LEAL, L. S. M., e KULMALA, M.: Long term measurements of aerosol optical properties at a primary forest site in Amazonia. *Atmos. Chem. Phys.*, v. 13, p. 2391-2413, doi:10.5194/acp-13-2391-2013, 2013.

RIZZO, L. V., CORREIA, A. L., ARTAXO, P., PROCÓPIO, A. S., ANDREAE, M. O. Spectral dependence of aerosol light absorption over the Amazon Basin. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 11, p. 8899–8912, doi:10.5194/acp-11-8899-2011, 2011.

SCHAFER, J. S., HOLBEN, B. N., ECK, T. F., YAMASOE, M. A., ARTAXO, P., Atmospheric effects on insolation in the Brazilian Amazon: Observed modification of solar radiation by clouds and smoke and derived single scattering albedo of fire aerosols. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. D20, p. 8074, doi:10.1029/2001JD000428, 2002.

SCHAFER, J. S., T. F. ECK, B. N. HOLBEN, P. ARTAXO, A. DUARTE., Characterization of the optical properties of atmospheric aerosols in Amazonia from long term AERONET monitoring (1993-1995, 1999-2006). *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, v. 113, n. D4, Article Number: D04204, doi:10.1029/2007JD009319, 2008

SENA, E. T., P. ARTAXO, e A. L. CORREIA. Spatial variability of the direct radiative forcing of biomass burning aerosols and the effects of land use change in Amazonia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 13, p. 1261–1275, doi:10.5194/acp-13-1261-2013, 2013.

SILVA DIAS, M.A.F, S. RUTLEDGE, P. KABAT, P.L. SILVA DIAS, C. NOBRE, G. FISCH, A.J. DOLMAN, E. ZIPSER, M. GARSTANG, A. MANZI, J. D. FUENTES, H. ROCHA, J. MARENGO, A. PLANA-FATTORI, L. SÁ, R. ALVALÁ, M. O. ANDREAE, P. ARTAXO, R. GIELOW, L. V. GATTI. Clouds and rain processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon Region. *J Geophys Res*, v. 107, n. D20, p. 8072-8092, 2002.

SOARES-FILHO, B. S., NEPSTAD, D. C., CURRAN, L. M., COUTINHO CERQUEIRA, G. GARCIA, R. A., AZEVEDO RAMOS, C., VOLL, E., MCDONALD, A., LEFEBVRE, P., e SCHLESINGER, P.: Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, v. 440, p. 520–523, doi:10.1038/nature04389, 2006.

YAMASOE, M. A., C. VON RANDOW, A. O. MANZI, J. S. SCHAFER, T. F. ECK, B. N. HOLBEN. Effect of smoke and clouds on the transmissivity of photosynthetically active radiation inside the canopy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 6, p. 1645-1656, 2006.

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

A3. MEDIÇÕES E ESTIMATIVAS NUMÉRICAS DA IRRADIÂNCIA SOLAR DESCENDENTE EM SUPERFÍCIE NA REGIÃO AMAZÔNICA – ESTUDOS DE CASOS EM HUMAITÁ, AM

MARCIA AKEMI YAMASOE¹, NILTON MANUEL ÉVORA DO ROSÁRIO², TASSIO SANTOS COSTA¹, RENATO KERCHES BRAGHIERE¹, ÉRICO AUGUSTO LEIVA¹, FABRICIO BERTON ZANCHI³, BIANCA LOBO SILVA¹, JULIO CESAR MORAIS¹

RESUMO

Este trabalho, a partir da análise dos resultados de alguns experimentos de campo realizados na região amazônica em estações de queimadas de anos distintos, teve como principal objetivo ilustrar o estado da arte em se calcular numericamente a irradiância solar descendente em superfície em diferentes regiões espectrais na presença de partículas de aerossol emitidas por queimadas. Alguns testes numéricos, com o auxílio de códigos de transferência radiativa também foram efetuados para avaliar o efeito de tais partículas de aerossol sobre as taxas de aquecimento radiativo da atmosfera. Os modelos ópticos para o aerossol de queimadas propostos por Rosário (2011) foram utilizados como entrada nos códigos de transferência radiativa. Os resultados mostraram que, para a região de Humaitá, o modelo óptico de aerossol com baixo albedo simples foi o que resultou em menor diferença entre observações e cálculos de irradiância incidente em superfície. Para a irradiância global, a diferença relativa ficou em torno de 5%, ao passo que para a fração difusa, os cálculos numéricos superestimaram as observações, com diferença relativa de até 30%. Os testes numéricos para a taxa de aquecimento radiativo na presença de aerossol de queimadas mostraram que tanto a abundância quanto a capacidade de absorção de radiação por parte dos aerossóis, assim como sua distribuição vertical na atmosfera contribuem para alterar o perfil da taxa de aquecimento radiativo da atmosfera. A sua presença pode contrabalançar o resfriamento induzido pela emissão de radiação no espectro terrestre devido ao vapor d'água.

1 Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, IAG/USP.

2 Universidade Federal de São Paulo, Campus Diadema, Diadema, SP.

3 Universidade Federal do Amazonas, Campus Humaitá, Humaitá, AM.

INTRODUÇÃO

As partículas de aerossol atmosférico são definidas como partículas sólidas ou líquidas com tamanhos que variam da ordem de alguns nanômetros a algumas dezenas de micrômetros em suspensão na atmosfera (Seinfeld e Pandis, 1998). Essas minúsculas partículas são objeto de estudo em diferentes áreas da Meteorologia, Química e da Medicina, por exemplo. Podem ser emitidas por fontes naturais (erupção vulcânica, ação do vento que tanto causa a suspensão de poeira do solo quanto gera o *spray* marinho, a vegetação) e antrópicas como indústrias, queima de combustíveis fósseis e a queima de biomassa. Na Meteorologia, as partículas de aerossol são estudadas porque elas têm o potencial de interagir com a radiação solar, afetando o balanço de radiação do sistema Terra-atmosfera. Sua intervenção sobre esse balanço pode ser direta ou indireta. O efeito direto é devido à sua capacidade de espalhar e absorver radiação solar¹. Partículas muito grandes, com tamanho superior a da ordem de 5 μ m de raio, podem também interagir com a radiação terrestre por espalhamento, absorção e emissão, devido ao seu tamanho comparável com os comprimentos de onda da radiação nessa região espectral.

O processo de absorção reduz a quantidade de radiação solar incidente em superfície e pode aquecer as camadas intermediárias da atmosfera nas quais as partículas se encontram. O aquecimento da atmosfera e o resfriamento da superfície causados pela menor incidência de radiação solar estabilizam a atmosfera, diminuindo os processos convectivos, portanto diminuindo a probabilidade de formação de nuvens. Uma forma de quantificar o efeito de aquecimento é através do cálculo da taxa de aquecimento radiativo, variável que, junto com o balanço de energia radiativa na superfície, relaciona o perfil vertical do efeito radiativo direto dos aerossóis à estrutura termodinâmica da atmosfera nos modelos climáticos. Ela expressa o perfil de aquecimento da atmosfera devido à absorção de radiação pelos constituintes atmosféricos. No caso das partículas de aerossol, tal aquecimento não é apenas influenciado pela estrutura vertical da sua abundância, mas também pelo perfil vertical da habilidade do particulado em absorver a radiação solar.

O processo de espalhamento também reduz a quantidade de radiação que chega à superfície, visto que parte da radiação incidente no topo da atmosfera é refletida de volta para o espaço, isto é, gerando um efeito oposto ao dos gases de efeito estufa. Além disso, o desvio de radiação para diferentes orientações aumenta a fração de radiação solar na forma difusa.

1. Nas Ciências Atmosféricas, é comum a separação do espectro de radiação entre radiação solar e radiação terrestre. O espectro de radiação solar é mais abundante em comprimentos de onda menores (e, portanto, com mais energia do que o espectro de radiação terrestre).

Esse aumento na disponibilidade de radiação difusa permite que folhas que estariam à sombra da radiação solar direta possam ser atingidas por radiação proveniente de outras orientações do céu e, com isso, aumentar a capacidade fotossintética da copa das árvores (Roderick *et al.*, 2001, Gu *et al.* 2002, Niyogi *et al.*, 2004, Mercado *et al.*, 2009).

No Brasil, a principal fonte de partículas de aerossol de origem antrópica, com alcance regional, são as queimadas, que ocorrem principalmente durante o fim da estação seca e durante a transição entre as estações seca e chuvosa (meses de agosto a outubro). As queimadas são utilizadas para fins agropecuários, a partir do desmatamento de florestas primárias e como ferramenta para limpeza dos resíduos agrícolas de culturas anteriores. A região mais afetada pelas queimadas é denominada arco do desflorestamento, região de fronteira ao sul e leste da floresta amazônica (Fernside, 2005), embora focos possam ser observados em praticamente todo o Brasil e grande parte da América do Sul (sobretudo Bolívia, Paraguai e norte da Argentina).

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados de experimentos de campo realizados na região amazônica em diferentes anos, com ênfase no realizado em Humaitá, AM, de agosto a outubro de 2012, na presença de partículas de aerossol de queimadas. Um dos objetivos é ilustrar a precisão com a qual se consegue, atualmente, estimar numericamente a irradiância solar incidente em superfície, em diferentes regiões espectrais, com o uso de códigos de transferência radiativa e os modelos ópticos para o aerossol de queimadas propostos por Rosário (2011). Entende-se por modelo óptico um conjunto de propriedades do aerossol distribuídas espectralmente, necessárias para calcular o seu efeito sobre a radiação em diferentes comprimentos de onda, tais como albedo simples, função de fase, coeficiente de extinção. O coeficiente linear de extinção representa a capacidade do aerossol em interagir com a radiação por eventos de espalhamento e absorção, é proporcional à concentração de partículas na atmosfera e sua integral em toda a coluna vertical define a profundidade óptica do aerossol. O albedo simples é definido como a razão entre o coeficiente linear de espalhamento e o coeficiente linear de extinção, isto é, num evento de extinção, indica a probabilidade de que a extinção tenha ocorrido por espalhamento. Dessa forma, albedo simples unitário indica que o aerossol não absorve radiação naquele comprimento de onda. A função de fase determina a fração da radiação incidente que foi espalhada nas demais orientações. Alguns estudos teóricos sobre as taxas de aquecimento radiativo utilizando esses modelos ópticos, comparando-as com as devidas apenas ao vapor d'água também são discutidos.

METODOLOGIA

Um experimento de campo foi realizado nas imediações de Humaitá, AM, no período de 15 de agosto a 2 de outubro de 2012. A instrumentação foi instalada em uma torre micrometeorológica, de 45 metros de altura, localizada numa área preservada de floresta tropical primária ($-7,47^{\circ}$; $-63,23^{\circ}$) e no topo de um dos prédios da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), campus Humaitá ($-7,52^{\circ}$; $-63,03^{\circ}$). A Figura A3.1a ilustra a localização dos sítios experimentais no estado do Amazonas e a Figura A3.1b apresenta um mapa ampliado, onde é possível observar que a torre se localiza na borda entre a floresta tropical primária e áreas desmatadas e que o prédio da UFAM está localizado em área urbanizada.

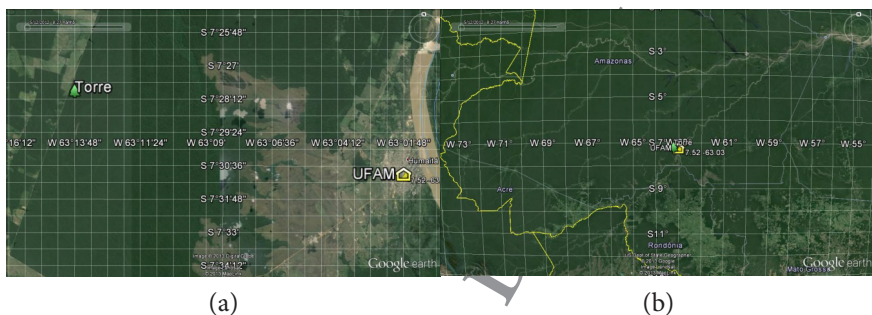


Figura A3.1: Localização dos sítios experimentais: a) ampliação do mapa com destaque para os sítios da Torre localizada em floresta tropical úmida (coordenadas geográficas: $-7,47^{\circ}$; $-63,23^{\circ}$) e da Universidade Federal do Amazonas - UFAM (coordenadas geográficas: $-7,52^{\circ}$; $-63,03^{\circ}$). Figura adaptada do Google Earth; b) mapa ilustrando parte da região Norte, com destaque para o estado do Amazonas.

No campus da UFAM foi montado um radiômetro do tipo MFRSR (*Multi-Filter Rotating Shadowband Radiometer*) da Yankee Environmental Systems (YES), que possui quatro canais em bandas espectrais estreitas centradas em 415, 670, 870 e 1036nm, e largura à meia altura de 10nm, utilizadas para determinar a profundidade óptica do aerossol e um canal de banda larga (de 300 a 2700nm). Um anel de sombreamento permite a medição dos componentes global e difuso da irradiância incidente nas diversas bandas espectrais (Harrison *et al.*, 1994). De 21 de setembro a 2 de outubro, foi utilizado também um espectroradiômetro da EKO Instruments, que faz medições de irradiância espectral no intervalo de 347 a 1057nm, em intervalos aproximados de 3 nm. Na torre micrometeorológica, foram instalados sensores de irradiância fotossinteticamente ativa (PAR, do inglês, *photosynthetically active radiation*), modelo SKE 510 da Skye Instruments na região espectral compreendida entre 400 e 700nm.

Para estimar numericamente os valores de irradiância incidente foi utilizado o código de transferência radiativa LibRadtran versão 1.6-beta (Mayer e Killing, 2005), utilizando como parâmetros de entrada o perfil de atmosfera tropical e de irradiância solar incidente no topo da atmosfera *New Guey* (Gueymard, 2004), ambos da biblioteca do LibRadtran. Para o ozônio integrado na coluna adotou-se um valor fixo igual a 267DU, valor médio estimado para o período do experimento de acordo com as observações do *Ozone Monitoring Instrument* (OMI), cujos dados estão disponíveis no sistema Giovanni, do *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* (GES DISC - <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>).

$$\alpha(670,870) = - \frac{\ln(AOD_{670nm} / AOD_{870nm})}{\ln(670/870)}$$

Os modelos ópticos para o aerossol de queimadas, também utilizados como entrada no código de transferência radiativa, foram propostos por Rosário (2011) e são baseados em intervalos de albedo simples (ω_λ), sendo um modelo de aerossol mais espalhador de radiação ($\omega_{550nm} = 0,95$, regime R1), um moderadamente absorvedor ($\omega_{550nm} = 0,93$, regime R2) e um mais absorvedor ($\omega_{550nm} = 0,90$, regime R3). A diferença entre os regimes pode estar relacionada com o tipo de biomassa queimada e o seu teor de umidade, particularmente com a emissão de diferentes frações de *black carbon*, ou com processos de envelhecimento das partículas de aerossol na atmosfera, embora maiores estudos ainda sejam necessários para compreender melhor essas diferenças. Neste trabalho, foram adotados os resultados obtidos para o sítio de Abracos Hill, localizado em Ouro Preto d'Oeste, RO, por estar mais próximo do local deste estudo. Para estimar a profundidade óptica do aerossol em 550nm, necessária também como entrada ao código, foi utilizado o coeficiente de Ångström (alfa) estimado nos canais de 670 e 870nm, definido como:

Para o estudo do efeito das partículas de aerossol sobre as taxas de aquecimento radiativo, um conjunto de perfis verticais de concentração e coeficientes de extinção dos aerossóis obtidos durante a estação de queimadas no sul da Amazônia em 2002 foi utilizado. Os perfis foram obtidos com o auxílio de um LIDAR (*Light Detection and Ranging*) e de medições efetuadas a bordo da aeronave Bandeirante do INPE durante os experimentos RACCI/SMOCC (*Radiation, Cloud, and Climate Interactions e Smoke Aerosols, Clouds, Rainfall and Climate*, Andreae et al., 2004). Neste caso, foi empregado o código de transferência radiativa SBDART (Ricchiazzi et al., 1998). As simulações foram realizadas considerando duas

geometrias de iluminação solar (SZA, da expressão em inglês *Solar Zenith Angle*), $SZA = 60^\circ$ ($\mu_0 = \cos(SZA) = 0,5$) e $SZA = 0^\circ$ ($\mu_0 = \cos(SZA) = 1,0$). Foram considerados perfis termodinâmicos compatíveis com as geometrias de iluminação adotadas, isto é, perfis médios locais de temperatura e razão de mistura de radiossondas das 12Z ($P_{atms12Z}$) e das 15Z ($P_{atms15Z}$). Também nesta análise, foram utilizados os modelos ópticos para o aerossol de queimadas na região propostos por Rosário (2011).

RESULTADOS



Figura A3.2: Fotos de queimadas em Humaitá, AM: à esquerda, em área de pastagem nas proximidades do aeroporto, de 14/08/2012 e à direita, em área de cerrado ao longo da rodovia BR174, de 15/08/2012 (acervo pessoal de M. A. Yamasoe).

Durante o período de realização das atividades de campo em Humaitá, foi comum observar a ocorrência de focos de incêndio nas proximidades de realização das medidas experimentais. A Figura A3.2 ilustra algumas fotos tiradas durante o período do experimento, onde se observa que as queimadas na região aconteceram em áreas de pastagem ou de cerrado. Em consequência, a profundidade óptica do aerossol em 550nm se apresentou moderadamente alta para a região, com valor acima de 1,0 num dos dias monitorados, conforme ilustra a Figura A3.3 na qual são apresentados os valores médios diários de AOD em 550nm e do coeficiente de Ångström estimado entre os canais de 670 e 870nm. Valores típicos na região fora do período de queimadas são inferiores a 0,2 (Rosário, 2011), ao passo que, durante a estação de queimadas de 2007, valores médios diários superiores a 2,0 puderam ser observados na Reserva Biológica do Jarú, RO (Silva, 2012). Os valores do coeficiente de Ångström superiores a 1,0 confirmam a presença de partículas de aerossol da moda fina.

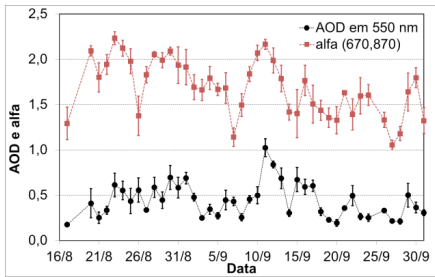


Figura A3.3: Valores médios diários da profundidade óptica do aerossol em 550 nm (AOD) e do coeficiente de Ångström (alfa) estimado para os comprimentos de onda de 670 e 870 nm. Os dados foram coletados em 2012.

Uma das consequências da presença das partículas de aerossol é a redução da radiação solar incidente em superfície. Para ilustrar esse efeito, valores médios de irradiância solar global, difusa e fotossinteticamente ativa observados próximos ao meio-dia solar são apresentados graficamente como função dos valores médios de AOD em 550nm obtidos nos mesmos instantes. Como apresentado na Figura A3.4, linhas pontilhadas em preto, a irradiância solar global incidente em superfície seria da ordem de 930Wm^{-2} próximo ao meio-dia solar para uma atmosfera sem aerossol, isto é, para $\text{AOD} = 0,0$. Conforme a AOD aumentou, a irradiância diminuiu, atingindo valores abaixo de 785Wm^{-2} , para AOD em torno de 1,0, o que representa um redução da ordem de 16%. Para a irradiância PAR, a redução média observada foi da ordem de 17%, conforme os pontos em azul. Por outro lado, no que diz respeito à irradiância difusa, seu valor variou de aproximadamente 55Wm^{-2} , numa atmosfera sem aerossol, da ordem de 290Wm^{-2} , para AOD de 1,0, conforme pontos em vermelho. As linhas tracejadas na figura foram obtidas com o uso do código de transferência radiativa LibRadtran, utilizando o modelo óptico de aerossol de queimadas mais absorvedor e SZA de $24,5^\circ$, curva inferior, e o moderadamente absorvedor de radiação e SZA de $3,5^\circ$, curva superior, propostos por Rosário (2011). Como é possível observar, em geral, os resultados obtidos com o modelo mais absorvedor de radiação tanto para a irradiância solar global quanto para a PAR se apresentaram dentro de um desvio padrão dos valores médios experimentais. No caso da irradiância difusa, o uso de modelos ópticos distintos e variações no ângulo solar zenital entre $3,5^\circ$ a 25° praticamente não alteraram o resultado obtido. Entretanto, nota-se claramente que, com o aumento da AOD, maior discrepância entre observações e cálculos foi obtida.

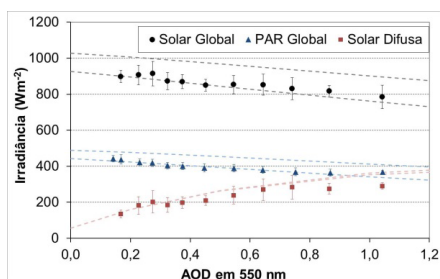


Figura A3.4: Irradiância solar incidente em superfície (solar total global e difusa e fotossinteticamente ativa – PAR) próximo ao meio-dia solar em função da profundidade óptica do aerossol em 550nm. As linhas tracejadas foram obtidas com o uso do código de transferência radiativa LibRadtran, utilizando o modelo óptico de aerossol de queimadas (Rosário, 2011) mais absorvedor e SAZ de 24,5° (curva inferior) e o moderadamente absorvedor de radiação e SAZ de 3,5° (curva superior).

A Figura A3.5 ilustra o ciclo diurno da irradiância solar global (a) e respectiva fração difusa (b) para o dia 12 de setembro. A profundidade óptica do aerossol em 550nm nesse dia variou entre 0,8 a 0,9. São apresentados os valores observados experimentalmente e os calculados com o código de transferência radiativa LibRadtran, considerando condições prístinas, isto é, com profundidade óptica do aerossol em 550nm igual a 0,12 e em condições de AOD instantâneas observadas no dia 12 de setembro. Nota-se claramente, nas figuras, que a ausência de aerossol nos cálculos provocou uma superestimação dos valores de irradiância solar global e subestimativa da fração difusa. O modelo óptico de aerossol que resultou na menor diferença relativa entre observações e cálculos foi o mais absorvedor de radiação. A diferença relativa entre observações e cálculos da irradiância solar global foi da ordem de 2% (Figura A3.5a). Para a fração difusa, a diferença foi da ordem de 10 a 20%. As maiores diferenças observadas foram devidas à contaminação por nuvens.

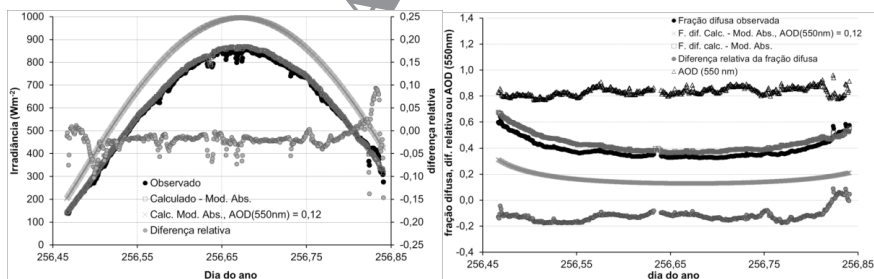


Figura A3.5: Comparação da variação diurna da irradiância solar incidente observada experimentalmente (círculos cheios pretos) e calculada com o código de transferência radiativa LibRadtran utilizando o modelo óptico de aerossol absorvedor de radiação proposto por Rosário (2011) e uma atmosfera limpa, isto é, com AOD(550nm)=0,12 (x em cinza) e com a AOD em 550nm observada (quadrados vazios em cinza). Os círculos em cinza representam a diferença entre a irradiância medida e a modelada com relação à medida. a) irradiância solar global e b) fração difusa da irradiância solar incidente. Em b) são apresentados também os valores de AOD em 550nm (triângulos vazios pretos). Valores para o dia do ano 256 (12 de setembro de 2012).

Conforme discussão apresentada em Rosário (2011), uma das hipóteses para a prevalência do modelo óptico de aerossol mais absorvedor de radiação pode ser devido ao tipo de biomassa queimada (gramínea ou cerrado) que é consumida majoritariamente na fase *flaming* ou fase de chama da combustão, com maior eficiência de emissão de partículas de *black carbon* (Yamasoe, 1994, Yamasoe *et al.*, 2000). Segundo Jacobson (2001), o *black carbon* possui alta eficiência de absorção de radiação solar, apresentando potencial de efeito estufa maior que o do metano, podendo ser o segundo componente antrópico do aquecimento global. As fotos apresentadas na Figura A3.2, tiradas no início do experimento corroboram para essa hipótese.

Um exemplo de comparação entre observação e cálculo da irradiância espectral é apresentada na Figura A3.6 para dois instantes, às 14:00 e às 16:16 UTC, do dia 22 de setembro de 2012.

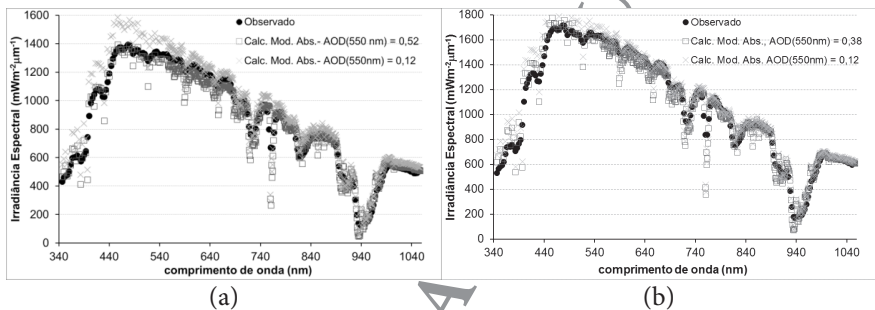


Figura A3.6: Comparação entre irradiância espectral incidente no intervalo entre 340 a 1056nm observada experimentalmente e calculada com o código de transferência radiativa LibRadtran para dois instantes do dia 22 de setembro de 2012. a) às 14:00 UTC e b) às 16:16 UTC. São apresentados os valores experimentais em círculos pretos cheios, os valores calculados considerando AOD em 550nm igual a 0,12 e considerando o valor observado de AOD, igual a 0,52 e 0,38, respectivamente às 14:00 e às 16:16 UTC.

Conforme mencionado, somente a partir do dia 21 de setembro o espectralradiômetro esteve disponível, período no qual a AOD já havia diminuído conforme ilustrado na Figura A3.3. Os horários escolhidos representam instantes nos quais a AOD apresentou valor mais alto nesse dia e livre de contaminação de nuvens. Novamente, mesmo para o caso no qual a AOD foi relativamente baixa, igual a 0,38, o cálculo com valor de AOD prístino superestimou os valores observados de 3 a 10%, dependendo do instante e da região espectral. Como o espaçamento espectral entre medições e cálculos é ligeiramente distinto, na Tabela A3.1 são apresentados os valores de irradiância integrados em diferentes regiões espectrais para permitir uma melhor comparação entre os valores observados e os calculados numericamente. É possível observar na tabela que, com a inclusão do valor de profundidade óptica do aerossol

observado, a diferença relativa diminuiu, variando de 0 a no máximo 6%. Uma explicação para as maiores diferenças observadas às 14:00 nas regiões espectrais do ultravioleta e visível pode ser devido à variação do valor de coluna integrada do ozônio, visto que essas regiões são mais sensíveis a variações na concentração desse gás também.

Tabela A3.1: Comparação da irradiância integrada em diferentes regiões espectrais obtida experimentalmente e calculada numericamente com valor de AOD em 550nm igual a 0,12 (atmosfera limpa) e observado no instante da medição às 14:00 e às 16:16 UTC do dia 22 de setembro de 2012.

Instante	14:00 UTC			16:16 UTC		
	Observado (Wm ⁻²)	Calculado (Wm ⁻²) (AOD = 0,12)	Calculado (Wm ⁻²) (AOD = 0,52)	Observado (Wm ⁻²)	Calculado (Wm ⁻²) (AOD = 0,12)	Calculado (Wm ⁻²) (AOD = 0,38)
Região espectral*						
UV	34,2	37,7 (10%)	32,2 (-6%)	42,1	45,9 (9%)	42,2 (0,3%)
VIS	370,7	396,7 (7%)	355,7 (-4%)	456,5	473,2 (4%)	447,2 (-2%)
IVP	219,0	236,0 (8%)	221,8 (1%)	271,4	280,6 (3%)	271,4 (0%)
Soma	617,4	668,2 (8%)	607,8 (2%)	762,0	796,0 (4%)	757,5 (-0,6%)

* UV: ultravioleta (entre 347 a 400nm), VIS: visível (entre 400 a 700 nm), IVP: infravermelho próximo (entre 700 a 1057nm), Soma: de 347 a 1057nm.

Durante a estação de queimadas na Amazônia, uma das características da distribuição vertical da concentração de partículas de aerossol na atmosfera é a acentuada estratificação, resultante da interação complexa entre a emissão pelas queimadas e os processos de convecção, advecção e remoção. Essa característica foi observada tanto nos perfis de conteúdo de aerossóis obtidos via medições *in situ* realizadas a bordo de aeronaves (Figura A3.7) como nos provenientes de sensoriamento remoto ativo (não mostrados, Rosário, 2011). Esses dados revelam o desafio dos modelos climáticos no que diz respeito à simulação da estrutura vertical do efeito radiativo direto do material particulado emitido pela queima de biomassa na região da Bacia Amazônica. Nesse contexto, destaca-se em particular o impacto da absorção da radiação solar pelas partículas na estrutura termodinâmica e, conseqüentemente, nas condições de estabilidade da atmosfera regional.

Os perfis 2 (P_{aer2}) e 4 (P_{aer4}) da Figura A3.7 foram utilizados para estimar as taxas de aquecimento radiativo na presença do aerossol de queimadas. O primeiro representa o cenário em que os aerossóis estão confinados nas camadas próximas à superfície e o segundo representa um caso exemplo de estratificação com uma camada de aerossol confinada à camada limite planetária e outra acima, na atmosfera livre.

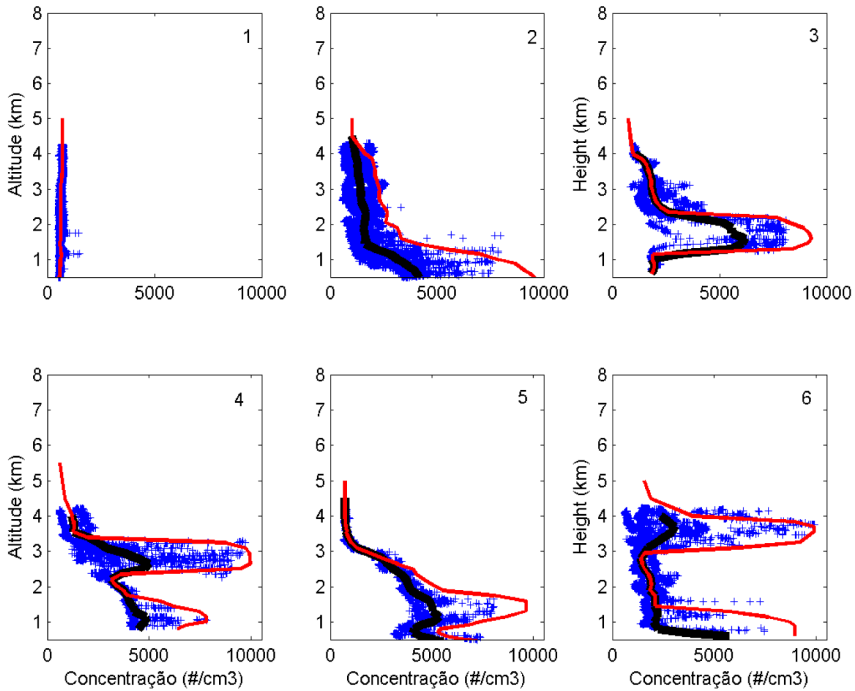


Figura A3.7: Perfis de concentração de partículas de aerossol (azul) obtidos a partir de medições a bordo de aeronaves. As curvas na cor vermelha representam as estruturas verticais das partículas utilizadas nas simulações numéricas e delineadas com base na concentração máxima em cada nível.

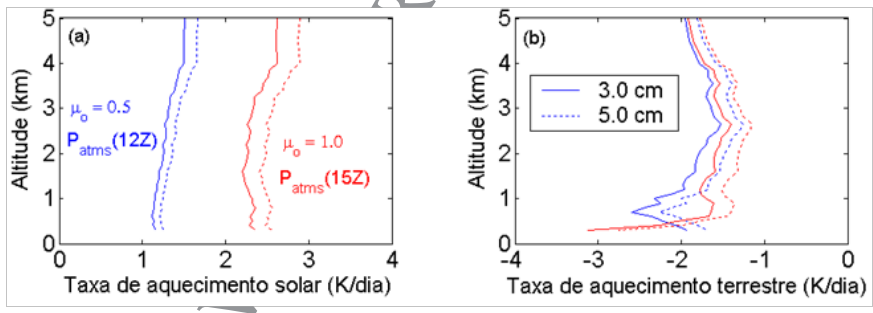


Figura A3.8: Perfis verticais da taxa de aquecimento radiativo para diferentes conteúdos integrados de vapor d'água, 3,0 (linha cheia) e 5,0 cm (linha tracejada) em condições de atmosfera limpa e sem nuvens nos espectros solar (a) e terrestre (b). Para as geometrias de iluminação $\mu_o = 0,5$ e $\mu_o = 1,0$ foram utilizados, respectivamente, os perfis termodinâmicos médios para os horários das 12Z (azul) e 15Z (vermelho).

A Figura A3.8 mostra o perfil da taxa de aquecimento radiativo para diferentes conteúdos integrados de vapor d'água (3,0 e 5,0 cm, que correspondem respectivamente a 30 e 50 kg/m²) em condições de atmosfera limpa e sem nuvens em ambos os espectros, solar e terrestre. Os conteúdos

de vapor d'água adotados baseiam-se na variabilidade observada a partir dos dados dos fotômetros da AERONET na região. Como observado na figura, abaixo de 5 km, o perfil da taxa de aquecimento radiativo no espectro solar não variou significativamente com a altitude, os valores se situaram entre 1,0 e 1,5K/dia para $\mu_0 = 0,5$ e entre 2,0 e 3,0K/dia para $\mu_0 = 1,0$. Na ausência de aerossóis, a diferença na geometria de iluminação foi responsável pela maior variabilidade na taxa de aquecimento radiativo observada no espectro solar. O aumento do conteúdo de vapor d'água de 3,0 para 5,0cm não implicou em substancial alteração no perfil. Isto mostra que, nos baixos níveis, a variabilidade diurna do conteúdo de vapor d'água na região das queimadas na Amazônia não afeta significativamente o perfil da taxa de aquecimento radiativo solar. Os perfis da taxa de aquecimento no espectro terrestre, ao contrário do solar, apresentaram significativa variação com a altitude devido ao ciclo diurno do perfil termodinâmico nas camadas próximas à superfície. Nas camadas mais distantes da superfície a variabilidade diurna foi menos acentuada. Os valores obtidos variaram entre -1,5 e -2,5K/dia para o perfil atmosférico das 12Z e entre -1,0 e -3,0K/dia para o das 15Z. Nota-se que para o perfil das 12Z, ao contrário do das 15Z, o valor máximo não ocorreu na superfície, mas sim, alguns níveis acima. Isto é um reflexo da estrutura termodinâmica herdada do período noturno. As camadas próximas da superfície estão ligeiramente mais frias que as imediatamente acima. À medida que a superfície é aquecida, a divergência de fluxo na camada superficial aumenta e a máxima taxa de aquecimento radiativo passa a ocorrer próximo da superfície. Entender a modulação exercida pelos aerossóis nessa transição é fundamental para a compreensão dos seus efeitos na evolução diurna da camada limite. Na troposfera livre, o ciclo diurno do perfil termodinâmico é menos pronunciado, resultando em taxas de aquecimento similares para os dois horários.

A Figura A3.9 apresenta os resultados do estudo de sensibilidade à abundância e à eficiência de absorção das partículas de aerossol. As simulações são apresentadas para as duas geometrias de iluminação consideradas anteriormente ($\mu_0 = 0,5$ e $\mu_0 = 1,0$) e para as distribuições verticais de aerossóis (P_{aer2} ; P_{aer4}), como referido. Conforme esperado, quanto maior a quantidade de partículas, maior a taxa de aquecimento. Dobrar a quantidade de aerossóis na camada para a geometria de iluminação $\mu_0 = 1,0$ pode implicar em diferenças de até 3,0K/dia, dependendo da eficiência do aerossol em absorver radiação. Este valor é igual ao do pico da taxa de aquecimento no espectro terrestre na camada superficial às 15Z já discutido. Com relação à dependência com a eficiência de absorção, o impacto é maior para abundâncias de partículas e disponibilidade de radiação maiores. Para $\mu_0 = 1,0$ e $AOD(550nm) = 1,0$, a diferença entre os máximos dos perfis da taxa de aquecimento radiativo solar do modelo absorvedor e do espalhador foi superior a 2,0K/dia, ou seja, a mesma magnitude associada

à taxa de aquecimento do vapor d'água no espectro solar. Outro exemplo do impacto da variabilidade das propriedades radiativas intrínsecas pode ser vista ao analisarmos os perfis correspondentes a $AOD(550nm) = 1,0$, R1, e $AOD(550nm) = 0,5$, R3, para qualquer μ_0 . Apesar da significativa diferença na AOD entre os dois casos, os perfis de taxa de aquecimento são similares. Também foi avaliada a sensibilidade com a distribuição vertical dos aerossóis. Existem duas formas de expor uma camada de aerossóis a maiores valores de radiação solar: através do ciclo diurno da irradiância solar e, para uma mesma geometria de iluminação, elevando a camada de aerossóis a níveis mais altos da atmosfera. Este último caso é representado nos gráficos (a) e (b) da Figura A3.9. O impacto na taxa de aquecimento é evidente. Entre os casos dos dois gráficos, a diferença no pico da taxa de aquecimento para $AOD(550nm) = 1,0$ é de quase 2,0 K/dia. A estratificação maximizou os efeitos radiativos das camadas de aerossóis localizadas em níveis superiores, em detrimento daquelas próximas à superfície.

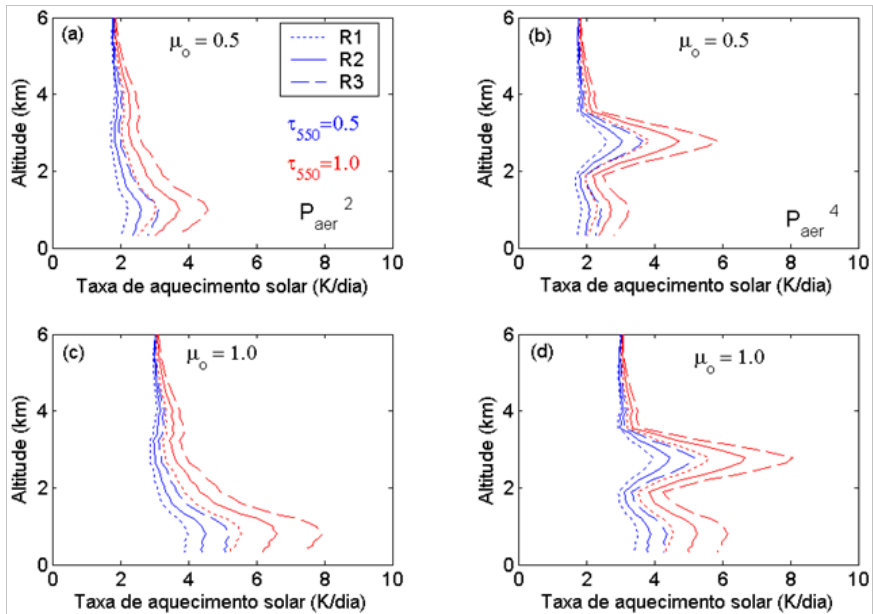


Figura A3.9: Perfis de taxas de aquecimento radiativo solar considerando os diferentes regimes de propriedades radiativas para o aerossol de queimadas, R1, R2 e R3, diferentes geometrias solar ($\mu_0 = 0,5$ e $\mu_0 = 1,0$) e diferentes valores de profundidade óptica do aerossol, $AOD(550nm) = 0,5$ (azul) e $AOD(550nm) = 1,0$ (vermelho). Os resultados correspondem a distintas distribuições verticais de aerossóis, e, a primeira (P_{aer}^2) descreve um decaimento exponencial da concentração dos aerossóis com a altitude (a, c) e segunda (P_{aer}^4) um cenário com a concentração estratificada (b, d).

A Figura A3.10 mostra os resultados para o perfil vertical da taxa de aquecimento radiativo líquido (solar + terrestre) para as condições de atmosfera limpa e poluída ($AOD(550nm) = 0,5$) para os dois perfis verticais (P_{aer2} ; P_{aer4}) e os três regimes de aerossóis (R1, R2 e R3). O principal efeito dos aerossóis é o de contrabalançar o resfriamento induzido pela taxa de aquecimento radiativo do espectro terrestre. Quanto maior a quantidade de partículas e mais absorvedoras elas forem, mais eficiente é este processo. O impacto das camadas de aerossol em níveis mais elevados da troposfera é potencializado pela maior exposição à radiação solar e pela menor magnitude da taxa de aquecimento radiativo no espectro terrestre. O impacto de considerar partículas de aerossol espalhadoras ou absorvedoras supera 1,5K/dia no nível onde a concentração de partículas é máxima.

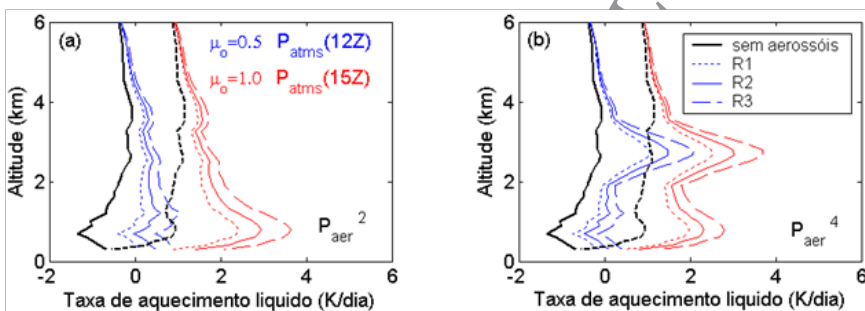


Figura A3.10: Perfis de taxas de aquecimento radiativo líquido (solar + terrestre) em condições de atmosfera sem aerossóis (linhas pretas, tracejada para $\mu_0=1,0$ e cheia para $\mu_0=0,5$) e para os perfis verticais de aerossóis (a) P_{aer2} e (b) P_{aer4} e os regimes de propriedades radiativas, R1, R2 e R3. Nos casos em que os aerossóis são considerados a distinção entre as geometrias do sol é feita por meio das cores azul ($\mu_0 = 0,5$) e vermelho ($\mu_0 = 1,0$).

Os resultados mostraram o potencial de impacto da estratificação das partículas de aerossol de queimadas na Amazônia no perfil da taxa de aquecimento radiativo líquido na baixa troposfera e a dependência desse impacto com a abundância, eficiência de absorção e características da estratificação das partículas. Devido à relevância dos impactos quando comparados com o principal absorvedor natural de radiação na baixa troposfera, o vapor d'água, os resultados sugerem implicações relevantes para a estrutura termodinâmica da atmosfera regional.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Os resultados apresentados mostram que as partículas de aerossol emitidas por queimadas na região de Humaitá, AM, durante a estação de queimadas de 2012 reduziram em aproximadamente 16% a irradiância solar global descendente em superfície ao meio-dia solar, aumentando

significativamente a fração difusa. A partir de modelos ópticos para o aerossol de queimadas propostos por Rosário (2011) e com o auxílio do código de transferência radiativa LibRadtran versão 1.6-beta, foi possível estimar numericamente a irradiância em superfície, em diferentes regiões espectrais. Para a irradiância solar global, a diferença relativa máxima foi da ordem de 5%, quando comparada com os valores observados. Para a fração difusa, por outro lado, a diferença entre os valores calculados numericamente e obtidos experimentalmente pode chegar a 30%, sendo os valores simulados sistematicamente superiores aos observados. Infelizmente não foi possível investigar se o problema se deve ao sistema utilizado para medir o componente difuso, no qual a correção do excesso de sombreamento pelo anel pode não ter sido suficiente ou se é uma limitação do código de transferência radiativa.

Para Humaitá, o modelo óptico para o aerossol de queimadas que resultou em menores diferenças entre observações e cálculos de irradiância solar incidente em superfície foi o mais absorvedor de radiação proposto por Rosário (2011), isto é, aquele com menor valor de albedo simples. Sobre a região predominou a queima de pastagem e de vegetação de cerrado, cuja combustão se processa majoritariamente sob a fase de chamas, na qual a eficiência de combustão é maior e com maior emissão de partículas de *black carbon*, que apresentam alta eficiência de absorção de radiação. Esse resultado reforça uma das hipóteses discutidas por Rosário (2011) de que as propriedades intrínsecas das partículas de aerossol de queimadas dependem do tipo de biomassa queimada e que, quando predomina a queima de gramínea ou vegetação de cerrado, o albedo simples resultante é menor. Entretanto, o processo de “escolha” do modelo óptico mais adequado foi baseado na diferença relativa entre observação e cálculo, havendo ainda a necessidade de se estabelecer um método robusto, mais adequado, para definir qual modelo óptico utilizar em cada caso. Segundo Rosário (2011), parece haver uma relação entre o conteúdo integrado de vapor d’água, diferentes cargas de aerossol na atmosfera, seu envelhecimento e os modelos ópticos, mas essa relação não pôde ser testada neste trabalho.

Os testes numéricos para a taxa de aquecimento radiativo na presença de aerossol de queimadas mostraram que tanto a abundância quanto a capacidade de absorção de radiação por parte dos aerossóis, assim como sua distribuição vertical na atmosfera contribuem para alterar o perfil da taxa de aquecimento radiativo da atmosfera. A sua presença pode contrabalançar o resfriamento induzido por emissão de radiação no espectro terrestre devido ao vapor d’água.

AGRADECIMENTOS

O experimento de campo realizado em Humaitá, AM, recebeu apoio do CNPq via Edital Universal, processo número 478301/2009-0 e da Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade de São Paulo via INCLINE. Agradecemos ao Sr. Eduardo F. Gomes, técnico do Laboratório de Radiação e Aerossóis Atmosféricos do Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG-USP e aos estudantes Domkarlyksom Mahamede, Raimundo Kinderé e Edimar das Graças Cruz da Universidade Federal do Amazonas, campus Humaitá, por auxiliarem nas atividades experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREAE, M. O. *et al.* Smoking rain clouds over the Amazon. *Science*, Washington DC, v. 303, p. 1337-1342, 2004.

FEARNSIDE, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates and Consequences. *Conservation Biology*, Washington DC, v. 19, p. 680-688, 2005.

GUEYMARD, C. A. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy*, Philadelphia, v. 76, p. 423-453, 2004.

GU, L. *et al.* Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Geophysical Research*, Malden, v. 107 n. D6, p. ACL 2-1 - ACL 2-23, 2002.

HARRISON, L.; MICHALSKY, J.; BERNDT, J. Automated multifilter rotating shadow-band radiometer: an instrument for optical depth and radiation measurements. *Applied Optics*, Washington DC, v. 33 n. 22, p. 5118-5125, 1994.

HOLBEN *et al.* AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, Philadelphia, v. 66 n.1, p. 1-16, 1998.

JACOBSON, M. Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature*, London, v. 409, p. 695-697, 2001.

JACOBSON, M. Z. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming. *Journal of Geophysical Research*, Malden, v. 107 n. D19, p. 4410, doi: 10.1029/2001JD001276, 2002.

MAYER, B.; KYLLING, A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations—description and examples of use. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Göttingen, v. 5, p. 1855–1877, 2005.

MERCADO *et al.* Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. *Nature*, London, v. 458, doi:10.1038/nature07949, 2009.

NIYOGI, D. C. *et al.* Direct observations of the effects of aerosol loading on net ecosystem CO₂ exchanges over different landscapes. *Geophysical Research Letters*, Malden, v. 31, L20506, doi: 10.1029/2004GL020915, 2004.

RODERICK *et al.* On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia*, Nova York, v. 129, p. 21-30, 2001.

ROSÁRIO, N. M. E., Estudo da Variabilidade das Propriedades Ópticas dos Aerossóis sobre a América do Sul e dos Impactos do Efeito Radiativo Direto das Partículas de Queimadas. 2011, 225 f. *Tese* (Doutorado em Ciências) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SEINFELD J. H.; PANDIS, S. N. *Atmospheric Chemistry and Physics – From Air Pollution to Climate Change*. 1st ed., New York: John Wiley & Sons, 1998.

SILVA, B. L. Estudo do efeito das partículas de aerossol emitidas por queimadas sobre a radiação solar incidente em superfície a partir de medições efetuadas na Reserva Biológica do Jaru. 2012, 101 f. *Dissertação* (Mestrado em Ciências) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

YAMASOE, M.A. Estudo da Composição Elementar e Iônica de Aerossóis Emitidos em Queimadas na Amazônia. 1994, 140 f. *Dissertação* (Mestrado em Ciências), Instituto de Física, Universidade de São Paulo, 1994.

YAMASOE *et al.* Chemical Composition of Aerosol Particles from Direct Emissions of Vegetation Fires in the Amazon Basin: Water-Soluble Species and Trace Elements. *Atmospheric Environment*, Philadelphia, v. 34, p. 1641-1653, 2000.

YAMASOE *et al.* Effect of Smoke on the Transmissivity of Photosynthetically Active Radiation Inside the Canopy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Göttingen, v. 6, p. 1645-1656, 2006.

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

A4a. A MUDANÇA DO CLIMA E SEUS IMPACTOS NO OCEANO ATLÂNTICO SUL EM ESCALA REGIONAL

JOSÉ EDSON PEREIRA¹, ILANA WAINER¹

I - INTRODUÇÃO

O sistema climático terrestre compreende cinco componentes - atmosfera, oceano, criosfera, litosfera e biosfera - que armazenam e trocam calor (energia) entre si. A compreensão envolvendo observações, equacionamento e o prognóstico das variáveis destes sistemas individualmente já se configura como enorme atividade científica, historicamente longa e complexa. As questões contemporâneas envolvendo as preocupações com as mudanças climáticas globais e a contribuição antrópica no seu acirramento tornaram a compreensão holística destas áreas da ciência de fundamental importância. A previsão acoplada do estado do sistema terrestre também implica em uma sólida fundamentação paleoclimática e no estabelecimento de uma hierarquia dos modelos numéricos que sejam capazes de reproduzir de maneira realista as interações entre estes sistemas em diferentes escalas.

A componente oceânica do Sistema Climático Terrestre é aquela que responde pela maior quantidade de energia armazenada. Isso acontece devido às propriedades físicas, tais como, a alta capacidade térmica da água em relação ao ar, e também devido à relação da massa oceânica total em relação à massa das demais componentes do clima planetário. Dessa forma os oceanos acoplados ao gelo marinho atuam como um capacitor, um "controlador" do clima. Entender e quantificar mecanismos e taxas de mudanças de suas propriedades implica em entender a variabilidade de mais baixa frequência deste sistema.

Os registros coletados durante o maior programa de observações para os oceanos, o *World Ocean Circulation Experiment* WOCE (Bower, Hunt, e

1. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, IOUSP.

Zenk 1999) demonstraram claramente que os oceanos estão constantemente mudando em escala climática global e induzindo mudanças mensuráveis em escala regional. As observações oceanográficas, mesmo ainda esparsas, em sua maior parte nas camadas superiores do oceano, e sem uniformidade espaço/temporal, tem revelado possíveis desvios climáticos em várias regiões do globo sugerindo forte interação entre escalas. Estas mudanças no oceano, já detectáveis em dados recentes (a partir da década de 1970), são processos que em escala geológica são conhecidos e comprovados por meio de medidas diretas ou indiretas (e.g. composições físico-químicas de amostras de gelo antártico, *ice-cores*). Um exemplo conhecido, de uma perspectiva temporal extensa (paleoclima), é a relação entre temperatura média terrestre e concentração de gases estufa, observável na Figura A4a.1. Tais resultados são essenciais para a compreensão das escalas temporais envolvidas no contexto de mudanças climáticas de origem antrópicas e sua participação nos processos climáticos “naturais” do planeta.

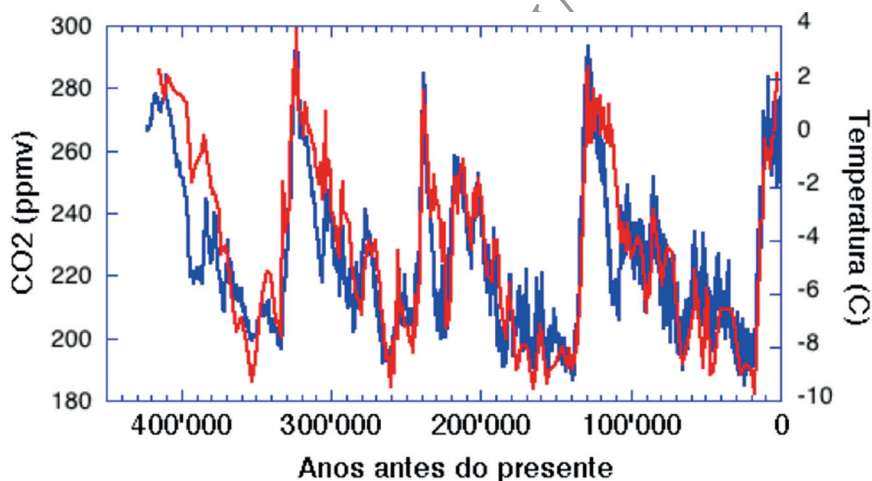


Figura A4a.1: Concentração de gás estufa (CO₂) e temperatura reconstruída em função do tempo – referência século XX. Adaptada do National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA, NODC site. <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/globalwarming/temperature-change.html>.

Recentemente, a composição dos ciclos naturais planetários em resposta ao rápido aumento da concentração dos gases estufa de origem antrópica na atmosfera (principalmente CO₂) já atingiu os níveis observados durante o Máximo Termal do Paleoceno-Eoceno –PETM (DUNKLEY JONES *et al.*, 2013; ZACHOS *et al.*, 2001, 2006), um dos períodos de maior mudança climática registrada no planeta (pelo menos o mais recente). Esse aumento explosivo, do ponto de vista da escala temporal geológica, e a separação dos processos naturais planetários e antrópicos são algumas das principais

questões relacionadas ao aquecimento global, bem como seu diagnóstico e reprodução por modelos numéricos.

I.1 – O PAPEL DO INTERGOVERNMENTAL PANEL FOR CLIMATE CHANGE - IPCC

Os cenários político/socioeconômicos possíveis em escala planetária são variáveis primárias de qualquer estudo científico relacionado a mudanças climáticas recentes. As prospecções destes cenários e consequente aumento dos níveis de emissão de gases estufa apontam para impactos significativos no clima médio terrestre com possíveis (e ainda desconhecidas) implicações em sua variabilidade regional de maior frequência. Tais mudanças são prospectadas por meio de modelos numéricos climáticos de cobertura global e complexamente acoplados (oceano, atmosfera, criosfera e litosfera).

Resultados e conclusões do IPCC-*Assesment Report 4* (AR4) (PARRY *et al.*, 2007) já demonstraram, de forma inequívoca, que as atividades humanas são as maiores responsáveis pela intensificação do aquecimento observado. Padrões de produção e consumo, associados à emissão de combustíveis fósseis, têm acarretado no acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera de forma acelerada durante os últimos 150 anos, com consequente aumento da temperatura média terrestre capturados pelos conjuntos de modelos/simulações climáticas do IPCC, resultados ilustrados na Figura A4a.2.

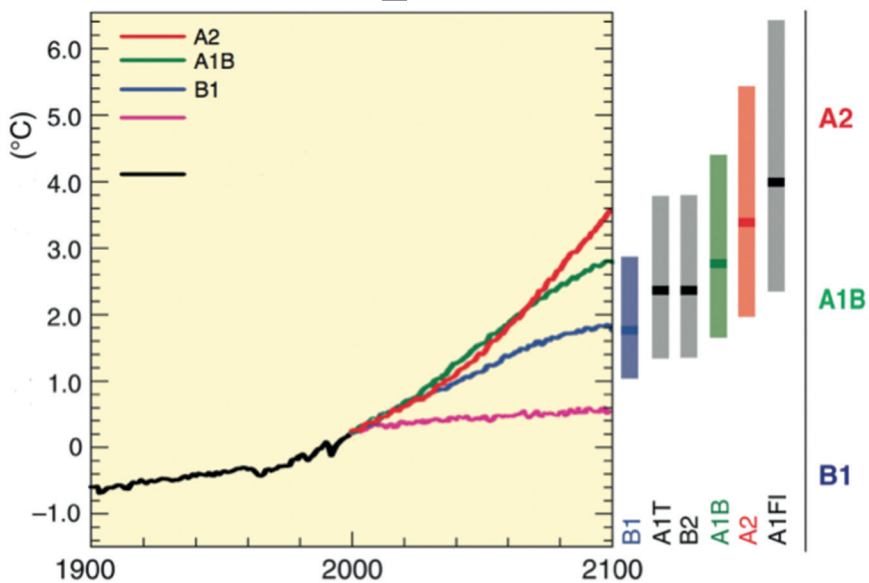


Figura A4a.2: Resultados das reanálises (projeções históricas - século XX) e projeções climáticas da temperatura média global via cenários do relatório AR4 do IPCC (CMiP3).

Os resultados apresentados na Figura A4a.2 têm origem de um esforço mundial de diversos grupos de pesquisa envolvidos com observações e modelos numéricos acoplados dos vários sistemas climáticos terrestres. A análise destes resultados e a consequente evolução do conhecimento geral dos padrões climáticos terrestres e dos comportamentos sociais e políticos das nações com maior contribuição dos gases estufa resultaram na normatização de novos experimentos e cenários (projeções climáticas) propostos em 2008 (Taylor, Stouffer, e Meehl 2012), conhecido como a quinta fase de inter-comparação de modelos acoplados (*Coupled Model Intercomparison Project* – CMIP5).

A título de ilustração, a definição destes cenários envolveu diversos outros organismos internacionais como: *World Climate Research Programme* (WCRP) e *International Geosphere–Biosphere Programme* (IGBP) que promoveram um novo conjunto e metodologia para os modelos CMIP5. A necessidade de coordenação destes experimentos não só provém das vertentes sócio/políticas das projeções climáticas, mas também da necessidade de se estabelecer uma base metodológica comum para todos os grupos de pesquisa de clima planetário.

Em seu terceiro relatório divulgado no ano de 2001, o IPCC estabeleceu cenários de desenvolvimento mundial que serviram como padrão nas forçantes utilizadas nos modelos climáticos consolidados (AR4) e aqui utilizados e atualmente já atualizados para reavaliação dos resultados e redefinição dos cenários antropogênicos para a quinta fase do relatório - AR5 (Mccarthy, Willett, e Mccarthy 2006; Moss *et al.* 2010).

A primeira etapa do *Assessment Report* desta quinta rodada (AR5) foi recentemente publicada (IPCC, 2013). Neste novo relatório, há uma revisão das projeções socioeconômicas e de gestão pública. Além, obviamente, do refinamento da física acoplada do sistema climático terrestre. Do ponto de vista numérico, há também experimentos com maior duração (projeções de 300 anos) conjugados ao aumento da resolução espacial dos modelos (além da inclusão de novas formulações para questões específicas). Um exemplo destes novos resultados está ilustrado na Figura A4a.3, na qual são mostrados os resultados da temperatura terrestre média para um modelo específico do IPCC, o *Community Earth System Model Version 1* CESM² (MEEHL *et al.*, 2013).

2. CESM é a versão atual do modelo climático do National Center for Atmospheric Research (NCAR)

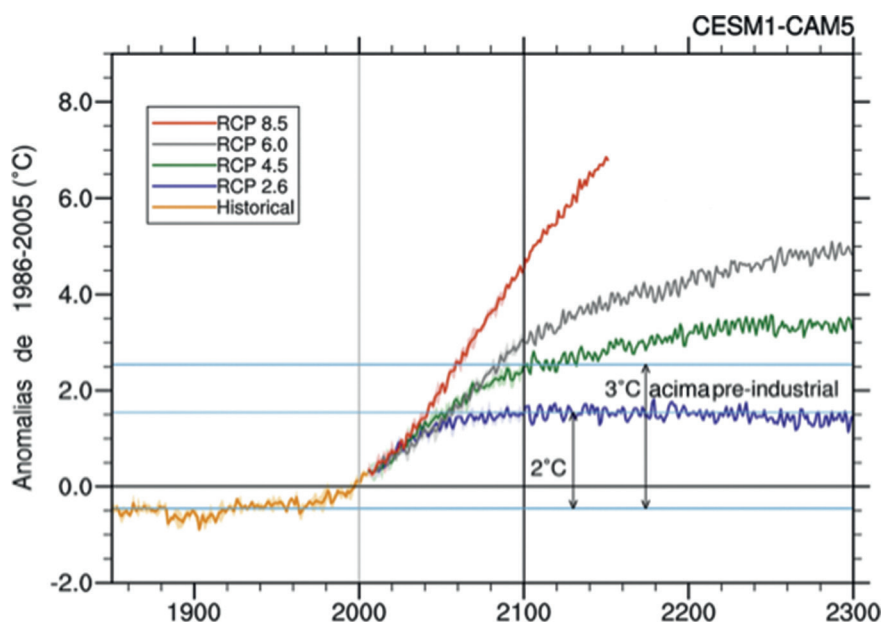


Figura A4a.3: Projeções climáticas do sistema CESM1_CAM1 para alguns cenários AR5, extraída de Meehl *et al.* (2013).

O presente estudo apresentado neste capítulo utiliza-se de resultados já regionalizados referentes ao AR4 (CMIP3) e em andamento para os resultados descritos no AR5 (CMIP5). As nomenclaturas e formulações dos cenários diferem bastante entre os relatórios AR4 e AR5, denominados *Special Reports on Emission Scenarios*– SRES para o AR4 e *Representative Concentration Pathway* – RCP para o AR5. Existem vários elementos e complexos acoplamentos considerados na definição desses cenários. Contudo, de forma simplificada, uma diferença básica entre os cenários apresentados no AR4 e os especificados no AR5 encontra-se na interferência política em termos de gestão para mitigação e adaptação (Taylor, Stouffer, e Meehl 2012). Na perspectiva de modelagem global observa-se a evolução dos GCMs para *Earth System Models* (ESM), que de forma geral podem ser definidos como a modelagem de um sistema vivo, com retroalimentação (*feedback*) e respostas internas do próprio sistema. A título de ilustração, as numerações dos cenários RCP referem-se ao nível de radiação atingido em 2100, em relação ao período pré-industrial.

Para análises regionais no Atlântico Sul, consideramos o cenário RCP4.5 o mais próximo das previsões originadas no IPCC-AR4 pessimista (A2), pela temperatura máxima atingida (em 2100) e pelo nível intermediário de intervenção política esperada. Segue abaixo uma breve descrição dos cenários considerados aqui como forçantes dos modelos regionalizados (*downscaling*):

- 20C3M – AR4: Simulação iniciada a partir do último ano de uma integração de controle que utiliza os dados oceânicos de temperatura e salinidade da climatologia *Levitus* (LEVITUS *et al.*, 2012) como condições iniciais. Já a componente atmosférica é inicializada com uma concentração fixa de gases estufa, representando a concentração do período pré-industrial (1870), 348 ppm e atinge 380 ppm. Essa simulação é rodada para um período de 100 anos (1761-1860). A simulação para o século XX (*Climate of the 20th Century experiment - 20C3M*) consiste de um esquema de 5 conjuntos (*ensembles* de modelos), na qual se utiliza a média para eliminar a dependência de condições iniciais e variabilidade interna (*drifts*). Cada rodada cobre o período que vai de 1850 até 2000. Os agentes forçantes nesse experimento incluem os registros históricos de gases estufa (CO₂, CH₄, N₂O e CFCs), sulfatos troposféricos, atividades vulcânicas e forçantes solares (YUKIMOTO, 2005). As concentrações desses gases nesse cenário são baseadas nos registros históricos de Hansen *et al.* (1998^a) e Hansen *et al.* (1998b). O propósito de analisar resultados para esse cenário é reproduzir da maneira mais realista possível o clima do início do século XX até o ano de 2000.
- SRESA2 (Pessimista) – AR4: “Utiliza o fim da rodada do cenário 20C3M como condição inicial” - (presente - 2100) tem ênfase na riqueza humana regional e no uso dos recursos sem preocupação com uso eficiente ou o uso de tecnologias limpas. A linha de história do cenário A2 descreve um mundo muito heterogêneo. O tema de fundo consiste na preservação e autossuficiência de identidades locais. Padrões de fertilidade entre diferentes regiões convergem pouco, resultando em um crescimento contínuo da população mundial. O desenvolvimento econômico é orientado principalmente de modo regional e o crescimento per capita e tecnológico é mais fragmentado e mais devagar que em outros cenários. Esse cenário atinge uma concentração de 870 ppm de gases estufa.
- SRESB1 (Otimista) – AR4: Representa um mundo globalizado, com ênfase na sustentabilidade do desenvolvimento global (desenvolvimento sustentável). O cenário B1 descreve um mundo convergente com a população global atingindo um pico no meio do século e perspectiva de declínio. Apresenta rápidas mudanças nas estruturas econômicas em direção a uma economia de serviços e informações, com reduções da intensidade material e a introdução de tecnologias limpas e eficientes no uso dos recursos. A ênfase está em soluções globais para a sustentabilidade econômica, social e ambiental, incluindo a melhoria da equidade, mas sem iniciativas climáticas adicionais. Esse cenário atinge pico de concentração de 550 ppm de gases estufa.
- RCP4.5 (Intermediário) – AR5: Este cenário é considerado como intermediário (*midrange*), com projeções partindo de 2006 até 2300.

Dos cenários pessimistas é o que se mantém dentro de expectativas de intervenção política mínima. Não apresenta aumentos explosivos da temperatura média do planeta, mas aponta para acomodação assintótica a partir de 2200. Apresenta um aumento de radiação de 4,5 W/m² para o ano de 2100 em relação ao período pré-industrial.

II - OCEANO ATLÂNTICO SUL

Os impactos ambientais da mudança do clima já estão sendo observados e são detectáveis através dos registros de temperaturas do ar e dos oceanos, da redução do gelo marinho, do derretimento generalizado das calotas polares e da elevação do nível global médio do mar. No entanto, a quantidade de sistemas (oceano, atmosfera, criosfera e ambientes terrestres), o volume de variáveis envolvidas (conhecidas ou não) e as medidas observacionais reduzidas, como as do programa WOCE já mencionadas para o oceano, possuem um histórico curto, menos de um século. Devido a isto há grande incertezas nas reconstruções (passado), reanálises (presente) e projeções (futuro) climáticas que permitam avaliar com precisão se mudanças no oceano contribuíram para mudanças climáticas no passado, ou como poderiam causar mudanças climáticas no futuro.

Uma característica marcante dos resultados obtidos com os modelos climáticos de larga escala (classe IPCC) é que muitos deles diagnosticam uma redução significativa da circulação termohalina (THC)³ no Oceano Atlântico provocando alteração (variabilidade) climática em escala global. Por outro lado, estes modelos tem resolução (espacial e temporal) relativamente baixa devido a necessidade de acoplamento entre as diversas áreas do conhecimento científico e suas variáveis, a necessidade de cobertura global em escalas temporais seculares e a complexidade dos acoplamentos (ainda não totalmente equacionados). Assim, nessa classe

3. O termo THC deriva do inglês "Thermo-Haline Circulation" que por sua vez é uma direta referência aos mecanismos forçantes de uma circulação global no oceano (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005) "*free-surface, terrain-following coordinate oceanic model. Due to mathematical feedback between the baroclinic momentum and tracer equations and, similarly, between the barotropic momentum and continuity equations, it is advantageous to treat both modes so that, after a time step for the momentum equation, the computed velocities participate immediately in the computation of tracers and continuity, and vice versa, rather than advancing all equations for one time step simultaneously. This leads to a new family of time-stepping algorithms that combine forward-backward feedback with the best known synchronous algorithms, allowing an increased time step due to the enhanced internal stability without sacrificing its accuracy. Based on these algorithms we design a split-explicit hydrodynamic kernel for a realistic oceanic model, which addresses multiple numerical issues associated with mode splitting. This kernel utilizes consistent temporal averaging of the barotropic mode via a specially designed filter function to guarantee both exact conservation and constancy preservation properties for tracers and yields more accurate*" (up to second-order, conhecida como Ocean Conveyor Belt). De forma simplificada, este fluxo termo-halino mantém-se com o afundamento de águas frias e Salinas nos polos e aquecimentos em regiões equatoriais. Para maiores detalhes, ver (BROECKER, 1991; RICHARDSON, 2008; TOGGWEILER, 1998)

de modelos (*Global Circulation Models* – GCM) a influência reversa dos fenômenos de menor escala (em geral associados a dissipação) na escala planetária não é quantificada diretamente, mas de forma parametrizada.

Nestas escalas espaciais menores as projeções climáticas globais têm suas limitações originais agravadas e, portanto, com pouca informação e de baixa precisão para uso prático, como em questões relacionadas a antecipação e mitigação de efeitos regionais das mudanças climáticas. Estas limitações são progressivamente agravadas à medida que se reduz a escala espacial e temporal do foco do estudo, na chamada larga-escala. Mesmo assim, as tendências de aumento global da temperatura podem ser observadas em escalas regionais, como é o caso da região Oeste do Atlântico Sul, um dos principais focos de análise neste capítulo. Alguns resultados históricos e de projeções climáticas da temperatura média da superfície do oceano (TSM) nessa área são apresentados na Figura A4a.4.

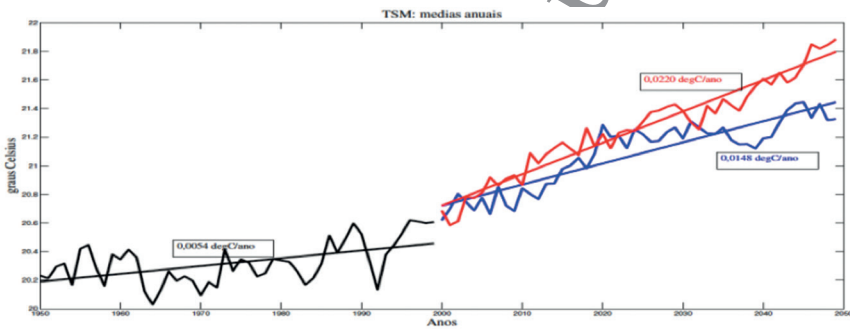


Figura A4a.4: Tendência da TSM no Atlântico Sul. Resultados originários das projeções climáticas CCSM3 (IPCC-AR4). Em preto, resultados históricos e em azul (vermelho) projeções climáticas do cenário B1 (A2).

A discussão anterior trata de mostrar as relações diretas existentes entre os estudos de em escalas globais no oceano com as questões essenciais da ciência da Terra, no que se refere ao clima terrestre e suas variabilidades. De um ponto de vista mais objetivo trata-se simplesmente de uma análise de escala. Portanto, o objetivo central aqui proposto é a apresentação de resultados recentes obtidos através de análises diretas dos modelos globais (GCM-classe IPCC) e da regionalização destes mesmos resultados (via modelos numéricos específicos) visando aumentar sua aplicabilidade em situações e cenários que envolvam futuros planejamentos e mitigações das mudanças climáticas do planeta.

III - REGIONALIZAÇÃO CLIMÁTICA NO OCEANO (*DOWNSCALING*)

Os impactos climáticos globais decorrentes de alterações de equilíbrios regionais no oceano são conhecidamente relevantes. Entretanto, para dimensionamento destes fenômenos em relação aos padrões climáticos regionais, transpondo-os para a meso e pequena escala, há necessidade da regionalização numérica do problema, questão esta aqui tratada para o Atlântico Sul e ilustrada já com resultados na Figura A4a.5. Nesta figura estão compostos os resultados para período específico (snapshot) do campo de corrente da reanálise SODA (CARTON; GIESE, 2005) e no mesmo instante sobreposto ao campo de corrente regionalizado com o Regional Ocean Model System – ROMS (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005), denominado aqui domínio SAC, proveniente de uma implementação versão 19c, atualmente de uso interno ao grupo de pesquisa OC2 do Instituto Oceanográfico -USP.

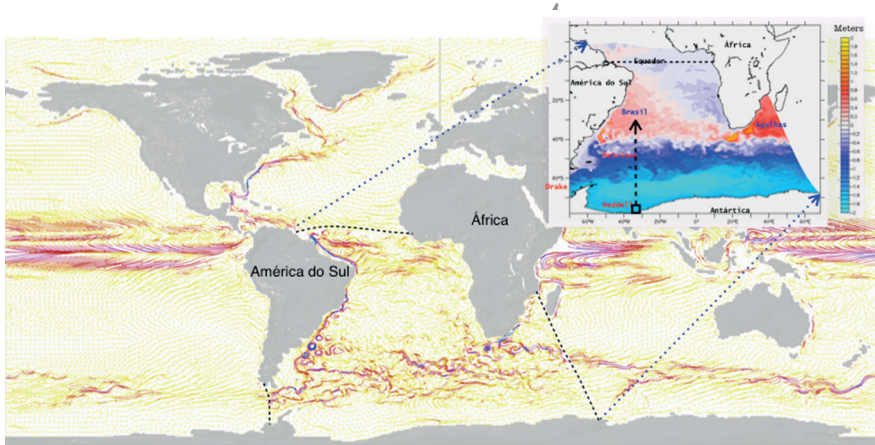


Figura A4a.5: Linhas de corrente (SODA) com sobreposição do modelo regionalizado. Detalhe mostra snapshot da elevação (SSH) e detalhes do domínio SAC em uso. Seta é referência para perfil vertical da densidade.

Este tipo de investigação numérica ao longo da costa oeste do Atlântico Sul, traz consigo fatores complexos e de difícil separação, como: os padrões de circulação em regiões polares (e.g. formação de águas profundas na região de Weddell, propagação para norte), de contorno leste, como o aporte de calor e energia potencial da corrente das Agulhas; de oeste como o fluxo da Corrente Circumpolar Antártica (aqui referida como ACC, em inglês, *Antarctic Circumpolar Current*) em Drake; e, de Norte, com os fluxos de balanço de calor, água doce e momento do hemisfério norte.

Seguindo a mesma sequência de escalas climáticas e suas inter-relações discutidas na introdução, as análises de resultados dos modelos globais para dois cenários IPCC, centrados na região oeste do Atlântico Sul e sua respectiva regionalização (*downscaling*) são apresentados neste capítulo, item IV. Esta metodologia é uma ferramenta tanto de análise dos resultados globais quanto de diagnóstico climático regional, já que reproduz cenários (tipo-IPCC nas bordas) de alta resolução.

Além disso, esta metodologia permite também o rastreamento e entendimento de feições oceânicas particulares e suas variabilidades intrínsecas relacionadas às mudanças climáticas introduzidas como forçantes do sistema, conforme ilustrado na sequência de figuras a seguir. A complementaridade entre as escalas global-regional-local e a comparação (quando possível) com observações se torna essencial para entendimento de processos regionais. Para ilustrar os efeitos da regionalização na região Oeste do Atlântico Sul (OAS), o mesmo instante do campo de correntes superficiais é apresentado na Figura A4a.6, conforme especificações das legendas, já permitindo observar-se as diferenças dinâmicas (principalmente no nível de turbulência) em meso e pequena escala.

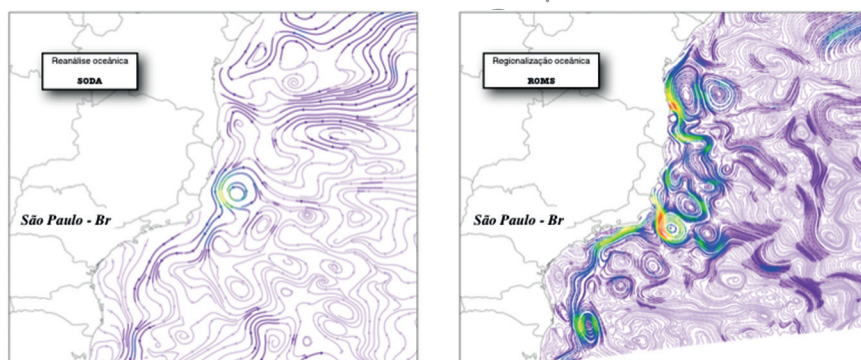


Figura A4a.6: Linhas de corrente (maior intensidade para vermelho) para o mesmo instante na reanálise (SODA) e no modelo regional (SAC19c).

Os resultados regionalizados são também críticos em áreas turbulentas de alto conteúdo energético (energia interna, potencial e cinética). Nas Figuras A4a.7 (a,b) estes resultados são ilustrados para a região da Confluência Brasil-Malvinas e corrente das Agulhas. A resolução espacial e temporal do domínio usado (19c) foi calculada como um compromisso entre a resolução da mesoescala (*eddy resolving*) e performance numérica para integrações climáticas longas (seculares).

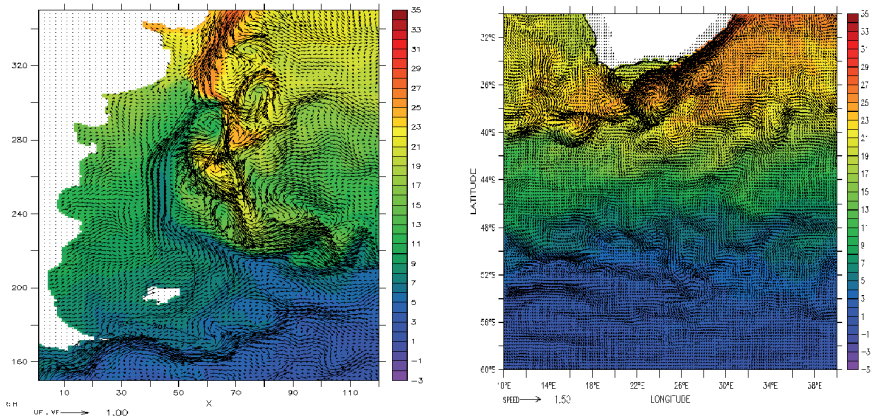


Figura A4a.7: (a) Corrente e temperatura para Confluência Brasil e Malvinas e (b) Corrente e temperatura para Agulhas e Circumpolar Antártica (ACC)

Para consistência física e estabilidade climática do modelo, a formulação numérica usada incluiu o acoplamento a um modelo de gelo marinho (*sea-ice*). O acoplamento dos modelos oceânico e gelo marinho são absolutamente indispensáveis para uma representação física precisa do oceano em altas latitudes. Além da manutenção de termodinâmica da água líquida, os resultados aqui apresentados também ilustram a formação da Água de Fundo Antártica (ABW – *Antarctic Bottom Water*) na região do Mar de Weddell. Observa-se claramente, na evolução temporal deste padrão (aqui ilustrado em um *“snapshot”*), a subsidência de água fria e densa, conforme esperado nessa região (Figura A4a.8).

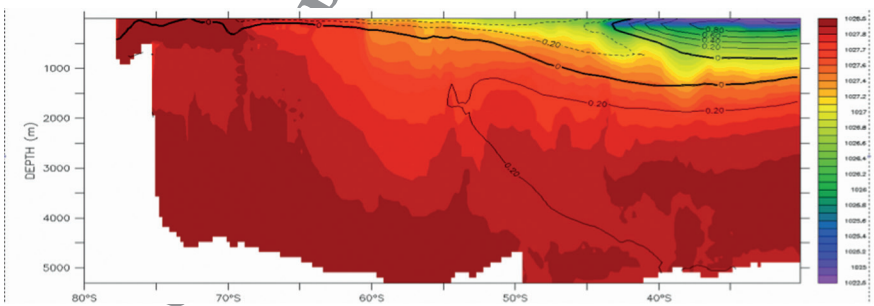


Figura A4a.8: Perfil vertical de densidade, partindo de Weddell (para norte). Ver detalhe na Figura A4a.5 (seta).

IV - SÉCULOS XX E XXI – ANÁLISES NA REGIÃO OAS

A região Oeste do Atlântico Sul (OAS) tem relevante importância socioeconômica para o Brasil, já que trata-se da área de alta densidade populacional, grande concentração industrial e área de extrativismo oceânico (pesca e principalmente petróleo) em oceano aberto. A relevância da área do ponto de vista do transporte de massa é relativamente baixa no Atlântico Sul, embora assuma maior importância no transporte de calor.

A análise dos impactos climáticos, via modelo regionalizado, nesta área apresenta resultados curiosos, como pode ser notado nas figuras A4a.9 e A4a.10. A Figura A4a.9 tem como objetivo estabelecer as bases de comparação entre os resultados da reanálise (SODA), do GCM histórico (20C3M) e o modelo regionalizado (ROMS) usando como condição inicial e bordas os modelos GCMs respectivos. Em ambas as regionalizações, notam-se claramente a separação entre os padrões de circulação oceânicos e costeiros, devido a maior resolução espacial e consequente definição do talude continental. Há nesta comparação intenção de validação do modelo regional (SAC) na área, estabelecendo-se na média qual o nível de similaridade (realismo no caso do SODA) se obtém com estas simulações regionalizadas.

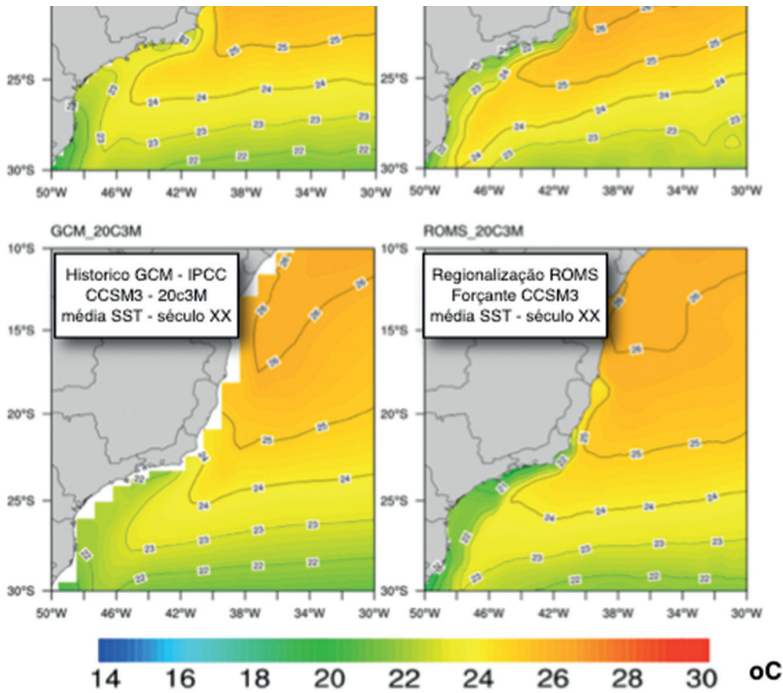


Figura A4a.9: TSM média para os modelos GCM (coluna da esquerda) e as respectivas regionalizações (downscaling) via ROMS, modelo SAC (detalhe na figura A4a.5).

O mesmo esquema de comparações é apresentado na Figura A4a.10 agora considerando-se como inicialização os modelos GCM histórico (20C3M), projeção climática para o cenário B1 (otimista) – AR4 e A2 (pessimista). Nessa figura, na linha superior, estão os campos médios dos modelos globais (GCMs, média de 30 anos). Ainda considerando os modelos globais é possível visualizar os efeitos do acirramento dos cenários no aumento da TSM entre 2030-2050 (século XXI).

Na linha inferior da Figura A4a.10 estão os equivalentes resultados (inicializados pelos modelos acima), para o modelo regionalizado (SAC). Em oceano aberto, os resultados regionalizados apresentam maior alteração do campo médio da TSM com as projeções climáticas e simultaneamente maior resfriamento da região costeira (plataformas continentais de Campos e Santos). Isto deve-se essencialmente ao aumento do grau de turbulência representada pelo modelo regional (SAC).

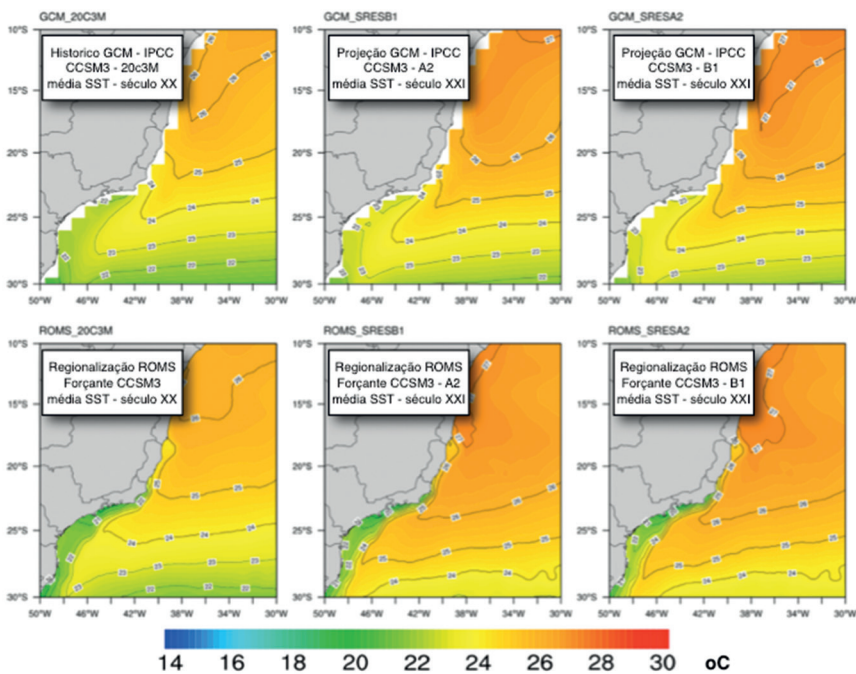


Figura A4a.10: TSM média para as projeções climáticas 2020-2050 (GCM linha superior) e as respectivas projeções climáticas regionalizadas no mesmo período - *downscaling* (SAC, detalhe na figura A4a.5).

Os padrões espaciais da tendência da reanálise (SODA), GCM histórico (20C3M), projeções climáticas (SRESA2 e SRESB1) e os respectivos resultados regionalizados são apresentados nas Figuras A4a.11 e A4a.12. Na Figura A4a.11 as tendências da reanálise SODA e o modelo regionalizado

são apresentados entre 1970-1999, visando validação do modelo regional em regiões oceânicas. Neste caso nota-se a contribuição da meso-pequena escala e efeitos batimétricos, como os efeitos do Parcel de Abrolhos no modelo regional. Em oceano aberto, como a reanálise pressupõe assimilação de dados observados, há alta consistência espacial entre os campos.

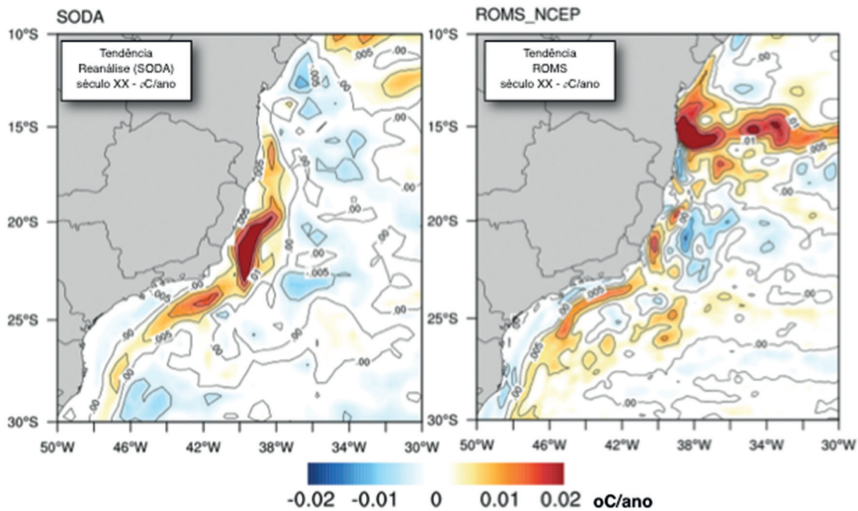


Figura A4a.11: Tendência entre 1970-1999 para a reanálise e o modelo regional, região OAS.

Na Figura A4a.12 estão os resultados da distribuição espacial das tendências para os GCMs histórico (século 20) e projeções climáticas (2020-2050). Neste caso, embora mantendo-se os gradientes médios e coerência de sinais na distribuição espacial, há evidente diferenças entre os resultados dos GCMs (CCSM3) e os resultados regionalizados (SAC). O sinal de temperatura da Corrente do Brasil, praticamente inexistente nos cenários globais, apresenta tendência de resfriamento, fato este ainda por ser confirmado nas projeções climáticas em andamento para os resultados do AR5, no caso usando o cenário RCP4.5 do modelo CESM1_CAM5. Em região oceânica a consistência média entre os resultados GCM e regionais é maior, como esperado, mas novamente havendo clara predominância da mesoescala na definição destas tendências.

Reduzindo-se ainda mais a escala da análise não há mais sentido em comparações com modelos GCMs, que pouco ou em alguns casos sequer reproduz padrões regionais (como a Corrente do Brasil). Exatamente sobre a Corrente do Brasil (Figura A4a.13), nota-se que há pouca variação na intensidade média da corrente com a mudança de cenários forçantes, mesmo nos cenários mais drásticos (A2-pessimista), apesar da tendência ao resfriamento já observada. Entretanto, os eventos transientes de

meso e pequena escala passam a atuar de forma mais efetiva (tempo de permanência e extremos maiores), gerando espalhamento (observado na frequência de ocorrência).

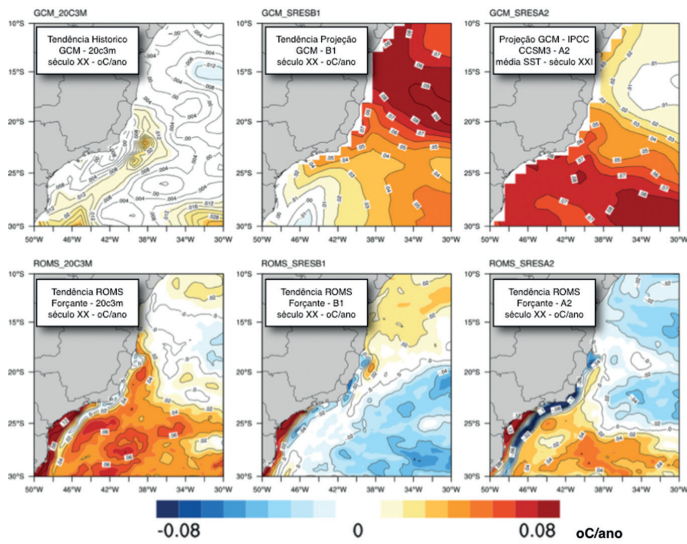


Figura A4a.12: Tendência entre [2020-2050] dos GCM (acima) e modelo regional (abaixo).

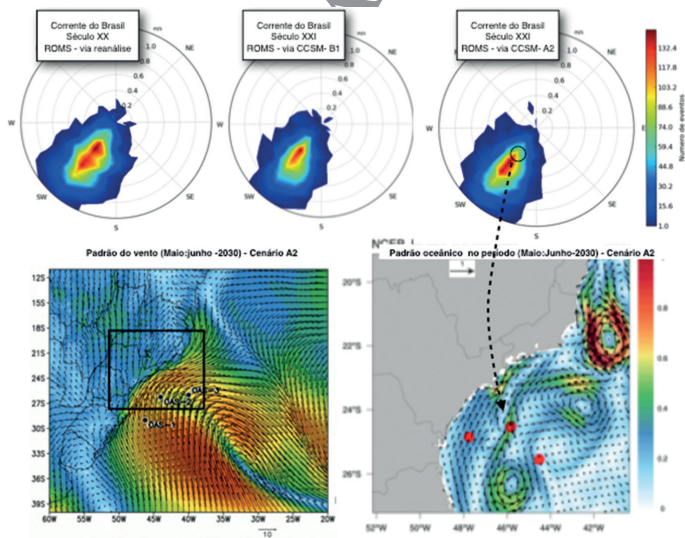


Figura A4a.13: Acima: histogramas direcionais na Corrente do Brasil reproduzida pelo modelo regionalizado (*downscaling*), histórico, e projeções climáticas B1 e A2. Abaixo: caso específico ilustrando o campo de vento (em evento extremo, cenário A2 – frente) e o respectivo reflexo no campo de corrente superficiais (01-jun-2030).

Para se investigar detalhes em pequena escala temporal, nesta mesma Figura A4a.13, aponta-se um destes casos onde um extremo de duração e intensidade do evento para o cenário A2 gerou respostas significativas e imediatas no oceano, descontinuando a corrente do Brasil em vórtices estacionários. Como efeito nas camadas superficiais do modelo oceânico, nota-se a formação de vórtices de longa duração no ponto (ordem de semanas), correntes costeiras para nordeste (NE) e a desintensificação da Corrente do Brasil. Isoladamente, tais fenômenos são de pequena escala, detectáveis apenas em modelos de alta resolução tendo significativa importância regional, entretanto em curta janela temporal, portanto, importante se agregado a uma previsão de tempo.

Entretanto, em termos climáticos o aumento da frequência de ocorrência destes eventos pode gerar um feedback de maiores escalas, já que afeta o transporte de calor e equilíbrio de sistemas maiores como a confluência Brasil-Malvinas, em decorrência da redução do transporte de massa para Sul.

V - CONCLUSÃO

Em sentido reverso aos resultados apresentados, ou seja, da menor escala espacial (e temporal) até escalas globais, a principal conclusão que permeia este estudo é sobre a metodologia de regionalização (*downscaling*) que se mostra efetiva, tanto para análises diagnósticas e de verificação dos resultados das simulações climáticas globais quanto para o entendimento dos processos subjacentes (e parametrizados) nos modelos tipo GCM.

Quanto às projeções climáticas (analisadas entre 2020-2050), pouca alteração há internamente entre os cenários e cada cenário e sua referência histórica. No entanto a regionalização (*downscaling*) destes cenários mostra uma realidade completamente diferente. Os padrões médios são reproduzidos com precisão, mas mostram-se completamente diversos, quando observados em situações transientes ou focalizados em fenômenos de menor escala.

Embora mantendo as restrições dos modelos globais (e.g. tendências, variabilidades decadais) as respostas de mesoescala (no oceano e atmosfera) e sub-mesoescala são evidentes para a região Oeste do Atlântico Sul (OAS), especificamente para a Corrente do Brasil e seus mecanismos de sustentação e variabilidade infra-anuais.

Saindo da análise do comportamento geral, que no oceano reflete-se na intensificação dos padrões médios da Corrente do Brasil, nota-se que os casos extremos (meteorológicos) têm direta influência nos padrões instantâneos da Corrente do Brasil, especificamente na intensidade e

duração de reversões do fluxo de superfície (para NE), separação clara entre os fluxos da Baía de Campos e Santos, formação e propagação de vórtices.

Estas estruturas estão diretamente relacionadas a mudanças nos padrões de propagação e permanência de energia na atmosfera para norte (e.g. frentes frias). Investigar quais os reflexos destas estruturas no clima regional e o seu realismo ainda dependem de refinamentos nos experimentos, principalmente nos modelos globais usados, já que pequenas alterações no equilíbrio global de fluxos podem alterar este tipo de resposta.

Em termos numéricos observa-se que, além das variabilidade anual e sazonal que são esperadas devido aos fluxos de superfície, o modelo oceânico de alta-resolução é capaz de capturar sinais de baixíssima frequência (no caso variabilidades decadais e tendências) observadas nos modelos GCM relacionados. Tal comportamento é para o modelo regional mérito de suas formulações de contorno aberto e indica o grau de precisão que pode ser atingido com regionalizações.

Por outro lado, este mesma qualidade aponta para o óbvio: qualquer desbalanço ou imprecisão dos cenários globais (IPCC) e suas projeções climáticas estarão necessariamente presentes nos resultados regionalizados. Alguma margem de melhoria há, já que a física da baía associada à melhora na resolução permite que o modelo regional elimine (via radiação) forçantes espúrias. Mas certamente irá reproduzir os padrões médios de tendências incluídos em sua borda.

Portanto, a revisão dos cenários para gases estufa, o incremento das resoluções, inclusão de física de nuvens entre outras questões relevantes nas novas versões dos modelos (AR5) permitirão maior acuraria e redução de margens de erro nestas simulações regionais. Embora energeticamente insignificantes se isoladas e comparadas com mudanças em escala global, se compostas tem potencial para retroagir como dissipação de feições de larga escala, como já demonstrado em (Garzoli e Matano 2011).

Uma questão relevante apontada nestes resultados seria o impacto no clima regional destes mesmos fenômenos de meso-pequena escala identificados, nas simulações regionalizadas para os cenários climáticos projetados (B1 e A2). Por exemplo, alterando-se padrões relativamente constantes, como é a Corrente do Brasil, quais os impactos em questões ligadas a navegação costeira e/ou exploração de petróleo offshore. Em maior escala espacial e temporal, quais os efeitos regionais no equilíbrio norte-sul no transporte de calor e a relação destas mudanças com o clima terrestre regional. Estas questões, dentre outros tópicos de pesquisa mencionados ao longo deste texto, são o propósito deste capítulo. Ou seja, apontar para questões metodológicas em estudos climáticos regionalizados, de forma a ilustrar sua importância local e quais seriam possível influências em escala regional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOWER, A. S.; HUNT, H. D.; ZENK, W. Number 34 ISSN 1029-1725 March 1999 IN THIS ISSUE. WOCE, n. 34, p. 23–27, 1999.

BROECKER, W. S. The Great Ocean Conveyor. In: *Oceanography*, [s.l.: s.n.], v. 4.

CARTON, J. A.; GIESE, B. S. SODA : A Reanalysis of Ocean Climate. *Journal of Geophysical Research*, p. 1–32, 2005.

DUNKLEY JONES, T. *et al.* Climate model and proxy data constraints on ocean warming across the Paleocene–Eocene Thermal Maximum. *Earth-Science Reviews*, v. 125, p. 123–145, out. 2013.

GARZOLI, S. L.; MATANO, R. The South Atlantic and the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, v. 58, n. 17-18, p. 1837–1847, set. 2011.

HANSEN, J. *et al.* A common-sense climate index: Is climate changing noticeably? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 95, n. April, p. 4113–4120, 1998a.

HANSEN, J. E. *et al.* Perspective Climate forcings in the Industrial era. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 95, n. October, p. 12753–12758, 1998b.

IPCC, I. P. ON C. C. CLIMATE CHANGE 2013. *The Physical Science Basis*. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGI_AR5_SPM_brochure.pdf>.

LEVITUS, S. *et al.* World ocean heat content and thermosteric sea level change (0-2000 m), 1955-2010. I, v. 39, n. 10, p. n/a–n/a, 17 maio 2012.

MCCARTHY, M. P.; WILLET, K.; MCCARTHY, M. Report on estimates of observational uncertainty in surface humidity and free-atmosphere temperature and humidity data. *East*, n. February, 2006.

MEEHL, G. A. *et al.* Climate change projections in CESM1(CAM5) compared to CCSM4. *Journal of Climate*, v. 1, p. 130306100525002, 6 mar. 2013.

MOSS, R. H. *et al.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, v. 463, n. 7282, p. 747–756, 2010.

PARRY, M. *et al.* *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [s.l.: s.n.].

RICHARDSON, P. On the history of meridional overturning circulation schematic diagrams. *Progress In Oceanography*, v. 76, n. 4, p. 466–486, mar. 2008.

SHCHEPETKIN, A.; MCWILLIAMS, J. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, v. 9, n. 4, p. 347–404, 2005.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, n. 4, p. 485–498, abr. 2012.

TOGGWEILER, J. R. The Ocean's Overturning Circulation. *Science Today*, 1998.

YUKIMOTO, S. Interdecadal Arctic Oscillation in twentieth century climate simulations viewed as internal variability and response to external forcing. *Geophysical Research Letters*, v. 32, n. 3, p. L03707, 2005.

ZACHOS, J. *et al.* Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science* (New York, N.Y.), v. 292, n. 5517, p. 686–93, 27 abr. 2001.

ZACHOS, J. C. *et al.* Extreme warming of mid-latitude coastal ocean during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum: Inferences from TEX86 and isotope data. *Geology*, v. 34, n. 9, p. 737, 2006.

ARQUIVO PARA ACESSO

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

A4b. INTER-RELAÇÕES ENTRE O ATLÂNTICO SUL, PLATAFORMA CONTINENTAL E REGIÕES COSTEIRAS DO SUL E SUDESTE DO BRASIL

EDMO JOSÉ DIAS CAMPOS¹, CARLOS AUGUSTO DE SAMPAIO FRANÇA¹, REGINA RODRIGUES RODRIGUES², JOSÉ HENRIQUE MUELBERT³

Resumo: A região costeira do Brasil desde o Banco dos Abrolhos até a fronteira com o Uruguai é parte integrante do limite oeste do Giro Subtropical do Atlântico Sul e, conseqüentemente, impactada pela circulação oceânica global. Possíveis alterações na circulação oceânica em grande escala decorrentes de mudanças do clima da Terra podem resultar em impactos significativos na região oceânica ao largo do litoral brasileiro, afetando a temperatura, a salinidade e o conteúdo de calor na camada superior do oceano. Mudanças nessas propriedades físicas implicam em alterações no clima local, com impactos no ciclo hidrológico e no regime de descargas fluviais para a região costeira. Alterações do clima regional, associadas com mudanças na dinâmica da Corrente do Brasil e nos regimes de vento e ondas, podem afetar a hidrodinâmica costeira e os sistemas de ressurgência, com impactos significativos no ecossistema e nos ciclos biogeoquímicos na plataforma continental. Essas inter-relações entre o Atlântico Sul e o litoral brasileiro têm sido um dos objetivos das pesquisas desenvolvidas pelo Incline, através do desenvolvimento e instalação de plataformas de observação e do uso de modelos numéricos oceânicos. Um dos primeiros resultados da atividade de observação oceanográfica foi o fundeio, em Abril de 2013, de um sistema de observação (boia Atlas-B) similar aos utilizados na redes de observação TAO, no Pacífico, e PIRATA, no Atlântico Tropical. Paralelamente, estudo de modelagem numérica sugere possíveis alterações na temperatura e salinidade da superfície do mar na região de fundeio da Atlas-B. Incidentalmente, essa é a mesma região onde em 2004 se formou o furacão Catarina.

1. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, IOUSP.

2. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC.

3. Instituto de Oceanografia da Universidade Federal do Rio Grande, IO-FURG.

1. INTRODUÇÃO: O GIRO SUB-TROPICAL DO ATLÂNTICO SUL

Em uma criteriosa análise de estudos baseados apenas em observações, o Capítulo 3 do quinto relatório de avaliação do clima do IPCC (*Chapter 3: Observations: Ocean, IPCC AR5, Rhein, Rintoul et al., 2013*) conclui que há fortes evidências de que propriedades oceânicas de relevância para o clima mudaram durante os últimos quarenta anos. De acordo com esse levantamento, é virtualmente certo que o oceano está se aquecendo em diferentes regiões, profundidades e períodos de tempo. Esse aquecimento, porém, não se distribui uniformemente em todas as regiões do oceano e nem é constante no tempo. O Atlântico Sul, incluindo o Oceano Austral, é uma região que vem apresentando sinais de mudanças significativas em resposta ao aquecimento do planeta.

Em resposta ao aquecimento global e o consequente recuo da cobertura de gelo marinho (e.g.: Knorr e Lohmann, 2003), o aquecimento gradual do Oceano Austral pode induzir uma intensificação abrupta da circulação termohalina no Atlântico. Essa intensificação seria deflagrada pelo aumento do transporte de massa para o Atlântico Sul através das rotas “quente” (águas do Oceano Índico adentrando o Atlântico via o “vazamento das Agulhas”) e “fria” (águas do Pacífico transportada pela Corrente Circumpolar Antártica) (Fig. A4b.1). Mais recentemente, Steigl *et al.* (2009) confirmam um aumento significativo na temperatura do continente Antártico. Segundo esses autores, o aquecimento estende-se bem além da Península Antártica, cobrindo uma extensa área da Antártida Ocidental. Ainda segundo esse estudo, a taxa de aquecimento nessa região excede 0.1°C por década, durante os últimos 50 anos, e é mais forte durante o inverno e a primavera. Muito embora isso seja parcialmente compensado pela tendência de esfriamento no leste da Antártida durante o outono, a média continental da temperatura próxima à superfície apresenta uma tendência positiva. É bastante provável que esse aquecimento seja seguido por derretimento de gelo e, conseqüentemente, mudanças na contribuição da “rota fria” para a Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (CRM).

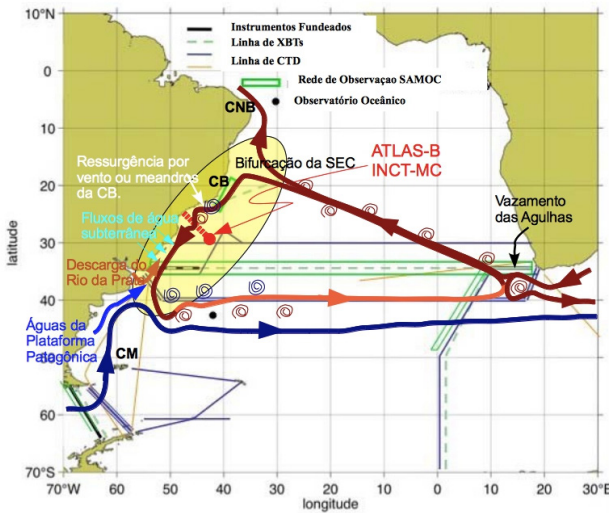


Figura A4b.1: Representação esquemática do Giro Sub-Tropical do Atlântico Sul sua relação com as áreas adjacentes ao litoral brasileiro. Essa figura mostra também algumas atividades de pesquisa sendo realizadas como importante contribuição do NAP INCLINE, no contexto dos Projetos SANSO, SAMOC, INCT-MC e INCT-Mar-COI.

Na “rota quente”, estudos realizados por Biastoch *et al.* (2008a, 2008b, 2009) mostram que o aporte de águas do Oceano Índico através dos anéis e filamentos na região de retroflexão da Corrente das Agulhas (processo comumente referido como o “vazamento das Agulhas”) tem aumentado durante as últimas décadas, em decorrência do deslocamento para sul dos ventos de oeste sobre o Atlântico Sul. Com base em medidas históricas e resultados de experimentos numéricos, Biastoch *et al.* (2009), mostram que essas águas adicionais do Índico estão contribuindo para o fortalecimento do giro subtropical do Atlântico Sul.

2. IMPACTOS SOBRE REGIÕES PRÓXIMAS AO LITORAL BRASILEIRO

Conforme mostra esquematicamente a Fig. A4b.1, a mistura de águas injetadas no Atlântico Sul pelas rotas quente e fria é transportada para noroeste, no giro subtropical, pela Corrente Sul-Equatorial (CSE). Essa corrente bifurca próximo à costa do Brasil, ao norte da Cadeia Vitória-Trindade, dando origem à Corrente Norte do Brasil (CNB) e Corrente do Brasil (CB). Essa última, resultante do ramo sul da bifurcação da CSE, flui ao longo da quebra da plataforma continental sudeste e o sul do Brasil até a confluência Brasil-Malvinas (~38-40°S), onde é desviada para leste, em direção à África. Ao largo da costa brasileira, a CB apresenta uma trajetória meandrante, o que induz a ocorrência de ressurgência de quebra-de-plataforma e a uma intensa troca de água e propriedades físicas, químicas e biológicas entre a plataforma continental e as regiões oceânicas adjacentes (Campos *et al.*, 1995, 2000; Vaz *et al.*, 2007). O fortalecimento do giro subtropical, conforme sugerido por Biastoch *et al.* (2009), pode levar a alterações na CB, mudanças na temperatura da superfície do mar

(TSM), na salinidade da superfície do mar (SSM) e no conteúdo de calor da camada superior em toda a região do Atlântico sul ao largo do sul e sudeste do Brasil. Dessa forma, é de se esperar que alterações na intensidade do giro subtropical poderão modificar a CB, com reflexos importantes em toda uma sequência de processos de meso e pequena escalas ao largo de todo o litoral brasileiro banhado por essa corrente de contorno oeste. De fato, estudos recentes confirmam o fortalecimento do giro subtropical (Lumpkin e Garzoli, 2011) e um aquecimento e aumento da salinidade da camada de mistura no sudoeste do Atlântico Sul (e.g.: Curry e Mauritzen, 2005; Sato e Polito, 2008).

Ao sul do Banco dos Abrolhos, principalmente no Embaiamento de Santos, o meandramento da CB intensifica o fenômeno da ressurgência de quebra de plataforma, mecanismo fundamental na manutenção da produção primária e na troca de propriedades entre as águas costeiras e do oceano profundo (Campos *et al.*, 1995, 2000). Possíveis mudanças na dinâmica da CB, na sua composição de massas de água e nos seus padrões de circulação terão certamente impactos significativos no clima local, nos regimes de ressurgência, nas atividades pesqueiras e nos ciclos hidrológico e biogeoquímicos na zona costeira.

3. EFEITOS ACOPLADOS OCEANO-ATMOSFERA

Muito embora as anomalias de TSM no Setor Oeste do Atlântico Sul (SOAS) estejam associadas com anomalias da circulação atmosférica e de precipitação sobre a região continental adjacente, uma parte importante da variabilidade inter-anual do clima na América do Sul está associada com o fenômeno ENSO (*El Niño-Southern Oscillation*). Eventos extremos nas regiões costeiras no Nordeste, Sudeste e Sul do Brasil, tais como chuvas torrenciais, enchentes, deslizamentos de encostas, assim como secas, acontecem em anos de El Niño ou de La Niña. O ENSO não afeta essas regiões apenas de forma direta, através da tele-conexão atmosférica. Conforme mostra Rodrigues *et al* (2011, 2015), o efeito do ENSO está também presente através de mudanças nas anomalias de TSM no Atlântico Tropical e Sul. Mudanças na TSM da região oeste do giro subtropical irão, conseqüentemente, afetar a forma como o El Niño impacta toda a América do Sul.

Os eventos enchentes de verão e deslizamentos no sul e sudeste do Brasil estão associados com o posicionamento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Essa posição está associada com as anomalias de TSM no SOAS. Rodrigues *et al.* (2011, 2015) mostram El Niños tipo Modoki (aquecimento anômalo da zona central do Pacífico Equatorial) geram uma fase negativa do Dipolo do Atlântico Sul, que é caracterizado por anomalias de TSM de sinais opostos ao norte e sul de uma linha nodal estendendo-se

aproximadamente ao longo de 30°S (Venegas *et al.*, 1997; Sterl e Hazeleger, 2003; Haarsma *et al.*, 2005). A fase negativa desse dipolo é caracterizada por anomalias quentes ao norte (no Atlântico Tropical) e anomalias frias na parte sul (região subtropical). Já a fase positiva, que está associada a anomalias quentes na parte sul, parece estar ligada a forte manifestação da ZCAS, resultando em chuvas torrenciais para a região costeira no Sudeste e parte do Sul do Brasil. Um exemplo de forte ZCAS foi o verão de 2010-2011 que causou deslizamentos resultando na morte de mais de 1000 pessoas entre Santa Catarina e o Espírito Santo, mas principalmente na região serrana do Rio de Janeiro. Se o deslocamento para sul dos ventos de oeste tem causado o aquecimento e salinização no sudoeste do Atlântico Sul, através da intensificação do giro subtropical, é de se esperar que as mudanças nas anomalias de TSM irão afetar, ou retro-alimentar, a circulação atmosférica, com consequências importantes para o clima na América do Sul.

4. IMPACTOS NO ECOSISTEMA E NOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

A produção primária fitoplantônica suporta os ecossistemas pelágicos e bentônicos no oceano e tem maiores consequências para o clima global. A razão de reposição no oceano aberto para espécies fotosintetizadoras (bactérias e protistas) é da ordem de 1 a 6 dias, bastante alta em comparação com plantas terrestres (Field *et al.*, 1998). O biota planctônico como um todo produz mais do que 50% do oxigênio na Terra e fixa uma porcentagem similar do carbono “vivo” do planeta (Field *et al.*, 1998). Um porcentagem significativa (15-20%) da matéria orgânica produzida no oceano superior é transportada para camadas pelágicas tanto por mecanismos passivos (gravitacional) quanto ativos, incluindo produção de matéria fecal e carcaças por heterotróficos, formação de agregados biogênicos, e migração vertical por zooplâncton. Em combinação, esses fenômenos são conhecidos como a *bomba biológica* e são exclusivos aos ecossistemas marinhos. A bomba biológica contribui para a constituição de reservatórios de carbono nos oceanos profundos, carbono esse retirado da atmosfera ao longo das eras geológicas, ajudando a estabelecer a forma da biosfera como ela é hoje.

Devido à bomba biológica ser afetada diretamente pelas trocas na interface oceano-atmosfera, a ciclagem biogeoquímica de constituintes orgânicos e inorgânicos na água do mar é fortemente influenciada pelo clima e pela circulação oceânica em grande escala. Hoje está cada vez mais reconhecido que os riscos de mudanças ambientais globais não podem ser previstos sem um melhor conhecimento dos ecossistemas planctônicos, suas variações e mudanças, inércia e retro-alimentação nos ciclos biogeoquímicos e no clima.

Para entender essas interações físico-químicas-biológicas no Atlântico Sudoeste, uma abordagem multidimensional, tanto no tempo quanto no espaço, vem sendo adotada em projetos coordenados no contexto do INCLINE. Esses estudos têm como foco principal os processos físicos, biogeoquímicos e biológicos em várias escalas, incluindo (i) a circulação em escala de bacia no Atlântico Sul e sua influência nos ecossistemas sobre a plataforma continental brasileira; (ii) processos de conectividade entre os domínios oceânicos e de plataforma, ao longo da margem continental brasileira; (iii) processos de meso-escala ao longo de gradientes latitudinais e perpendiculares à orientação da plataforma; e (iv) observações nas regiões internas da plataforma e modelagem com altas resolução espaço-temporal. Pesquisas nesses tópicos são complementares uns aos outros e são motivados por hipóteses e questões científicas similares e as mesmas limitações tecnológicas e soluções.

5. ESFORÇOS DE PESQUISA PARA O ENTENDIMENTO DO ATLÂNTICO SUDOESTE

Considerando-se a forte conexão entre as condições ambientais das zonas costeiras e as circulações do oceano e da atmosfera em grande escala, é de se esperar que um Atlântico Sul alterado irá implicar em sérios impactos no clima, na biologia e nos processos biogeoquímicos em uma vasta extensão da costa do Brasil, tanto oceânica quanto continental. Para entender e quantificar mudanças na circulação do Atlântico Sul, decorrentes de alterações da circulação atmosférica, e os consequentes impactos dessas mudanças sobre processos costeiros e sobre o clima regional, um abrangente esforço de pesquisa multi-disciplinar e multi-institucional foi iniciado no início da década de 2010 pelos projetos INCLINE, SANSO, SAMOC, INCT-MC e INCT-Mar-COI.

Esses projetos tinham os seguintes objetivos:

- i. Investigar mudanças na circulação oceânica nos últimos 50 anos, através de simulações numéricas oceânicas, forçadas com produtos de Reanálises.
- ii. Desenvolver e empregar plataformas de observação meteo-oceanográficas, para monitorar condições oceânicas e atmosféricas nas regiões costeiras adjacentes ao Sul e Sudeste do Brasil.
- iii. Realizar cruzeiros oceanográficos regularmente, para medir variáveis físicas, químicas e biológicas, para avaliar o estado atual e a evolução temporal dessas variáveis na área de estudo.
- iv. Investigar as fontes de elementos traços e seus isótopos, distribuição e biogeoquímica e seus impactos no ciclo do carbono na Bacia de Santos.

- v. Analisar o papel da bomba biológica no transporte gravitacional e ativo de constituintes orgânicos e inorgânicos para o fundo do oceano, incluindo o transporte de carbono.
- vi. Desenvolver e utilizar uma hierarquia de modelos numéricos, processos físicos, químicos e biológicos para entender como possíveis mudanças no clima irão afetar o ecossistema costeiro.
- vii. Implementar e usar modelo acoplado oceano-atmosfera para estudar impactos de mudanças climáticas globais no clima regional.
- viii. Identificar, através de simulações numéricas, os mecanismos físicos que controlam as trocas de massa, vorticidade, energia e de propriedades biológicas e biogeoquímicas (espécies, nutrientes, CO₂, sedimentos) entre a plataforma continental e o oceano profundo, e suas variabilidades em escalas de sub-sazonal a inter-anual

A investigação científica, projetada para um período mínimo de cinco anos, entre 2012 e 2017, foi baseada na análise de dados disponíveis, incluindo dados de satélite, no desenvolvimento e instalação de plataformas observacionais, fixas e derivantes, para a coleta de informações oceânico-atmosféricas, na realização de cruzeiros oceanográficos regulares, e na execução de experimentos com modelos numéricos.

6. A Boia ATLAS-B

A parte observacional *in situ* foi enfocada, primariamente, na Baía de Santos e plataforma sul brasileira, em uma cooperação sinérgica entre os diferentes projetos envolvidos. Um componente importante consistiu do desenvolvimento, fundeio e manutenção de uma boia meteo-oceanográfica tipo Atlas, denominada genericamente de Atlas-B, ao largo do litoral brasileiro, em aproximadamente 28°.5S, 44°W (vide Figs. A4b.2 e A4b.3). Essa boia complementa a Extensão Sudoeste da rede PIRATA, fornecendo informação de grande importância para o monitoramento das interações oceano-atmosfera e da ZCAS, assim como sua variabilidade e o entendimento dos processos de mistura vertical na base da camada de mistura oceânica. Esse sistema de monitoramento é também de valor fundamental para o acompanhamento e a previsão da evolução de ciclones extratropicais e de eventos extremos ao largo do litoral brasileiro, como foi o caso do Furacão Catarina, em 2004.



Figura A4b.2: Primeira boia Atlas-B (“Guariroba”) imediatamente após o bem sucedido fundeio, na posição 28.5o S, 44.0o W. Essa bóia foi ancorada em uma região com aproximaamente 4 mil metros de profundidade e está equipada com vários sensores para o monitoramento de variáveis na interface ar-mar (temperatura do ar, intensidade e direção do vento, umidade relativa, precipitação e fluxos radiativos e termodinâmicos) e na coluna de água (temperatura e salinidade nos primeiros 500 metros e no fundo).

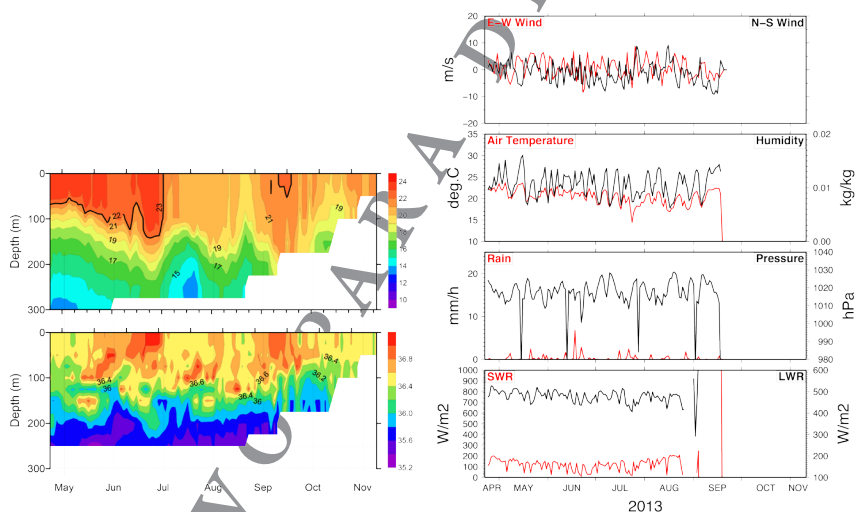


Figura A4b.3: Séries de tempo dos dados coletados pela bóia Atlas-B entre abril e setembro de 2013. Lado esquerdo: perfis verticais de temperatura e de salinidade, de 0 a 300 metros. Lado direito: Componentes da velocidade do vento; temperatura do ar e umidade; precipitação e pressão ao nível do mar; radiações de onda curta e de onda longa.

A primeira boia Atlas-B, apelidada de *Guariroba*, foi lançada em Abril de 2013 (Fig. A4b.2). A título de exemplo, a Figura A4b.3 mostra séries de tempo de alguns dos dados coletados pela *Guariroba* no período entre Abril e Setembro de 2013.

A Guariroba é mantida por um programa de pelo menos um cruzeiro anual entre o Porto de Santos e o local do fundeio (Fig. A4b.4). Tanto o fundeio quanto o programa de manutenção vem sendo conduzido com o apoio

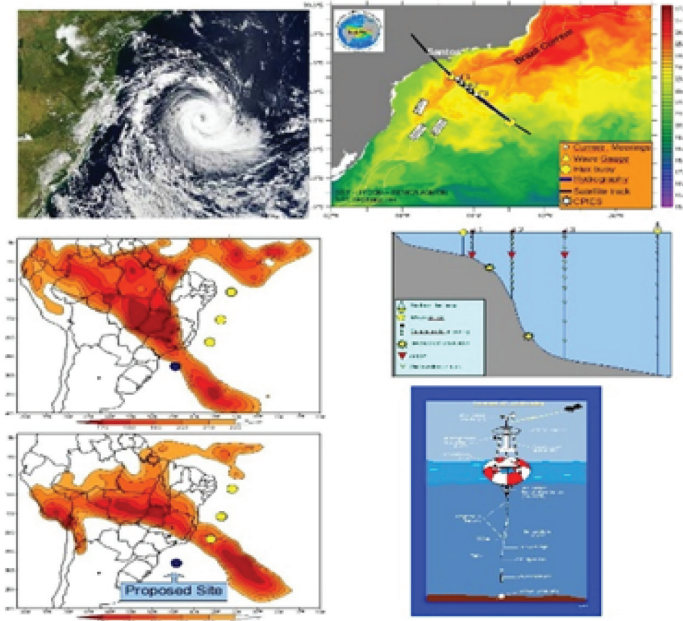


Figura A4b.4: Representação esquemática das atividades experimentais, em conjunção com o projeto de instalação da bóia Atlas-B (a Guariroba). No painel superior direito é indicada a linha radial ao longo da qual são realizados os cruzeiros hidrográficos e a instalação dos instrumentos fundeados (painel do meio, à direita). Essa figura ilustra também a rede de bóias PIRATA-Atlas-B, que entre outras coisas servem para o monitoramento da ZCAS (painéis inferiores do lado esquerdo) e dos anticiclones extratropicais do tipo Catarina (canto superior esquerdo). No canto inferior direito é ilustrada a bóia a ser fundeada em $28^{\circ}\text{S}, 42^{\circ}\text{W}$.

do Navio Oceanográfico Alpha-Crucis, da USP. Os dados coletados pela Guariroba são enviados via satélite e disponibilizados de forma livre, em tempo real, via o sistema global de transmissão de dados (GTS).

O estudo dos impactos das mudanças climáticas sobre o Brasil requer o monitoramento do nível do mar e o ciclo do carbono no mar. Para tanto, propõe-se equipar uma boia da extensão sudoeste do projeto PIRATA (e.g. em $19^{\circ}\text{S}, 34^{\circ}\text{W}$), com um sensor automático de pressão parcial do CO_2 dissolvido na água do mar e um fluorímetro para medições de atividade biológica em torno da boia. Essas medições serão essenciais para auxiliar na componente de modelagem acoplada oceano-atmosfera. O Monitoramento de nível do mar será realizado com marégrafos instalados no Arquipélago São Pedro e São Paulo e na ilha de Trindade como fruto de parceria INPE-DHN, assim como os demais marégrafos da DHN ao longo da costa brasileira.

Como parte do programa de manutenção da boia, espera-se a ampliação das atividades observacionais, baseada na realização de dois cruzeiros sazonais, por ano, preferivelmente no verão e inverno, ao longo da radial entre Santos e a localização da boia, assim como o fundeamento de um sistema de sensores para investigar como possíveis mudanças climáticas estarão afetando processos físicos e a intensidade da bomba biológica na região. Para tanto, em adição às amostragens obtidas durante os cruzeiros oceanográficos, propõe-se o fundeamento de uma rede de linhas de correntômetros, para o monitoramento do transporte de massa e calor pela CB, assim como de um par de armadilhas de sedimento, colocadas no fundo do mar, para avaliar a bomba biológica na zona de transição entre a plataforma continental e o oceano profundo.

Durante os cruzeiros oceanográficos sazonais são realizadas amostragens de propriedades física, química e biológica em toda a coluna de água, incluindo: perfis verticais de temperatura, salinidade, velocidade, oxigênio dissolvido, pH, Nitrato, Nitrito, Fosfato, Silicato, sílica biogênica e elementos traços (Fe, Al, Co, Mn, Cd, Nd, 15N e 13C). Essas medidas permitem uma melhor caracterização das massas de água presentes na região. Medidas de clorofila na superfície e subsuperfície são conduzidas como a contrapartida *in situ* para os dados de cor do oceano obtidos por satélite. Fluxos de CO₂ na interface ar-mar são estimados usando um sistema analisador de pCO₂ autônomo, e baseado no pCO₂ na superfície da água (Alcalinidade total e DIC) e medidas da velocidade do vento. Além do mais, algoritmos preditivos para pCO₂ da água do mar são aplicados a produtos de sensoriamento remoto.

7. RESULTADOS DE MODELAGEM NUMÉRICA

Resultados do esforço de modelagem sendo desenvolvido pelo INCLINE (Campos 2010; Gonçalves, 2011; Gramcianinov, 2012) parecem confirmar mudanças importantes na região de retroflexão da Corrente das Agulhas, na confluência Brasil-Malvinas e nas distribuições de TSM e SSM no Atlântico, possivelmente em decorrência do descolamento para sul de ventos de oeste e do aumento do vazamento das Agulhas.

Estudos recentes sugerem uma alteração no sistema de ventos no hemisfério sul, na forma de uma intensificação e deslocamento em direção ao polo dos ventos de oeste (Toggweiler, 2009). Para verificar o impacto dessa alteração dos ventos na circulação do Atlântico Sul, um experimento numérico foi conduzido com uma implementação do modelo numérico de coordenada híbridas HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) (Halliwell *et al.*, 1998; Bleck *et al.*, 2002). Para tanto, optou-se por utilizar como forçantes as médias mensais dos produtos da reanálise do NCEP, de 1948 a 2010. Antes de executar o modelo, porém, foi feita uma análise dos dados do NCEP e

verificou-se que esse conjunto de dados apresenta uma tendência de aumento em intensidade e deslocamento em direção a sul da região de rotacional zero do vento, conforme mostra a Fig. A4b.5.

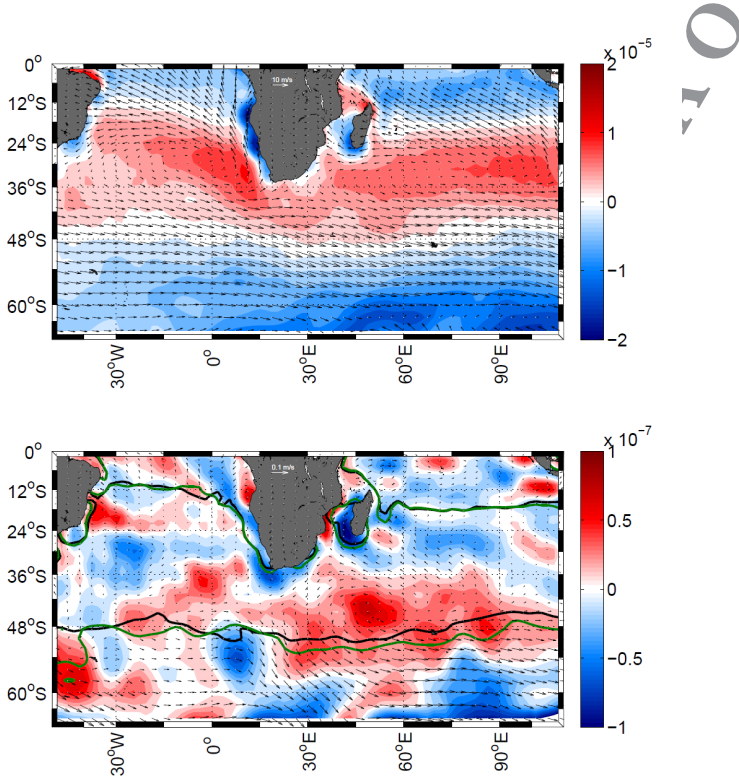


Figura A4b.5: Superior: média do rotacional do vento entre 1960 e 2010 e vetores da velocidade média do vento. Inferior: tendência linear do rotacional do vento e vetores da tendência da velocidade do vento. As linhas preta e verde marcam a posição do rotacional zero do vento antes e depois da tendência, respectivamente.

O modelo foi executado para a região geográfica estendendo-se entre 98° W e 114° E, de 65° S a 60° N, com resolução horizontal de cerca de 0.25° e 22 camadas na vertical. Para obter uma condição inicial adequada, primeiramente forçou-se o modelo com produtos atmosféricos climatológicos do COADS (Comprehensive Atmospheric Data Set) a partir do repouso, com uma estrutura termo-halina definida pela climatologia de Levitus (WOA 2009; <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA09/pubwoa09.html>). O resultado após 10 anos de simulação foi então utilizado como condição inicial para o modelo, a partir de Janeiro de 1948. Como o experimento foi realizado em uma região oceânica limitada, nos contornos leste e oeste foi feita uma relaxação para as condições climatológicas de Temperatura e Salinidade e imposto um fluxo barotrópico da Corrente Circumpolar Antártica com cerca de 148 Sverdrups. Os contornos norte e sul foram fechados.

Diversas análises são realizadas para “validar” o resultado do experimento numérico. Resultados preliminares dessas análises sugerem alterações significativas no Atlântico Sul, como por exemplo uma aparente intensificação e expansão do Giro Sub-Tropical. A Figura A4b.6 mostra séries de tempo das anomalias de salinidade (ASSM), altura da superfície do mar (AASM), temperatura da superfície do mar (ATSM) e do conteúdo de calor da camada de mistura oceânica (ACCCM), no período de 1960 a 2010, na região onde em 2004 ocorreu o fenômeno Catarina. Outros estudos numéricos mostram que mudanças no vazamento das Agulhas podem impactar anomalias de TSM no Atlântico Tropical e Sul, resultando em mudanças no regime de precipitação sobre a América do Sul (Haarsma et al, 2003; 2005, 2008, 2009; Chang *et al.*, 2008). Estudos baseados em observações (e.g. Grimm, 2003;

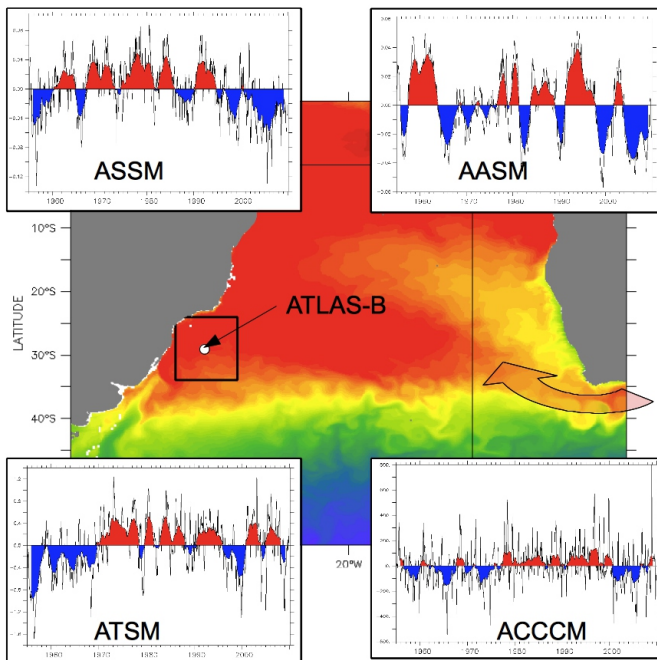


Figura A4b.6: Séries de tempo das anomalias de salinidade (ASSM), altura da superfície do mar (AASM), temperatura da superfície do mar (AATSM) e do conteúdo de calor da camada de mistura oceânica (ACCCM), no período de 1960 a 2010, na região onde em 2004 ocorreu o fenômeno Catarina. Resultados do modelo numérico parecem também indicar um aumento no “Vazamento das Agulhas”.

Grimm, Pal e Giorgi, 2007; Grimm e Zilli, 2009) confirmam que anomalias de TSM no Atlântico Sudoeste subtropical estão associadas com a circulação atmosférica na região costeira adjacente. Por conseguinte, é de se esperar que mudanças nessas regiões oceânicas vizinhas irão resultar em mudanças no ciclo hidrológico e regimes de descargas fluviais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIASTOCH, A., C.W. BÖNING e J.R.E. LUTJEHARMS. Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation. *Nature*, 456, 489-492. 2008a.

BIASTOCH, A., J.R.E. LUTJEHARMS, C. BÖNING e M. SCHEINERT, Mesoscale perturbations control inter-ocean exchange south of Africa. *Geophys. Res. Letters*, 35, L20602, doi:10.1029/2008GL035132. 2008b.

BIASTOCH, A., C.W. BÖNING, F.U. SCHWARZCOPF e J.R.E. LUTJEHARMS, Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of Southern Hemisphere westerlies. *Nature* 462, 495-498. 2009.

BLECK, R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, 4: 55-88. 2002.

CAMPOS, E.J.D., J.E. GONCALVES, Y. IKEDA. Water Mass Characteristics and Geostrophic Circulation in the South Brazil Bight - Summer of 1991. *J. Geophys. Res.*, 100(9), 18537-18550. 1995.

CAMPOS, E.J.D, D. Velhote e I. Da Silveira. Shelf-break upwelling driven by Brazil Current cyclonic meanders. *Geophys. Res. Letters*, 27(6) 751-754. 2000.

CAMPOS, E.J.D. Variability of the Subtropical South Atlantic in a numerical simulation for the past 50 years. *AGU JA-2010*, Foz do Iguaçu, Brasil. 2010.

CHANG, P., R. ZHANG, W. HAZELEGER, C. WEN, X. WAN, L. JI, R.J. HAARSMA, W.P. BREUGEM e H. SEIDEL. An oceanic bridge between abrupt changes in North Atlantic climate and the African monsoon. *Nature Geoscience*, 1, 444-448. 2008.

CURRY, R. & MAURITZEN. C. Dilution of the northern North Atlantic Ocean in recent decades. *Science* 308, 1772-1774. 2005.

FIELD, C.B., BEHRENFELD, M.J., RANDERSON, J.T. & FALKOWSKI, P. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science* 281, 237-240. 1998.

GRIMM, A. M. The El Niño Impact on the Summer Monsoon in Brazil: Regional Processes versus Remote Influences. *Journal of Climate*, 16(2) 263-280. 2003.

GRIMM, A. M., J. S. PAL e F. GIORGI. Connection between Spring Conditions and Peak Summer Monsoon Rainfall in South America: Role of Soil Moisture, Surface Temperature, and Topography in Eastern Brazil. *Journal of Climate*, 20(24), 5929-5945. 2007.

GRIMM, A. M. e M. T. ZILLI . Interannual Variability and Seasonal Evolution of Summer Monsoon Rainfall in South America. *Journal of Climate*, 22, Issue 9, 2257-2275. 2009.

HAARSMA, R.J., E.J.D. CAMPOS e F. MOLteni. Atmospheric response to South Atlantic SST dipole. *Geophys. Res. Lett.*, 30(16), 1864, doi:10.1029/2003GL017829. 2003.

HAARSMA, R.J. E.J.D. CAMPOS, W. HAZELEGER, C. SEVERIJNS, A.R. PIOLA e F. MOLteni. Dominant modes of variability in the South Atlantic: A study with a hierarchy of ocean-atmosphere model. *J. Climate*, 18, 1719-1735. 2005.

HAARSMA, R. J., E.. CAMPOS, W. HAZELEGER e C. SEVERIJNS. Influence or the Meridional Overturning Circulation on the Tropical Atlantic Climate and Variability. *J. of Climate*, 21, 1403-1416. 2008.

HAARSMA, R. J., E.J.D. CAMPOS, S. DRIJFHOUT, W. HAZELEGER e C. SEVERIJNS. Impact of interruption of the Agulhas leakage on the tropical Atlantic in coupled ocean-atmosphere simulations. *Clim. Dynamics*, DOI: 10.1007/s00382-009-0692-7. 2009.

HALLIWELL Jr., G.R., BLECK, R., e CHASSIGNET, E.P. Atlantic ocean simulations performed using a new Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). *EOS, Fall AGU Meeting*. 1998.

HAZELEGER, W, C. SEVERIJNS, R.J. HAARSMA, F. SELTEN, A. STERL. SPEEDO-model description and validation of a flexible coupled model for climate studies. *KNMI, Technical Report*, TR-257, de Bilt, The Netherlands, 37 pp. 2003.

KNORR, G. e G. LOHMANN. Southern Ocean origin for the resumption of Atlantic thermohaline circulation during deglaciation. *Nature* 424, 532-536 (31 July 2003) ;10.1038/nature01855 . 2003.

LUMPKIN, R. e S. L. GARZOLI. Interannual to Decadal Variability in the Southwestern Atlantic's Surface Circulation. *J. Geophys. Res.-Oceans*, Vol. 116, C01014, DOI: 10.1029/2010JC006285. 2003.

RHEIN, M., S. R. RINTOUL, S. AOKI, E. CAMPOS, D. CHAMBERS, R. A. FEELY, S. GULEV, G. C. JOHNSON, S. A. JOSEY, A. KOSTIANOY, C. MAURITZEN, D. ROEMMICH, L. D. TALLEY e F. WANG. Observations: Ocean. In: *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental*

Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex e P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013.

RODRIGUES, R.R., R.J. HAARSMA, E.J.D. CAMPOS, T. AMBRIZZI. The impacts of inter-El Nino variability on the Tropical Atlantic and Northeast Brazil climate. *Journal of Climate*, Vol. 24, pp. 3402-3422, DOI: 10.1175/2011JCLI3983.1. 2011.

RODRIGUES, REGINA R., EDMO J. D. CAMPOS e REINDERT J. HAARSMA. The Impact of ENSO in the South Atlantic Subtropical Dipole Mode. *Journal of Climate*, Vol. 28, pp. 2692-2705, DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00483.1. 2015.

SATO, O. e P. POLITO. Influence of salinity on the interannual heat storage trends in the Atlantic estimated from altimeters and the Pilote Research Moored Array in the Tropical Atlantic data. *Journal of Geophysical Research.*, 113, C02008, doi: 10.1029/2007JC004151. 2008.

STEIGL, E. J.; D. P. SCHNEIDER; S. D. RUTHERFORD; M. E. MANN; J. C. COMISO; e D. T. SHINDELL. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature* 457, 459-462 (22 January 2009) :10.1038/nature07669. 2009.

STERL, A., e W. HAZELEGER. Coupled variability and air-sea interaction in the South Atlantic Ocean. *Climate Dynamics*, 21, 559-571. 2003.

TOGGWEILER, J. R. Shifting Westerlies. *Science*, Vol. 323, pp 1434-35. 2009.

VAZ, A.C., C. PARADA, E. D. PALMA, J. H. MUELBERT & E.J. D. CAMPOS. Modeling transport and retention of *Engraulis Anchoita* Hubbs & Marini, 1935 (Clupeiformes, engraulidae) early life stages along the Southwestern Atlantic continental shelf. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, V. 2, p. 179-190. 2007.

VENEGAS, S.A., L.A. MYSAK, e D.N. STRAUB. Atmosphere-ocean coupled variability in the South Atlantic. *J. Climate*, 10, 2904-2920. 1997.

ARQUIVO DE PERIODICO

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

A5. MEGACIDADES E SUA INTERAÇÃO COM O CLIMA GLOBAL: O EXEMPLO DE SÃO PAULO

MARIA DE FATIMA ANDRADE¹, ADALGIZA FORNARO¹, RITA YNOUE¹, REGINA MIRANDA², EDMILSON FREITAS¹, CAROLINE MAZZOLI¹, THIAGO NOGUEIRA¹

INTRODUÇÃO

Este capítulo trata da relação entre megacidades e clima global e regional, tendo São Paulo como principal exemplo. O termo megacidade surgiu para definir as áreas metropolitanas com uma população maior que 10 milhões de habitantes. Essa conceituação se fez necessária, pois grandes aglomerados urbanos têm características e, principalmente, problemas que se assemelham, destacando-se aqueles relacionados com a mobilidade e outros indicadores de qualidade de vida. Já há mais de 20 megacidades nas quais a população supera os 20 milhões de habitantes tais como Mumbai, Tóquio, Seul, Nova Iorque, Cidade do México, São Paulo e Karachi. Desde 1950, a população mundial mais que dobrou enquanto que o número de veículos aumentou por um fator 10. A fração da população que mora em áreas urbanas aumentou por um fator 4, sendo que atualmente a população que vive em áreas urbanas é maior que a de áreas rurais. Nos próximos vinte a trinta anos, o número de veículos no mundo deve dobrar do número atual de 630 milhões, de acordo com um estudo da Organização Mundial de Saúde/Unep (<http://www.who.int/gho/en/>). À medida que as cidades se expandem para megacidades, estima-se que mais pessoas irão deslocar-se por distâncias maiores e por tempos mais longos. Na ausência de controles, as emissões por fontes antropogênicas, em especial as relacionadas ao transporte, provavelmente aumentarão. O aumento da população e de suas necessidades de conforto resultou em um expressivo aumento no consumo de energia e na emissão de gases do efeito estufa e de outros poluentes, como o monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio (NOx), óxidos de

1. Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, IAG/USP.

2. Escola de Artes, Ciências e Humanidades, EACH-USP

enxofre, compostos orgânicos voláteis (COV) e material particulado (MP). Esses poluentes estão relacionados com as mudanças no clima, em especial o ozônio e o *Black Carbon*, este sendo composto de material absorvedor da radiação solar, como descrito por Monks *et al.* (2009). Uma megacidade pode afetar as condições de tempo em escala local, regional e mesmo global. Molina *et al.* (2007) discutem a qualidade do ar na cidade mais populosa da América do Norte, a Cidade do México, e seu impacto no clima regional, e Parrish *et al.* (2011), fazem uma revisão da evolução da qualidade do ar considerando não somente a cidade do México, mas também Los Angeles e New York. Nesses trabalhos de revisão são apresentadas as melhorias da qualidade do ar relacionadas principalmente com o controle das emissões veiculares. Por outro lado, há a preocupação com outras grandes cidades, especialmente na Ásia, onde as concentrações de poluentes atingem valores extremamente altos, quando analisadas com base nos padrões de referência da Organização Mundial da Saúde. O impacto da urbanização não está relacionado somente às emissões dos poluentes atmosféricos, mas também à modificação da superfície (com aumento da rugosidade e diminuição da umidade do solo) e conseqüentemente a modificações no balanço radiativo e na formação de chuva. Merece atenção a variação no padrão de vento causada pela presença de edifícios altos e pelo aquecimento diferencial da superfície. O aumento no calor sensível que resulta das construções aumenta a convecção, modificando os processos termodinâmicos nas camadas mais próximas à superfície. Além de aspectos locais há a previsão de ocorrência de impactos das mudanças de superfície sobre a química atmosférica e qualidade do ar. Wiu *et al.* (2012) combinaram modelos de circulação global, de vegetação dinâmica e de química atmosférica e mostraram um decréscimo na concentração de ozônio em superfície em 2100, resultado do aumento na sua deposição seca em latitudes médias no Hemisfério Norte. Por outro lado, em áreas poluídas dos Estados Unidos há a previsão de aumento de concentração de ozônio, em função do aquecimento da superfície. Resultados com conclusões diferentes mostram que a não inclusão de fatores importantes na modelagem permite a obtenção de conclusões diferentes. Isso ilustra como ainda há muitas incertezas a serem consideradas em modelos atmosféricos que possuem a inclusão da química atmosférica. Nas últimas décadas, vários pesquisadores têm desenvolvido estudos para entender como partículas de aerossóis afetam o sistema climático. É reconhecido que as megacidades têm efeitos regionais e globais sobre o clima, e que os aerossóis constituem o marcador principal desses efeitos. Na tentativa de descrever a origem e o destino de aerossóis na atmosfera tem-se empregado a modelagem dos processos físico-químicos relacionados: condensação, nucleação, coagulação e sedimentação. No entanto, de acordo com a avaliação de 2007 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a tarefa de quantificar o forçamento

climático da radiação direta e indireta com razoável precisão continua sendo um desafio. Outro objetivo tem sido o de avaliar o impacto das alterações climáticas na qualidade do ar nas megacidades (o chamado feedback). Outro ponto importante é que as emissões antropogênicas de poluentes pelas megacidades têm um forte impacto na qualidade do ar regional e global e estas (megacidades) são altamente afetadas pelas mudanças climáticas. Centros urbanos podem ser considerados observatórios climáticos em que hipóteses sobre as interações entre o clima, qualidade do ar e saúde humana podem ser avaliados. Em regiões populosas e poluídas, as partículas de aerossóis não afetam somente o clima, mas podem também prejudicar a qualidade do ar e, conseqüentemente, comprometer a saúde da população. Isto acontece na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), onde diferentes estudos tem mostrado significativo efeito nocivo de poluentes atmosféricos, principalmente em idosos e crianças (Saldiva *et al.* 1995, Freitas *et al.*, 2004, Martins *et al.*, 2004).

O boletim da “Organização Mundial de Saúde” (OMS), de janeiro de 2009 (WMO, 2009), ressalta a importância de estudos do impacto das cidades nas alterações climáticas: *“between 1800 and 2007, the fraction of the global population living in cities has risen from about 3 per cent to 50 per cent. As a consequence, megacities and regional hot spots have developed with anthropogenic pollutant emissions and changes in land use that have large environmental implication both in the regional hot spots themselves and on a larger scale”*. E mais à frente nesse mesmo editorial menciona-se a questão dos aerossóis e gases emitidos por fontes urbanas: *“Aerosols (directly and indirectly) and tropospheric ozone, exert regional radiative forcing on climate which is expected to modify the distribution of synoptic weather patterns and the distribution of weather elements such as precipitation and wind on a regional basis. The extent of the modification and its societal impact is not well known, but is likely to be important”*.

As mudanças climáticas têm conseqüências para a composição da atmosfera através da modificação de fatores que afetam os ciclos de vida (fontes, transporte, transformações físico-químicas, além de processos de deposição e remoção) dos constituintes atmosféricos. Modelos de clima e de qualidade do ar são utilizados como ferramenta para avaliação dos impactos do clima nos constituintes atmosféricos e destes nas mudanças climáticas. Pode-se afirmar que uma das maiores dificuldades para a previsão da concentração de constituintes atmosféricos e avaliação de cenários de mudanças climáticas é o conhecimento do inventário das emissões. Essa dificuldade atinge todas as escalas, desde a urbana até a global, e se torna ainda mais complexa quando se pretende detalhar emissões de diversos compostos emitidos por diferentes processos de uma cidade. Os inventários que são considerados em modelos globais e mesmo regionais contam

com uma resolução inadequada para a escala urbana. Para a previsão de qualidade do ar necessita-se conhecer as emissões com resolução de até 1 km (idealmente). Além de poluentes convencionalmente medidos por redes de monitoramento, precisa-se levantar dados de outros compostos importantes na formação de poluentes gasosos secundários e material particulado. Lawrence *et al.* (2007) empregaram um modelo global para examinar o fluxo de poluentes das megacidades para seu entorno ou para a estratosfera. Mas a baixa resolução dos inventários de fonte não permitiu a descrição das emissões de megacidades incluindo variação temporal e espacial.

Muitos estudos estão sendo realizados no âmbito de melhoria de inventário de emissões de áreas urbanas (Gurjar *et al.*, 2008), impactos dessas emissões no clima (Gurjar e Lelieveld, 2005) e quanto as mudanças climáticas irão impactar na qualidade do ar, processos radiativos e hidrológicos das áreas mais urbanizadas (projeto MILAGRO - Megacity Initiative: Local And Global Research Observations (Molina *et al.*, 2010) e Projeto MEGALOPOLI - Megacities: Emissions, urban, regional and Global Atmospheric POLLution and climate effects, and Integrated tools for assessment and mitigation - disponível em <http://megapoli.info/>). Outros estudos destacam o quanto estas áreas cada vez mais extensas contribuem para a emissão de gases estufa (Megacities Carbon Project - disponível em <http://megacities.jpl.nasa.gov/portal/>). Haverá um grande impacto na qualidade de vida da população, considerando-se aqui também o impacto à saúde humana (decorrentes das concentrações ambientais de poluentes) e de conforto térmico (extremos de precipitação, de temperatura e de outros fenômenos adversos).

Na maior parte das áreas urbanas, os veículos constituem a principal fonte de poluentes, como aqueles precursores da formação de ozônio, os NO_x e COV, e ainda de material particulado (MP). No Hemisfério Norte há um maior conhecimento das fontes, mas para as outras regiões há ainda muito a ser feito. As fontes veiculares apresentam muita variação temporal e espacial em função do tipo de frota, combustíveis e ciclo de operação. A contribuição das emissões do sistema de transportes é reconhecidamente importante para os compostos orgânicos voláteis, óxidos de nitrogênio e gases de efeito estufa, além da contribuição direta para a emissão de partículas finas e ultrafinas. Os COV contribuem para a formação de ozônio e são precursores de aerossol orgânico secundário (AOS). Atualmente há muito esforço sendo dedicado para o aprimoramento de técnicas de análise e determinação da composição de compostos orgânicos voláteis. Gentner *et al.* (2012) discutem a formação de partículas a partir das emissões de compostos de carbono pela frota veicular.

Considerando a relevância das megacidades para as emissões de aerossóis (compreendendo aqui a fase particulada e gasosa) em escala global e como as novas condições climáticas podem afetar a qualidade do ar nessas áreas urbanas, projetos em andamento no Laboratório de Análise dos Processos Atmosféricos (LAPAt) do Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG-USP, têm como objetivo desenvolver duas linhas de pesquisa: a melhoria do conhecimento sobre a composição e emissão de aerossóis pelos processos urbanos e o desenvolvimento de modelagem acoplada dos processos físico-químicos atmosféricos e seu impacto sobre as populações.

REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), composta de 39 municípios, conta atualmente com 20 milhões de habitantes (de acordo com dados da Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados, SEADE; <http://www.seade.gov.br/produtos/projpop/index.php>), cerca de 2 mil grandes indústrias responsáveis pela maior parte das emissões industriais, um enorme número de veículos rodando com *diesel*, gasolina e etanol, ocupa um área de 8.051 km², e constitui um dos maiores aglomerados urbanos no mundo. Associados à sua dimensão surgem muitos problemas, entre os quais a poluição do ar é um dos mais importantes. Na RMSP, há hoje aproximadamente 7 milhões de veículos comerciais e de passageiros: 93,5% são veículos leves e 6,5% são veículos pesados, a *diesel*. Da frota de veículos leves, aproximadamente 76,3% queimam uma mistura de 78-80% (v/v) de gasolina com 22% etanol (chamada de *gasool*), e 17,2% usam etanol hidratado (95% etanol + 5% água), segundo dados obtidos do relatório da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2012).

A RMSP é a área mais rica do Brasil, representando 19% do Produto Interno Bruto (PIB) em 2008 (<http://www2.camara.sp.gov.br/CTEO/Boletim-RMSP01-jun11.pdf>). A taxa de aumento no número de veículos é maior que a taxa de crescimento populacional. Não somente as altas concentrações de poluentes, mas também a acentuada modificação no uso do solo resulta em baixa qualidade de vida, caracterizada por modificações climáticas locais e regionais.

Silva Dias *et al.* (2013) destacaram mudanças nos padrões de precipitação da região, relacionando a ocorrência de eventos extremos a índices climáticos, eventos El Niño/La Niña-Oscilação Sul (ENOS) e a temperatura da superfície do mar, próxima a costa do continente Sul-americano. Os autores destacam que os eventos extremos podem estar relacionados ao crescimento urbano e as emissões de poluentes na região, responsáveis por modificações nos aspectos microfísicos de formação de nuvens. Resultados referentes ao impacto da mudança do uso do solo e de características de

superfície com formação do fenômeno de ilha de calor urbana no clima da RMSP foram apresentados em Freitas *et al.* (2007). Nos últimos anos, as concentrações ambientais de ozônio na RMSP alcançaram níveis de mais de cinco vezes aos considerados seguros para a saúde pública de acordo com a Organização Mundial de Saúde. Na primavera, os níveis de ozônio rotineiramente excedem $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, padrão nacional brasileiro para máxima horária desse poluente. Aproximadamente 90% dos precursores de ozônio na atmosfera da RMSP são emitidos pela frota veicular (CETESB, 2009). De acordo com o inventário oficial das emissões de Hidrocarbonetos das fontes móveis, 22% são provenientes dos veículos a *gasool*, 15% dos veículos a *diesel*, 6% dos veículos a etanol e 5% das motocicletas. No caso específico dos óxidos de nitrogênio (NO_x), 78% vêm dos veículos a *diesel*, 13% dos veículos a *gasool*, e 4% dos veículos a etanol.

A CETESB iniciou o monitoramento rotineiro dos poluentes em 1974, com 14 estações medindo SO_2 e fumaça, e uma estação no centro da cidade monitorando CO. Em 1982 a rede de monitoramento contava com 22 estações automáticas para medir SO_2 , MP10 (Material Particulado Inalável), O_3 , NO, NO_2 , CO, NMHC e CH_4 , além de parâmetros meteorológicos: velocidade e direção do vento, temperatura e umidade relativa. Desde 2000 mais estações estão sendo instaladas em outras importantes regiões do estado de São Paulo. Deve-se ressaltar que a partir de 1995 não há monitoramento de hidrocarbonetos na rede de Monitoramento de Qualidade do Ar da CETESB.

O nível dos poluentes primários tem decrescido ao longo dos últimos vinte anos, relacionado ao controle das emissões veiculares que são as fontes mais importantes de poluentes na RMSP (Gallardo *et al.*, 2011). Na década de 1980 houve a implantação de um programa de controle de emissão de gases resultantes do processo de queima de combustíveis na frota de veículos leves (o Proconve – Programa de Controle das Emissões Veiculares). Esse programa estabelecido em várias etapas permitiu que, mesmo com o aumento do número de veículos em circulação, o total de poluentes emitidos não sofresse aumento significativo (CETESB, 2013).

Foi instituído recentemente, em abril de 2013, o padrão de qualidade do ar para as partículas finas, $\text{MP}_{2,5}$ (aquelas com diâmetro aerodinâmico menor que $2,5 \mu\text{m}$); estudos mostram que seu comportamento não tem se alterado ao longo dos anos e que suas concentrações são elevadas quando comparadas com padrões internacionais de qualidade do ar. O tamanho das partículas é importante, já que isso determina quão profundamente as partículas irão entrar nos pulmões (Martins *et al.*, 2010). A habilidade do corpo em se proteger das partículas inaladas e a susceptibilidade individual às partículas estão ligadas ao tamanho e à composição química das partículas. Partículas com diâmetros aerodinâmicos maiores que 10

µm em geral não penetram nos pulmões, e têm um tempo de vida mais curto na atmosfera.

Novas metodologias possibilitaram determinar com melhor resolução a estrutura elementar e a distribuição de tamanho da matéria particulada, como apresentado em Castanho e Artaxo (2001), Sanchez-Ccoyllo e Andrade (2002) e Miranda e Andrade (2005).

A representação da formação de ozônio e impacto do uso de diferentes combustíveis foram efetuados com o uso de modelo euleriano fotoquímico off-line, como em Martins e Andrade (2008a e 2008b), Martins *et al.* (2006) e Sanchez-Ccoyllo *et al.* (2007). Albuquerque *et al.* (2012) estudaram a formação de partículas inorgânicas com o uso do modelo CMAq (Community Multiscale Air Quality Model), recomendado pela Agência Americana de Proteção Ambiental como modelo de qualidade do ar regulatório. Mais recentemente os estudos de modelagem de qualidade do ar urbano têm sido desenvolvidos com o modelo WRF-Chem (*Weather and Research Forecasting with Chemistry*) aplicado a São Paulo para simulação da formação de ozônio e partículas, como em Silva Junior (2009), Galichio (2011), Mazzoli (2013) e Vara Vela (2013).

ESTIMATIVAS DE MEDIDA DE FATORES DE EMISSÃO

A estimativa da variação espacial e temporal das emissões veiculares é a grande fonte de incerteza na modelagem da formação e do transporte do ozônio e partículas. Em diversos locais, os dados referentes às emissões veiculares são escassos. Com o intuito de melhorar o inventário de emissões veiculares para a frota de leves e pesados na RMSP, foram realizadas medidas de emissão veicular em túneis, sendo o último experimento realizado em 2011. Resultados anteriores de medidas de experimentos de 2004 foram descritos em Martins *et al.* (2006) e Sanchez-Ccoyllo *et al.* (2009). Os fatores de emissão calculados para 2011 e sua comparação com os dados de 2004 são apresentados na Tabela A5.1, com os resultados mais detalhados descritos em Perez-Martinez *et al.* (2014). No experimento de 2004 as medidas foram realizadas nos Túneis Janio Quadros (para caracterização da frota leve) e no Túnel Maria Maluf (para caracterização da frota pesada à diesel). Em 2011 as medidas foram realizadas também no Túnel Jânio Quadros - TJQ) e houve a mudança para o Túnel 1 do Rodoanel Oeste para a caracterização da frota à diesel.

Os dados apresentados na tabela A5.1 foram calculados a partir de experimentos em túneis de tráfego, sendo possível observar a expressiva diminuição do fator de emissão de poluentes, possivelmente fruto da implantação do Programa de Controle de Emissão Veicular (PROCONVE) a partir de 1986 e do Programa de Inspeção e Manutenção (IM).

Tabela A5.1: Fatores de emissão veicular (g/km) para 2011 e comparação com os valores calculados para 2004 (média \pm desvio padrão). As medidas foram realizadas nos túneis Jânio Quadros¹, Rodoanel² e Maria Maluf³.

Veículos	Local	CO (g/km)	NOx (g/km)	PM _{2.5} (mg/km)	CO ₂ (g/km)
Leves	TJQ ¹ , 2011	5,8 \pm 3,8	0,3 \pm 0,2	20 \pm 8	219 \pm 165
	TJQ ¹ , 2004	14,6 \pm 2,3	1,6 \pm 0,3	n.d.	n.d.
Pesados	TRA ² , 2011	3,6 \pm 1,5	9,2 \pm 2,7	277 \pm 108	1422 \pm 1179
	TMM ³ , 2004	20,6 \pm 4,7	22,3 \pm 9,8	n.d.	n.d.

PRECURSORES DE OZÔNIO: COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS (COV) E NOx (NO + NO₂)

A formação de ozônio é um processo complexo, envolvendo reações dos precursores e presença de radiação solar provocando reações cíclicas entre NO_x e COV, que em altas concentrações nos ambientes urbanos poluídos caracteriza o “*smog* fotoquímico”. Os óxidos de nitrogênio estão entre as principais espécies na química da atmosfera, sendo que nas regiões urbanas há altos níveis de NO_x, atingindo valores muito acima do background troposférico. Quando há NO₂ na presença de luz solar, a fotólise do NO₂, em comprimento de onda menor que 424 nm, produz oxigênio atômico que por sua vez reage com oxigênio molecular (O₂) formando o O₃. O ozônio também pode reagir com o NO regenerando o NO₂, nesta condição chamada de estado foto-estacionário, ozônio é formado e consumido. Porém este estado pode ser alterado em função da presença de COV, levando a formação de radicais que reagem com NO, favorecendo a presença de NO₂ e, portanto, aumentando a produção de O₃ (Seinfeld e Pandis, 1998).

Os compostos orgânicos voláteis (COV) podem ser definidos a partir de suas propriedades físico-químicas, ou seja, compostos que a 20°C apresentam pressão de vapor igual ou superior a 0,01 kPa (European Union, EC Directive 1999/13/EC). Porém, os COV também são caracterizados como os compostos orgânicos que contribuem para a formação fotoquímica do ozônio. Apresentam impacto negativo à saúde humana, seja diretamente pela toxicidade individual de alguns compostos ou indiretamente a partir da formação de oxidantes atmosféricos e mesmo aerossol orgânico secundário (SOA, *secondary organic aerosol*). Entre os COV deve-se destacar os hidrocarbonetos (HC) constituintes principais dos combustíveis fósseis que vão desde o metano (CH₄, majoritário no gás natural veicular - GNV), até HC com 12 carbonos e os compostos aromáticos (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos). Outros COV importantes para química da atmosfera são os oxigenados como aldeídos, cetonas e o alcoóis (lembrando que o

etanol, atualmente, corresponde a mais de 50% do combustível da frota de veículos leves na RMSP).

Na RMSP a principal fonte de emissão dos NO_x e dos HC é a queima de combustíveis pela frota veicular, sendo os veículos pesados (queima de diesel) responsáveis por mais de 60% da emissão dos NO_x e os veículos leves (queima de gasolina e etanol) por mais de 50% da emissão dos HC (CETESB, 2012). Na RMSP as emissões veiculares de COV podem ser divididas em emissões por exaustão (combustível não ou parcialmente queimado), óleos lubrificantes do escapamento, e emissões evaporativas (combustível na forma de vapor emitido por motores e tanques de armazenamento). Podem ser destacadas as emissões de aldeídos e do próprio etanol, combustível importante para a matriz energética no Brasil (Anderson, 2009).

O ozônio na RMSP é um dos poluentes regulamentados que não tem apresentado redução na sua concentração nos últimos anos (Fig. A5.1), diferentemente de outros poluentes. No Brasil o padrão nacional de qualidade do ar foi estabelecido pelo CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) pela Resolução n.º. 03 de 1990 e, para ozônio o valor de 160 µg/m³ (padrão horário) não deve ser excedido mais que uma vez ao ano (CETESB, 2012). Na Figura A5.1, o número de vezes de ultrapassagens do padrão refere-se ao conjunto total dos dados de todas as estações de monitoramento onde este parâmetro foi medido. Em 1996 existiam 13 estações monitorando ozônio, atingindo 19 em 2012. Porém além de aumentar o número de estações monitorando O₃, neste período houve mudanças dos locais medindo este poluente em função das características da região monitorada, por exemplo, proximidade com fontes intensas do precursor NO_x.

Observa-se que apesar do aumento do número de vezes de ultrapassagens do padrão de O₃, principalmente a partir de 2008, as concentrações máximas, tanto de O₃ quanto de NO₂, não apresentaram tendência de aumento (Fig. A5.1). Em relação ao NO_x, considerando os valores máximos horários de cada ano, observa-se a diminuição das concentrações máximas horárias ao longo dos anos (Fig. A5.1), porém apenas em 2008, 2011 e 2012 não foram observados valores acima do padrão nacional (média horária de 320 µg/m³) para este poluente. É importante ressaltar que a recomendação da Organização Mundial da Saúde (OMS) para o padrão horário de NO₂ é de 200 µg/m³, valor muito abaixo do que se observa na RMSP, indicando a importância de políticas de controle de emissão mais restritivas para este poluente, ou mesmo a revisão dos padrões brasileiros de qualidade do ar, assim como está sendo feito para o Estado de São Paulo.

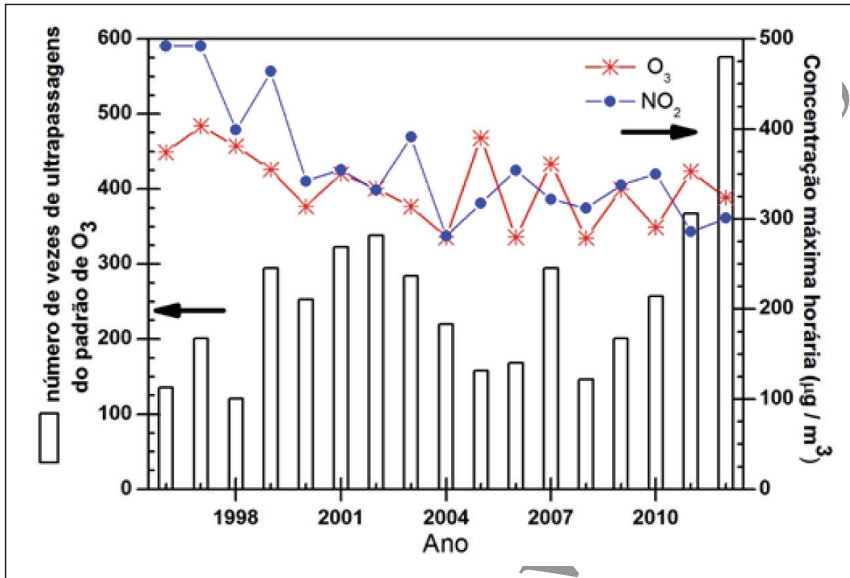


Figura A5.1: Variabilidade anual do número de ultrapassagens (colunas) do padrão de qualidade do ar ($160 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e do valor máximo de O_3 (*) e NO_2 (•) para todas as estações de monitoramento da CETESB na RMSP entre 1996 e 2012.

Diferentemente do O_3 e NO_x , na RMSP somente o metano e os hidrocarbonetos menos o metano (HCNM), entre os COV, foram monitorados entre os anos de 1996 e 2004 nas estações Parque D. Pedro e São Caetano do Sul. Neste período a razão de mistura máxima horária para os HCNM foi de 16,8 ppmC no ano 2000. A variabilidade das concentrações médias horárias para O_3 , NO , NO_2 e HCNM no mês de outubro de 2002, na estação Parque Dom Pedro da CETESB está apresentada na figura A5.2. Observa-se o perfil clássico em que o máximo de ozônio ocorre no início para o final da tarde, momento em que as concentrações de NO_2 e de HCNM diminuem, assim como a razão NO/NO_2 . Estes perfis estão relacionados, além da presença de radiação solar e outros parâmetros meteorológicos (como a variabilidade diária da altura da camada de mistura), com os horários de emissão dos precursores nos horários de máximo tráfego veicular na região.

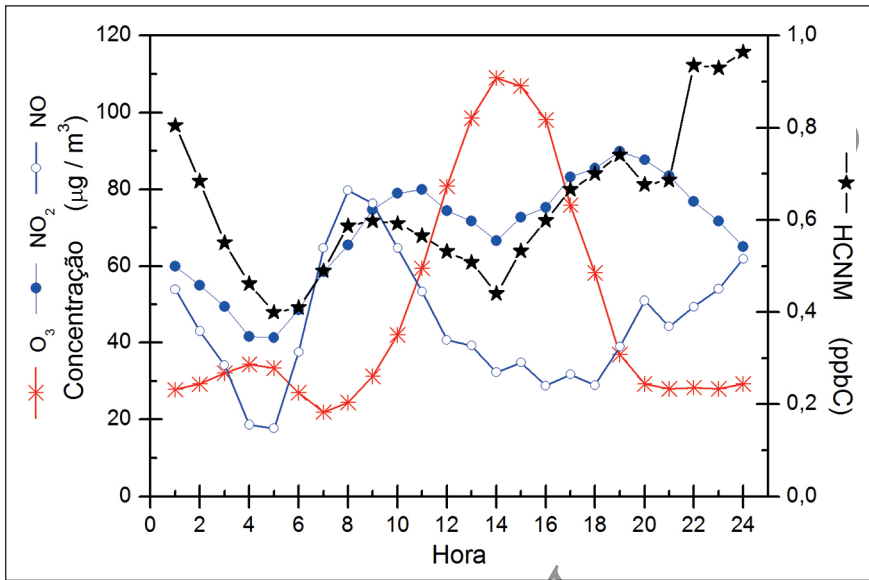


Figura A5.2: Variabilidade da concentração média horária dos poluentes monitorados na estação Parque Dom Pedro da CETESB, outubro de 2002.

Considerando a importância dos COV na formação de O_3 na RMSP, em 2012 teve início no IAG/USP o monitoramento de mais de 50 HC (de 2 até 12 carbonos), possibilitando dados de variabilidade horária, assim como de avaliação das relações entre estes HC e o ozônio. Este estudo tem sido possível a partir da instalação de equipamento de CG/FID (cromatografia gasosa com detector de ionização de chama) acoplado a sistema de amostragem a baixas temperaturas (Dominutti *et al.*, 2012). Entre os primeiros resultados, destaca-se o aumento da concentração de isopreno e ozônio ao longo do dia (Figura A5.3a), sendo o ozônio formado por processos fotoquímicos, enquanto que o isopreno foi associado com emissões biogênicas. Por outro lado, o tolueno (Figura A5.3b) apresentou perfil de variabilidade de razão de mistura diária associado às emissões veiculares (Dominutti *et al.*, 2012). Destaca-se que na RMSP estudo de fatores de emissão em túneis mostrou que o tolueno foi o HC de maior fator de emissão (135 mg/km) devido à queima de combustíveis (Martins *et al.*, 2006).

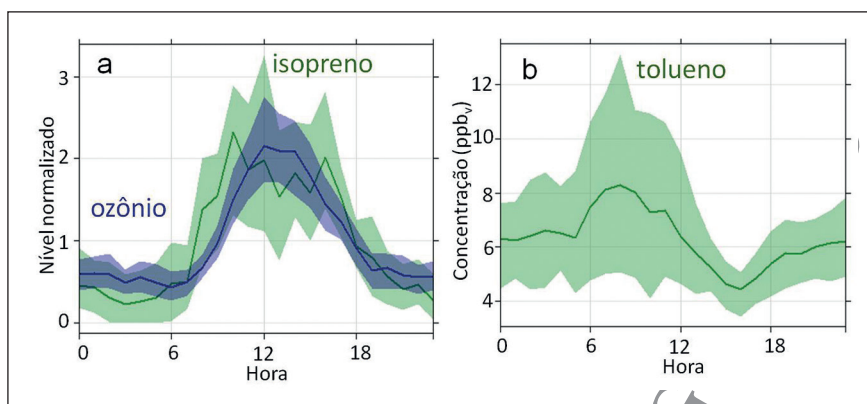


Figura A5.3: Variação horária de a) isopreno e ozônio e b) tolueno. Amostragens realizadas na RMSP nos dias 25 a 27 de julho de 2012 (Dominutti *et al.*, 2012).

Resultados de campanha intensiva em outubro de 2012 mostraram que entre os HC mais abundantes, com valores médios de razão de mistura acima de 1ppb, estavam propano, acetileno, 1-buteno, 2,3-dimetilbutano, propileno, trans-2-buteno, seguidos dos aromáticos (tolueno, benzeno, xilenos, etilbenzeno, etiltolueno, 1,3,5-trimetilbenzeno, 1,2,4-trimetilbenzeno, etc) com razões de mistura entre 0,5 e 0,9 ppb. Considerando os índices de reatividade (Carter, 1994), ou seja, a contribuição em massa de cada HC para a produção em massa de ozônio, destacam-se ainda trans-2-hexeno, cis-2-buteno, etileno, trans-2-penteno, cis-2-penteno e o isopreno (Dominutti *et al.*, 2012). Comparando-se com valores de estudo realizado em novembro de 1998 (Colón *et al.*, 2001), as concentrações atuais foram bem mais baixas, principalmente para os compostos aromáticos. Exceção foi para 1,3,5-trimetilbenzeno e 1,2,4-trimetilbenzeno que se mantiveram praticamente iguais nos dois diferentes períodos de amostragem. É importante destacar que esses estudos foram realizados em diferentes pontos da RMSP, além das técnicas de amostragem e do número total de amostras avaliadas, 400 amostras em 2012 e 112 em 1998. Porém em 1998 também foram analisados os compostos oxigenados com destaque para etanol com razões de mistura variando entre 11,0 e 1017,5 ppbv (Colón *et al.*, 2001).

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO

O material particulado na RMSP tem como fontes principais as emissões diretas e a formação de partículas secundárias a partir de reações químicas entre gases provenientes de emissões veiculares. A composição das partículas finas ($MP_{2,5}$) é caracterizada pela grande participação de fontes carbonáceas,

tanto de compostos orgânicos quanto de carbono elementar (*Black Carbon*). Na Figura A5.4 apresentam-se a concentração de material particulado fino e alguns de seus elementos-traço de experimentos realizados desde a década de 80. Essas amostras foram coletadas por diferentes equipamentos e as quantificações foram realizadas com análise de fluorescência de raios-X, mas em diferentes equipamentos, destacadamente nos Institutos de Física (IF) e de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da USP. Os dados de 1976-1977 e 1980-1981 foram coletados com impactadores em Cascata no IFUSP, os dados de 1986 com amostrador sequencial no IFUSP, de 1989 no IQUSP, de 1994 e 1997 na FMUSP, de 1999 no IFUSP, de 2003 no Mackenzie, de 2008 no IAG, de 2009 na FMUSP, de 2012 no IAG.

Observa-se que o comportamento médio em termos de composição inorgânica tem se mantido com a presença de compostos de enxofre como majoritário da fração fina quando não se considera a participação de compostos de carbono. Os elementos conhecidos como traçadores de emissão do solo (Ca, Si e Fe) não apresentaram variação significativa ao longo do tempo (considerando o valor médio e o desvio padrão da média). Já para o V e o Ni que têm origem nos processos de queima de combustível pode-se considerar que houve uma tendência à diminuição ao longo do tempo, e o Pb que era utilizado como aditivo à gasolina apresentou grande decréscimo, ressaltando-se que essa é uma análise somente qualitativa. As concentrações dos compostos do sódio (Na) ao chumbo (Pb) em ng/m^3 e o Carbono Orgânico, o Carbono Elementar e o $\text{MP}_{2.5}$ em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, coletados no inverno de 2012 são apresentadas na Figura A5.5.

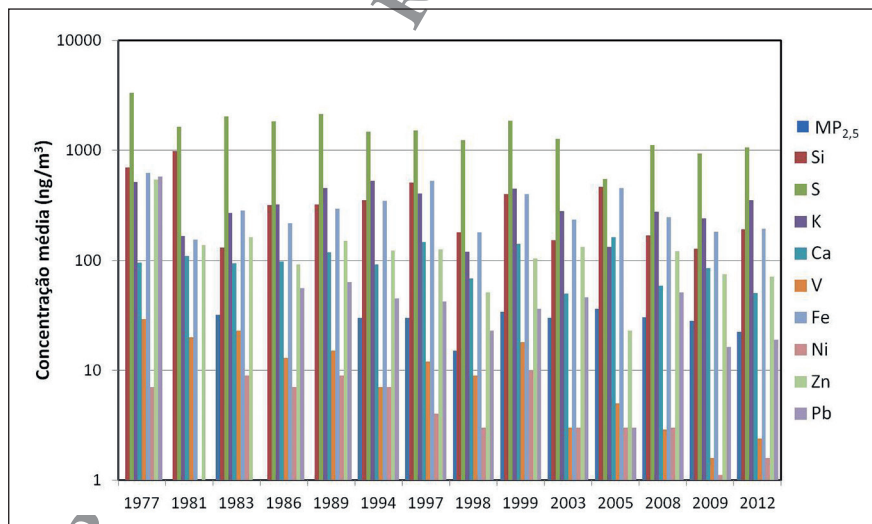


Figura A5.4: Concentração média de $\text{MP}_{2.5}$ (em $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a participação de elementos-traço inorgânicos (em ng/m^3) em sua composição em amostras coletadas em experimentos realizados em diferentes períodos em São Paulo.

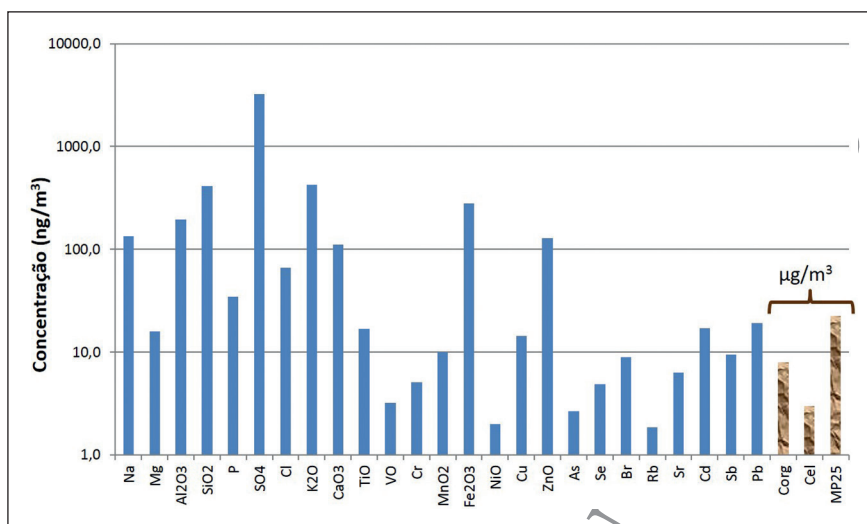


Figura A5.5: Composição do material particulado fino (MP_{2.5}), sendo do Na ao Pb em ng/m³ e o Carbono Orgânico (C_{org}), o Carbono Elementar (C_{el}) e a concentração em massa do MP_{2.5} em μg/m³, coletados no terraço do IAG/USP, inverno de 2012.

Houve uma mudança na composição do MP_{2.5} quando se compara os dados atuais com anos anteriores. A concentração de Carbono Orgânico e Carbono elementar teve uma tendência de aumento a partir de 1997. Como esses compostos têm sua origem associada com a fonte veicular, os dados ficam consistentes com o aumento da frota na RMSP. O conhecimento da composição elementar do material particulado é muito importante para a avaliação de seu impacto no balanço radiativo, e, portanto, no clima, além de impactos à saúde. Além da distribuição de tamanho do aerossol para massa, tem-se procurado determinar a distribuição de tamanho por número, parâmetro importante nos estudos de radiação atmosférica. Acredita-se que a fonte das partículas mais finas é a emissão por processos de queima, em especial a queima de diesel.

Para avaliação da origem das partículas tem-se estudado a sua correlação com os gases de origem primária (os NO_x) e o de origem secundária (o O₃). As partículas foram consideradas para quatro intervalos de tamanho: d<50nm, 50<d<100, 100<d<200 e 200<d<414. Observa-se na Figura A5.6 que o ciclo diurno do NO apresenta padrão de variação correlacionado com o da distribuição de partículas com diâmetros entre 50 e 100 nm.

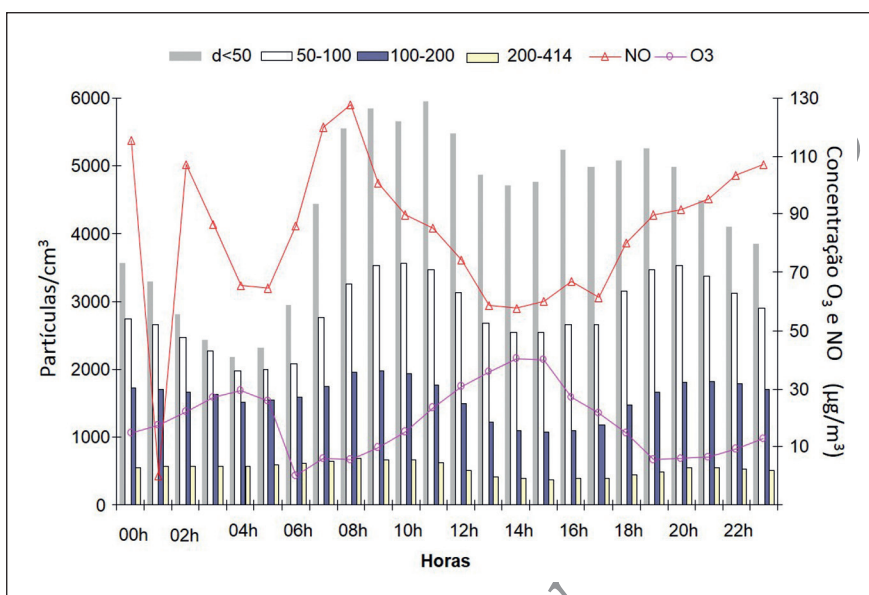


Figura A5.6: Evolução temporal da concentração média do número de partículas em três faixas de tamanho por cm^3 de ar, comparada com a variação média temporal da concentração de O_3 e NO em $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Fonte: Albuquerque, 2005).

O material particulado (MP) suspenso na atmosfera tem efeito sobre a radiação solar que atinge a superfície terrestre. As partículas podem espalhar, absorver ou emitir radiação eletromagnética, resultando na redistribuição da energia proveniente do sol (radiação de onda curta) ou da superfície terrestre (radiação de onda longa), causando aquecimento ou resfriamento da atmosfera, dependendo das propriedades físico-químicas e ópticas das partículas. Na parte visível do espectro (0,4 a 0,7 μm) a influência dos constituintes do aerossol urbano padrão (fumaça, sulfatos e *soot-cinzas*) é significativa. As partículas derivadas de solo influenciam mais no infra-vermelho, absorvendo radiação, mas também causam influência no visível, onde atuam como espalhadoras de radiação. As partículas de carbono orgânico são eficientes principalmente no espalhamento de radiação, enquanto que as de carbono elementar são as principais partículas absorvedoras presentes na atmosfera. Discute-se cada vez mais o papel das partículas contendo Black Carbon e Brown Carbon no balanço radiativo da atmosfera. Essas partículas têm origem no processo de queima, em especial de combustíveis fósseis e biomassa e são importantes para o balanço radiativo, atuando tanto na absorção de radiação de onda curta, quanto modificando o albedo de neve, pelo seu escurecimento, como descrito em Bond *et al.*, (2013).

Para entender estes efeitos ópticos é necessário conhecer a composição química do aerossol e seu tamanho, já que estas características determinam o tipo de interação entre o aerossol e a radiação. Propriedades ópticas do aerossol como profundidade óptica, coeficiente de espalhamento e coeficientes de Angstrom, quando relacionadas à composição química, podem trazer interessantes informações sobre as partículas. A Figura A5.7 mostra a relação entre concentrações de MP2.5 (dados obtidos na FMUSP) e a profundidade óptica do aerossol (dados das rede AERONET). Há um grande interesse em utilizar a informação do sensoriamento remoto para estimar a concentração de poluentes em superfície de forma a aumentar o número de locais com monitoramento de poluentes. Resultados preliminares mostram que isso é possível e se constitui em uma nova forma de estudar a qualidade do ar. A Figura A5.8 apresenta a relação entre a composição química do aerossol – tendo como exemplos o silício (Si, caracterizando a fonte solo), e o Black Carbon (BC, caracterizando os processos de queima) e o Coeficiente de Angstrom (α). Maiores valores de α indicam a presença de partículas menores em suspensão na atmosfera, como pode ser observado na figura, em especial para os últimos dias de agosto de 2007.

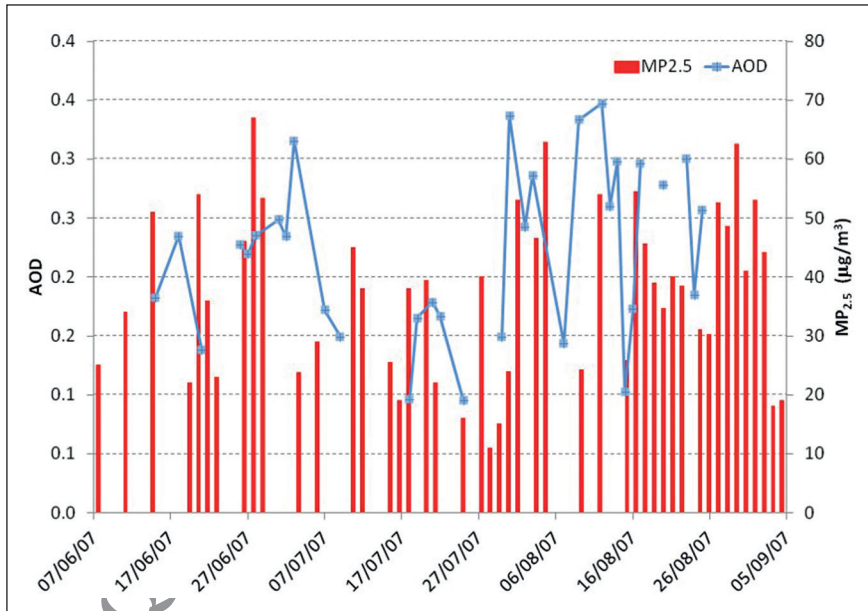


Figura A5.7: Concentração de MP2.5 e profundidade óptica do aerossol (AOD, *Aerosol optical Depth*).

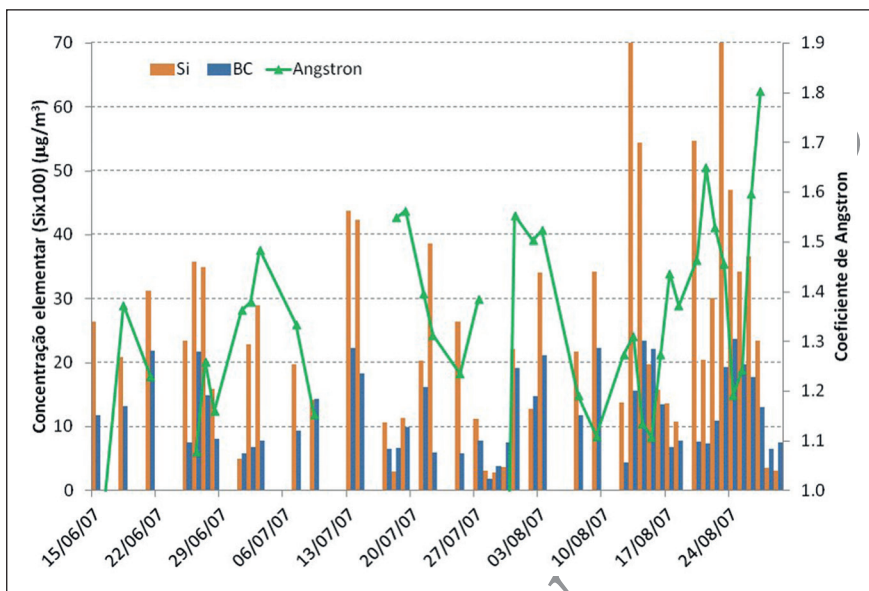


Figura A5.8: Relação entre concentração elemental (exemplo para Silício e *Black Carbon*) e propriedades ópticas do aerossol (Coeficiente de Angstron, α).

Outro aspecto importante é a determinação da participação de bio-aerossóis para a concentração em massa do material particulado. Parte da fração orgânica é composta por partículas biológicas, tais como fungos e bactérias. Essas espécies podem ter um papel relevante do ponto de vista de saúde humana e também no clima, como agentes nucleadores de gelo e nuvem.

MODELAGEM DO IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO NA RMSP

Estudos estão sendo realizados para avaliar como as mudanças no clima afetarão a qualidade do ar na RMSP (como descrito em Mazzoli, 2013). É importante ressaltar que os maiores efeitos sofridos pelas áreas urbanas estão associados com o uso inadequado do solo, com o aumento do armazenamento de energia em decorrência dos materiais utilizados nas construções, com o aumento da rugosidade da superfície (Freitas e Silva Dias 2005) e com a emissão de poluentes. A população tem enfrentado aumento de temperaturas extremas, alteração das precipitações, responsáveis por deslizamentos e enchentes conforme descrito por Silva Dias *et al.* (2013), e mudanças na reatividade fotoquímica da atmosfera.

A modelagem numérica da atmosfera envolvendo os processos químicos associados à formação do ozônio foi utilizada como ferramenta para

avaliar o impacto na qualidade do ar da RMSP de mudanças do clima a partir de cenários de mudança global oriundos do IPCC (Mazzoli, 2013). A qualidade do ar foi estimada por meio do modelo WRF/Chem (*Weather Research and Forecasting with Chemistry*) e os cenários do IPCC utilizados representam situações futuras, levando-se em conta o aquecimento global dentro de suas perspectivas otimista (SRES B1) e pessimista (SRES A2). Para a representação desses dois cenários foram utilizadas as saídas do modelo climático global CCSM3 (*Community Climate System Model*), as quais serviram como condições iniciais e de contorno para o modelo utilizado. A caracterização da qualidade do ar foi realizada com base na análise da concentração de ozônio na RMSP, para os anos de 2020 e 2050. Os resultados foram avaliados através de médias calculadas para todos os pontos de grade e todos os tempos simulados, onde foi realizada a comparação com o caso base, que representa o comportamento do ozônio no período selecionado para o estudo compreendido entre os dias 08 e 16 do mês de novembro de 2011.

O WRF/Chem foi configurado da mesma forma para todas as simulações realizadas, onde foram utilizadas duas grades, ambas com 100 pontos em x e y, com espaçamento horizontal de 9 e 3 km, centradas no centro da cidade de São Paulo.

Foram realizadas simulações para os anos de 2020 e 2050 considerando-se o cenário SRES A2. Com base nas médias espaciais e temporais calculadas observou-se que, com relação à concentração de ozônio, o ano de 2050 apresentou concentração de cerca de 7 ppb maior quando comparada ao ano de 2020, o que representa um aumento de aproximadamente 14% nas concentrações do poluente. Em geral, todas as concentrações, bem como os valores de temperatura e umidade foram maiores para o ano de 2050, o que está de acordo com as estimativas do IPCC.

As médias calculadas para toda a grade e todos os tempos de simulação para o cenário SRES B1 (mais sustentável) para 2020 e 2050 mostraram que diferenças encontradas entre as variáveis, em geral, também foram pequenas. Contudo, um padrão diferente foi observado com relação às concentrações de ozônio. O ano de 2050 apresentou um valor médio menor do que o estimado para o ano de 2020, apesar de a temperatura média ter sido maior para o ano de 2050, em torno de 3,5 °C. Isso mostra a dependência do poluente em função das condições meteorológicas previstas para o período.

Após análise comparativa entre os anos de 2011, 2020 e 2050, Mazzoli (2013) concluiu que as condições meteorológicas foram muito importantes para as diferenças encontradas, e que a não linearidade da variação das médias pode estar ligada as condições iniciais e as de contorno que forçam o modelo

a se ajustar às mesmas. Essas simulações tiveram o objetivo de avaliar o impacto de mudanças climáticas na qualidade do ar de áreas urbanas numa escala local. As abordagens realizadas, em geral, não tem considerado o papel das emissões locais de poluentes que têm uma influência de maior ordem na qualidade do ar. Estudos envolvendo períodos mais longos de simulação são necessários para uma avaliação mais acurada. Também se faz necessário que haja estimativas de cenários de emissões que envolvam os aspectos locais políticos e econômicos.

PERSPECTIVAS:

Há a necessidade da realização de mais estudos na RMSP com o objetivo de entender o seu papel como fonte de aerossóis atmosféricos, os processos de formação de poluentes e o impacto das mudanças climáticas sobre a qualidade do ar. Trabalhos realizados e em desenvolvimento envolvem medidas de diferentes compostos atmosféricos, seu comportamento sazonal, a determinação de fatores de emissão de poluentes por veículos automotores, e a modelagem atmosférica. O aprimoramento do conhecimento sobre as emissões e concentrações ambientais em São Paulo resultou do maior número de medidas e melhor resolução dos dados e de vários estudos com modelagem atmosférica. Esses resultados em escala local devem ser combinados com aqueles que estão sendo obtidos em escala regional para o aprimoramento do conhecimento sobre as variações de tempo e clima sobre a qualidade do ar em áreas urbanas. Por outro lado, o papel das emissões das áreas urbanas no contexto global é reconhecidamente cada vez mais importante e necessita ser abordado de forma mais rigorosa com os *inputs* locais de inventários de emissões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, T. T. A.; ANDRADE, M. F.; YNOUE, R. Y. Characterization of atmospheric aerosols in the city of São Paulo, Brazil: comparisons between polluted and unpolluted periods. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 184, p. 969-984, 2012.

ANDERSON, L. G. Ethanol fuel use in Brazil: air quality impacts. *Energy Environ. Sci.*, v. 2, p. 1015-1037, 2009.

BALBINO, H. T. *Avaliação de modelos fotoquímicos de qualidade do ar e estudo das circulações atmosféricas nos processos de dispersão de poluentes*. Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 126 pp, 2008.

BOND, T.C.; DOHERTY, S.J.; FAHEY, D.W.; FORSTER, P.M.; BERNTSEN T.; DEANGELO B.J.; FLANNER M.G.; GHAN, S.; KÄRCHER, B.; KOCH D.; KINNE S.; KONDO Y.; QUINN P.K.; SAROFIM, M.C.; SCHULTZ, M.G.; SCHULZ, M.; VENKATARAMAN, C.; ZHANG, H.; ZHANG, S.; BELLOUIN, N.; GUTTIKUNDA, S.K.; HOPKE, P.K.; JACOBSON, M.Z.; KAISER, J.W.; KLIMONT, Z.; LOHMANN, U.; SCHWARZ, J.P.; SHINDELL, D.; STORELMO, T.; WARREN, S.G.; ZENDER, C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *J. Geophys. Res.*, 118, 5380-5552, doi:10.1002/jgrd.50171, 2013.

CARTER, W.P.L. Development of Ozone Reactivity Scales for Volatile Organic Compounds. *J Air Waste Manag Assoc.* 44, 881- 899, 1994.

CASTANHO, A. D. A.; ARTAXO P. Wintertime and summertime: São Paulo aerosol source apportionment study. *Atmospheric Environment*, 35, 4889-4902, 2001.

CETESB, 2009. Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo. 2008. *Air quality report for the Sao Paulo state.* 2008. 340 pp.

—, 2012: *Qualidade do ar no estado de São Paulo.* 2011 (*Air quality in Sao Paulo state.* 2011), 120 pp.

—, 2013: *Qualidade do ar no estado de São Paulo.* 2012, 123 pp.

COLÓN, M.; PLEIL, J.D.; HARTLAGE, T.A.; GUARDANI, M.L.; MARTINS, M.H. Survey of volatile organic compounds associated with automotive emissions in the urban airshed of São Paulo, Brazil. *Atmospheric Environment*, 35, 4017-4031, 2001.

DICKERSON, R. R.; KONDRAGUNTA S., STENCHIKOV G., CIVEROLO K.L.; DODDRIDGE B.G.; HOLBEN B.N. The Impact of Aerosols on Solar Ultraviolet Radiation and Photochemical Smog. *Science*, 278, 827-830, 1997.

DO, D.H.; LANGENHOVE, H.V.; WALGRAEVE, C.; HAYLEYESUS, S.F.; WISPELAERE, P.D.; DEWULF, J.; DEMEESTERE, K. Volatile organic compounds in an urban environment: a comparison among Belgium, Vietnam and Ethiopia. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 93(3), 298-314, 2013.

DOMINUTTI, P.A.; NOGUEIRA, T.; ANDRADE, M.F.; FORNARO, A. Hidrocarbonetos voláteis precursores de ozônio: estudo de caso na cidade de São Paulo. *Anais XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 23 a 28 de setembro de 2012, Gramado, Rio Grande do Sul.

FREITAS, C.; BREMNER, S.A.; GOUVEIA, N.; PEREIRA, L.A.A.; SALDIVA, P.H.N. Internações e óbitos e sua relação com a poluição atmosférica em São Paulo, 1993 a 1997. *Revista de Saúde Pública* 38(6), 751-757, 2004.

FREITAS, E. D.; SILVA DIAS P.L. Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 20, 355-366, 2005.

FREITAS, E. D.; ROZOFF C.M.; COTTON W.R.; SILVA DIAS P.L. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of Sao Paulo, Brazil. *Boundary-Layer Meteorology*, 122, 43-65, 2007.

FREITAS, E. D.; MAZZOLI C.R.; MARTINS L.D.; MARTINS J.A.; CARVALHO V.S.B.; BALBINO H.T.; ANDRADE M.F. Nocturnal ozone peaks and urban circulation patterns over the Metropolitan Area of Sao Paulo - Brazil. *8th International Conference on Air Quality Science and Application*, Athens, Greece, Hatfield, UK: University of Hertfordshire, 2012.

GALICHIO, W. *Aplicação do modelo WRF-Chem para modelagem de ozônio troposférico: estudo de caso de outubro de 2002*. Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2011.

GALLARDO, L.; DAVIDOWISK, L.; ESCRIBANO, J.; ROJAS, N.; ANDRADE, M. F.; OSSES, M. Evaluation of vehicle emission inventories for carbon monoxide and nitrogen oxides for Bogotá, Buenos Aires, Santiago and Sao Paulo. *Atmospheric Environment*, v.47, p.12 – 19, 2011.

GENTNER D.R.; ISAACMAN, G.; WORTON, D.R.; CHAN, A.W.; DALLMANN, T.R.; DAVIS, L.; LIU, S.; DAY, D.A.; RUSSELL, L.M.; WILSON, K.R.; WEBER, R.; GUHA, A.; HARLEY, R.A.; GOLDSTEIN, A.H. Elucidating secondary organic aerosol from diesel and gasoline vehicles through detailed characterization of organic carbon emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 18318-18323, 2012.

GURJAR, B. R.; BUTLER, T. M.; LAWRENCE, M. G. LELIEVELD, J. Evaluation of emissions and air quality in megacities. *Atmospheric Environment*, 42, 1593-1606, 2008.

GURJAR, B. R.; LELIEVELD, J. New Directions: Megacities and global change. *Atmospheric Environment*, 39, 391-393, 2005.

IPCC, 2013, <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/140.htm> (acessado em julho de 2013).

KESSELMEIER, J.; STAUDT, M. Biogenic volatile organic compounds (VOC): An overview on emission, physiology and ecology. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 33, 23-88, 1999.

LAWRENCE, M. G.; BUTLER, T. M.; STEINKAMP, J.; GURJAR, B. R.; LELIEVELD, J. Regional pollution potentials of megacities and other major population centers. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 3969-3987, 2007.

MAKAR, P. A.; MORAN, M. D.; SCHOLTZ, M. T.; TAYLOR, A. Speciation of volatile organic compound emissions for regional air quality modeling of particulate matter and ozone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 108 (D2), p. ACH 2-1–ACH 2-51, 2003.

MARTINS, L. D.; MARTINS, J. A.; FREITAS, E. D.; MAZZOLI, C. R.; GONÇALVES, F. L. T.; YNOUE, R. Y.; HALLAK, R.; ALBUQUERQUE, T. T. A.; ANDRADE, M. F. POTENTIAL health impact of ultrafine particles under clean and polluted urban atmospheric conditions: a model-based study. *Air Quality Atmosphere and Health*, v. 3, p. 29-39, 2010.

MARTINS, L. D.; ANDRADE, M. F. Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds and Ozone Sensitivity to Their Emission in the Megacity of São Paulo, Brazil. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 195, p. 201-213, 2008a.

—, Emission Scenario Assessment of Gasohol Reformulation Proposals and Ethanol use in the Metropolitan Area of Sao Paulo. *The Open Atmospheric Science Journal*, 2, 166-175, 2008b.

—, Emission factors for gas-powered vehicles traveling through road tunnels in Sao Paulo, Brazil. *Environmental Science & Technology*, v. 40, p. 6722-6729, 2006.

MARTINS, L.D.; ANDRADE, M.F.; FREITAS, E.D.; PRETTO, A.; GATTI, L.V.; ALBUQUERQUE, E.L.; TOMAZ, E.; GUARDANI, M.L.; MARTINS, M.H.R.B.; JUNIOR, O.M.A. Emission factors for gas-powered vehicles traveling through road tunnels in São Paulo, Brazil. *Environmental Science & Technology*, v. 40, p. 6722-6729, 2006.

MARTINS, M.C.H.; FATIGATI, F.L.; VESPOLI, T.C.; MARTINS, L.C.; PEREIRA, L.A.A.; MARTINS, M.A.; SALDIVA, P.H.N.; BRAGA, A.L.F. Influence of socioeconomic conditions on air pollution adverse health effects in elderly people: an analysis of six regions in São Paulo, Brazil. *Journal of Epidemiology and Community Health*, v. 58, p. 41-46, 2004.

MAZZOLI, C. R. Estudo numérico da influência das mudanças climáticas e das emissões urbanas no ozônio troposférico da Região Metropolitana de São Paulo. 162 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MIRANDA, R. M. Caracterização físico-química e propriedades ópticas do aerossol urbano na Região Metropolitana de São Paulo. Tese (Doutorado em Meteorologia) Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MIRANDA, R. M.; ANDRADE, M. F. Physicochemical characteristics of atmospheric aerosol during winter in the São Paulo Metropolitan area in Brazil. *Atmospheric Environment*, v. 39, p. 6188-6193, 2005.

MIRANDA, R.; TOMAZ, E. Characterization of urban aerosol in Campinas, São Paulo, Brazil. *Atmospheric Research*, v. 87, p. 147-157, 2008.

MOLINA, L. T.; KOLB, C. E.; DE FOY, B.; LAMB, B. K.; BRUNE, W. H.; JIMENEZ, J. L.; RAMOS-VILLEGAS, R.; SARMIENTO, J.; PARAMO-FIGUEROA, V. H.; CARDENAS, B.; GUTIERREZ-AVEDOY, V.; MOLINA, M. J. Air quality in North America's most populous cities; overview of the MCMA-2003 campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 7, p. 2447-2473, 2007.

MOLINA, L. T.; MADRONICH, S.; GAFFNEY, J. S.; APEL, E.; FOY, B.; FAST, J.; FERRARE, R.; HERNDON, S.; JIMENEZ, J. L.; LAMB, B.; OSORNIO-VARGAS, A. R.; RUSSELL, P.; SCHAUER, J. J.; STEVENS, P. S.; VOLKAMER, R.; ZAVALA, M. An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 10, p. 8697-8760, 2010.

MONKS, P.S.; GRANIER, C.; FUZZI, S.; STOHL, A.; WILLIAMS, M.L.; AKIMOTO, H.; AMANN, M.; BAKLANOV, A.; BALTENSPERGER, U.; BEY, I.; BLAKE, N.; BLAKE, R.S.; CARSLAW, K.; COOPER, O.R.; DENTENER, F.; FOWLER, D.; FRAGKOU, E.; FROST, G.J.; GENEROSO, S.; GINOUX, P.; GREWE, V.; GUENTHER, A.; HANSSON, H.C.; HENNE, S.; HJORTH, J.; HOFZUMAHAUS, A.; HUNTRIESER, H.; ISAKSEN, I.S.A.; JENKIN, M.E.; KAISER, J.; KANAKIDOU, M.; KLIMONT, Z.; KULMALA, M.; LAJ, P.; LAWRENCE, M.G.; LEE, J.D.; LIOUSSE, C.; MAIONE, M.; MCFIGGANS, G.; METZGER, A.; MIEVILLE, A.; MOUSSIOPOULOS, N.; ORLANDO, J.J.; O'DOWD, C.D.; PALMER, P.I.; PARRISH, D.D.; PETZOLD, A.; U. PLATT POSCHL, U.; PREVOT, A.S.H.; REEVES, C.E.; REIMANN, S.; RUDICH, Y.; SELLEGRI, K.; STEINBRECHER, R.; SIMPSON, D.; TEN BRINK, H.; THELOKE, J.; VAN DER WERF, G.R.; VAUTARD, R.; VESTRENG, V.; VLACHOKOSTAS, CH.; VON GLASOW, R. Atmospheric composition change – global and regional air quality. *Atmospheric Environment*, v. 43, p. 5268-5350, 2009.

OLIVEIRA, M. Evolução das distribuições de tamanho em massa e número do aerossol atmosférico em São Paulo. *Dissertação* (Mestrado em Meteorologia) – Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2007.

PARRISH, D. D.; SINGH, H. B.; MOLINA, L.; MADRONICH, S. Air quality progress in North American megacities: A review. *Atmospheric Environment*, v.45, p. 7015-7025, 2011.

PÉREZ-MARTÍNEZ, P.J.; MIRANDA, R. M.; NOGUEIRA, T.; GUARDANI, M. L.; FORNARO, A.; YNOUE, R.; ANDRADE, M. F. Emission factor of air pollutants from vehicles measured inside road tunnels in São Paulo:

case study comparison. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 11 (8), p. 2155-2168.

SALDIVA, P. H.; POPE III, C.A.; SCHWARTZ, J.; DOCKERY, D.W.; LICHTENFELS, A.J.; SALGE, J.M.; BARONE, I.; BOHM, G.M. Air pollution and mortality in elderly people: a time-series study in São Paulo, Brazil. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, v. 50, p. 159-163, 1995.

SÁNCHEZ-CCOYLLO, O. R.; YNOUE, R. Y.; MARTINS, L. D.; ASTOLFO, R.; MIRANDA, R. M.; FREITAS, E. D.; BORGES, A. S.; FORNARO, A.; FREITAS, H.; MOREIRA, A.; ANDRADE, M. F. Vehicular particulate matter emissions in road tunnels in São Paulo, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 149, p. 241-249, 2009.

SÁNCHEZ-CCOYLLO, O. R.; MARTINS, L. D.; YNOUE, R. Y.; ANDRADE, M. F. The impact on tropospheric ozone formation on the implementation of a program for mobile emissions control: a case study in São Paulo, Brazil. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 7, p. 95-119, 2007.

SÁNCHEZ-CCOYLLO, O. R.; ANDRADE, M. F. The influence of meteorological conditions on the behavior of pollutants concentrations in São Paulo, Brazil. *Environmental Pollution*, v. 116, p. 257-263, 2002.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. *John Wiley & Sons*, 1998.

SILVA DIAS, M. A. F.; DIAS, J.; CARVALHO L. M. V.; FREITAS, E. D.; SILVA DIAS, P. L. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. *Climatic Change*, v. 116, p. 705-722, 2013.

SILVA JUNIOR, R. S. Sensibilidade na estimativa da concentração de poluentes fotoquímicos com aplicação de diferentes parametrizações de Camada Limite Planetária utilizando o modelo de Qualidade do Ar WRF-Chem. *Tese (Doutorado em Meteorologia) Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.*

VARA VELA, A. L. Avaliação do impacto da frota veicular na formação de ozônio troposférico na atmosfera da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). *Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.*

WIU, S.; MICKLEY, L. J.; KAPLAN, J. O.; JACOB, D. J. Impacts of changes in land use and land cover on atmospheric chemistry and air quality over the 21st century. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 12, p. 1597-1609, 2012.

WMO - World Meteorological Organization. *Bulletin - The journal of the World Meteorological Organization - Weather, climate and the air we breathe*, v. 58, n. 1, Jan. 2009.

A6. EVOLUÇÃO HISTÓRICA E FUTURA DOS EXTREMOS DE CHUVA DIÁRIA EM SÃO PAULO

MARIA ASSUNÇÃO FAUS DA SILVA DIAS¹, ANA CLÁUDIA THOMÉ SENA¹, JULIANA DIAS¹, LEILA MARIA VESPOLI DE CARVALHO³, EDMILSON DIAS DE FREITAS¹, PEDRO LEITE DA SILVA DIAS^{1,4}

Resumo

É feita uma análise da evolução dos extremos de chuva acumulada diária na cidade de São Paulo notando-se um aumento do número de dias com chuvas extremas durante o século XX. Justifica-se a observação das chuvas através de fatores climáticos já apontados em outros trabalhos mas também a fatores locais como a urbanização e a elevação da temperatura da superfície do mar nas proximidades da costa da região Sudeste. A análise de longo prazo se baseou em indicadores termodinâmicos que representam padrões atmosféricos associados a chuvas intensas. Nota-se entre os diversos indicadores de chuva que o índice termodinâmico K também apresenta tendência de aumento que é capturada pelas simulações do clima do século XX feitas pelo modelo HadGEM2-CC. Em função disso são examinados cenários para o clima do século XXI constatando-se que permanece uma ligeira tendência linear de aumento dos extremos do índice K, porém, há uma oscilação multidecenal de grande amplitude que domina a evolução futura. À luz das incertezas nas projeções climáticas discutem-se possíveis impactos na disponibilidade hídrica da região.

INTRODUÇÃO

A evolução da frequência de ocorrência de extremos de precipitação em diferentes partes do mundo tem sido um tema intrigante por sua alta

1. Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, IAG/USP.

2. Physical Sciences Division, NOAA Earth System Research Laboratory, Boulder, CO, EUA.

3. Earth Research Institute and Department of Geography, University of California, Santa Barbara, Santa Barbara, California, EUA.

4. Laboratório Nacional de Computação Científica, MCTI, Petrópolis, Brasil.

variabilidade regional (IPCC, 2007, 2013) e pelas implicações práticas que representa. Aspectos como o gerenciamento da água e de suas consequências como enchentes, inundações e deslizamentos de encostas, são particularmente afetados por tendências de longo prazo no aumento ou diminuição das chuvas e por alterações na frequência de ocorrência de extremos. Particularmente em centros urbanos o problema se agrava pela impermeabilização do solo e pela presença de edificações em geral em detrimento da vegetação nativa, afetando a temperatura, a umidade e a circulação de ar, com implicações no conforto térmico e também na formação de chuva (Freitas *et al.*, 2007, 2009). Por outro lado, dentro da análise de mudanças climáticas decorrentes da ação do homem, particularmente no caso da emissão de gases de efeito estufa, são feitas conjecturas sobre a evolução dos extremos climáticos no passado (SREX, 2011) no sentido de associá-los ao aquecimento global.

Da mesma forma ao olhar para o futuro, para cenários de mudanças climáticas em virtude da continuidade das emissões de gases de efeito estufa, novamente se aponta para a possível evolução dos extremos climáticos, particularmente o caso dos extremos de chuva (SREX, 2011; IPCC, 2007, 2013).

Um ponto que tem desafiado as pesquisas sobre a variabilidade dos extremos climáticos é a atribuição de causa das mudanças observadas. Até que ponto as mudanças já observadas são devidas à mudança de uso da terra, especificamente à urbanização, ou à variabilidade climática natural do planeta Terra? É fato que em sua história geológica a Terra passou por extremos quentes e frios, chuvosos e secos e após a Revolução Industrial também é afetada pelo aumento da emissão de gases de efeito estufa. Há também a questão associada ao impacto das mudanças climáticas nas atividades humanas. O aumento do risco de danos e perdas, vida e infraestrutura, está associado à alteração do clima ou simplesmente à maior exposição da população ao risco de enchentes, inundações e deslizamentos de terra?

A resposta a tantas e tão variadas perguntas é complicada pelo fato da chuva ser uma variável não contínua, com altíssima variabilidade espacial, e com erros de medida que aumentam as incertezas das possíveis conclusões. Os resultados a serem relatados e discutidos no presente capítulo têm como objetivo contribuir para a avaliação de mudanças nas chuvas já ocorridas na região leste do estado de São Paulo, com foco na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), e avaliar dentre alguns cenários de mudanças futuras o que se pode esperar com relação a situações extremas nas próximas décadas.

A chuva no estado de São Paulo e na região Sudeste do Brasil tem passado por variações de longo prazo assim como variações interdecenais associadas a padrões climáticos (Dufek e Ambrizzi, 2008; Haylock *et al.*, 2006; Liebmann *et al.*, 2001; Carvalho *et al.*, 2002; Pereira Filho *et al.*, 2007). Na RMSP, Xavier *et al.* (1994) e Silva Dias *et al.* (2013) também encontraram esse comportamento para as chuvas diárias extremas. A Figura A6.1 construída com os dados da Estação Meteorológica do IAG/USP, localizada no Parque CIENTEC da USP, mostra o número de casos por ano em que a chuva excede os limiares de 30 e 50 mm/dia através de uma média móvel de 5 anos para suavizar as variações interanuais. Considerando a estação chuvosa como sendo o período que vai de outubro a março (Carvalho *et al.*, 2011), foram incluídas também na Figura A6.1 o número de dias em que a chuva excede 30 mm e 50 mm na estação chuvosa. Os valores de 30 e 50 mm/dia correspondem a aproximadamente os percentis de 95 e 99%, respectivamente, segundo (Silva Dias *et al.*, 2013). Pode-se notar na Figura A6.1 que há uma tendência de longo prazo no número de dias em que a chuva excede 50 mm/dia a passar de 2 dias/ano nos anos 1930 para 4 dias/ano nos anos 2000. No caso dos 30 mm/dia a tendência é passar de 8 dias/ano no início do período para 12 a 14 dias/ano no fim do mesmo. Nota-se também que nas primeiras décadas as curvas anuais e para a estação chuvosa são bastante próximas enquanto que em décadas mais recentes há vários anos em que a distância entre as curvas aumenta indicando que ocorrem chuvas intensas na estação seca. Carvalho *et al.* (2011) encontraram uma mudança brusca no comportamento dos extremos na década de 1970.

As oscilações interdecenais observadas mostram períodos com maior número de casos seguidos de períodos com menos casos com amplitude que leva a valores máximos e mínimos mais extremos que os representados pela variação linear ao longo de 70 anos.

A discussão sobre a evolução dos valores extremos feita por Silva Dias *et al.* (2013) enfoca a possível influência da evolução climática global e os também possíveis efeitos locais causados pelo aumento da área urbana. Esta passou de 200 km² em 1930 para 2407 km² em 2002 (<http://www.emplasa.sp.gov.br>). O aumento da temperatura da superfície do mar (TSM) na costa Sudeste do Brasil ao longo da segunda metade do século XX também foi levado em conta por influenciar a quantidade de calor e umidade disponível para a formação de chuvas na RMSP.

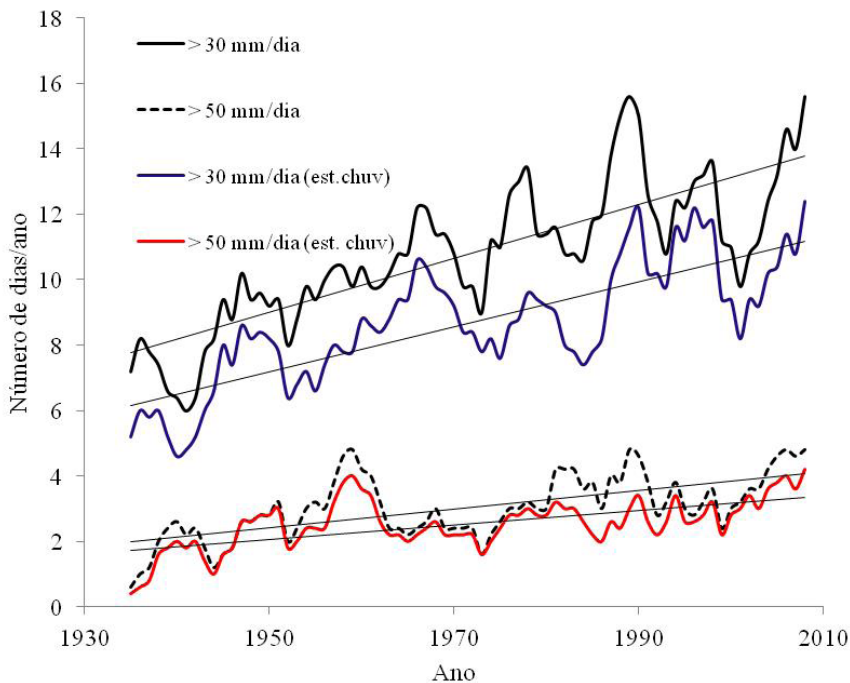


Figura A6.1: Média móvel de 5 anos do número de dias por ano em que a chuva diária na Estação Meteorológica do IAG excede 30 e 50 mm, em preto para o ano todo e em cores apenas considerando a estação chuvosa. As linhas indicam o ajuste linear em cada caso.

A principal conclusão obtida no trabalho de Silva Dias *et al.* (2013) foi que a TSM na costa Sudeste, o índice da Oscilação Decenal do Pacífico (Mantua *et al.*, 1997), o índice de monções da América do Sul (Silva e Carvalho, 2007) e o índice de Oscilação do Atlântico Norte explicam aproximadamente 50% da variabilidade observada nos extremos de chuva durante a estação chuvosa. Restam então outros 50% que podem ser atribuídos a outras causas como o crescimento da área urbana, a mudança na cobertura da superfície na própria região rural que cerca a cidade e a poluição do ar produzindo aerossóis com possíveis impactos na produção de chuva. Modelagem numérica (Carrió *et al.*, 2010; Carrió e Cotton, 2011; Freitas *et al.*, 2007, 2009) tem mostrado que esses processos podem provocar aumentos de chuva em regiões urbanas. Estes aspectos são discutidos a seguir.

2.1 RELAÇÃO ENTRE URBANIZAÇÃO, TSM E EVENTOS EXTREMOS

A variabilidade observada nos eventos extremos pode estar ligada ao processo de urbanização, além da influência de outros aspectos, como a

TSM. Nesta seção são apresentados resultados de modelagem numérica que justificam uma atribuição de causa das chuvas intensas à dois fatores: a urbanização e a TSM.

A variabilidade observada também pode ser devida à combinação de fatores. Pensando nisso, foram realizados alguns testes de sensibilidade, através do uso do modelo BRAMS (Freitas, *et al.*, 2009) em um caso de tempestade severa ocorrido na Região Metropolitana de São Paulo no dia 01 de fevereiro de 2003. O objetivo principal das simulações realizadas foi a identificação da influência da urbanização, através da modificação nos arquivos do uso do solo (com ou sem área urbana), e da TSM, que influencia a intensidade e duração da brisa marítima, responsável pelo transporte de umidade para a RMSP.

Foram utilizadas duas grades aninhadas com um espaçamento de grade horizontal de 16 e 4 km. Na vertical, foram utilizados 32 níveis em coordenadas sigma, com um espaçamento inicial de 70 m próximo à superfície e uma amplificação por um fator de 1,2 até a altura de 1000 m (grade telescópica) para permitir um melhor detalhamento da camada mais próxima à superfície terrestre. Acima de 1000 m, o espaçamento permaneceu constante e igual a 1000 m. Para a representação da ocupação do solo foi utilizada uma associação entre a classificação original do programa IGBP, com 17 classes, e a classificação utilizada em Freitas, (2003). O arquivo resultante permite um melhor detalhamento das áreas urbanas da RMSP.

Em todas as simulações foi utilizado o processo de inicialização heterogênea, sendo utilizadas as análises do modelo global do CPTEC, com resolução de 1,875° na horizontal, num intervalo de 6 horas, com a inclusão de medidas de temperatura e umidade obtidas de estações de superfície.

Foram realizados dois conjuntos de experimentos que diferem entre si pela especificação da ocupação do solo (substituição da área urbana da RMSP pelo tipo de vegetação equivalente à mata fechada no BRAMS) e a modificação na temperatura da superfície do mar (+ ou - 2°C). As análises foram realizadas através do método de separação de fatores (Stein e Alpert, 1993) também conhecido por planejamento fatorial (Barros Neto *et al.*, 1995). Este método permite obter a contribuição individual de cada um dos parâmetros envolvidos na previsão de um campo meteorológico. Na presente análise, dois parâmetros são variados e, portanto, para a identificação da contribuição de cada um deles foram necessários 4 ensaios para cada experimento (o número de ensaios é igual a 2^n , sendo n o número de fatores envolvidos). A Tabela A6.1 mostra os ensaios realizados em cada um dos experimentos.

Segundo Barros Neto *et al.* (1995), o efeito principal da ilha de calor urbana sobre o campo de precipitação previsto é dado por:

$$(1.1) \quad IC = \frac{1}{2}[(P_2 - P_1) + (P_4 - P_3)]$$

sendo IC o efeito da ilha de calor, P_1 , P_2 , P_3 e P_4 referem-se à precipitação acumulada obtida nos ensaios 1, 2, 3, e 4 respectivamente. Similarmente, o efeito principal da temperatura da superfície do mar sobre o campo de precipitação é dado por:

$$(1.2) \quad TM = \frac{1}{2}[(P_3 + P_4) - (P_1 + P_2)]$$

em que TM é o efeito da temperatura da superfície do mar.

A interação entre os dois parâmetros é dada por:

$$(1.3) \quad IC_{TM} = \frac{1}{2}[(P_1 + P_4) - (P_2 + P_3)]$$

Tabela A6.1: Valores utilizados durante os experimentos 1 e 2. ‘Semanal’ indica a temperatura da superfície do mar observada na semana em que ocorreu o evento simulado.

Experimento 1			
Ensaio	Ocupação do solo	TM	Precipitação
1	Modificada (sem cidade) (-)	Semanal (-)	P_1
2	Original (+)	Semanal (-)	P_2
3	Modificada (sem cidade) (-)	Aumento de 2 °C (+)	P_3
4	Original (+)	Aumento de 2 °C (+)	P_4
Experimento 2			
Ensaio	Ocupação do solo	TM	Precipitação
1	Modificada (sem cidade) (-)	Diminuição de 2°C (-)	P_1
2	Original (+)	Diminuição de 2°C (-)	P_2
3	Modificada (sem cidade) (-)	Semanal (+)	P_3
4	Original (+)	Semanal (+)	P_4

Os resultados das simulações numéricas foram validados a partir da comparação com as observações do radar meteorológico de Ponte Nova - SP, gentilmente cedidos pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FTCH/USP) e das imagens no canal infravermelho do satélite GOES-8, obtidas junto ao laboratório MASTER do IAG-USP. O produto de radar utilizado foi o CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) na altura de 3 km.

O evento de tempestade severa que ocorreu no dia 01 de fevereiro de 2003 deu-se logo após uma longa permanência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Este episódio de ZCAS teve início no dia 25 janeiro e atuou até o dia 01 de fevereiro (Climanálise, 2003). Os maiores totais de precipitação, superiores a 150 mm, ocorreram em São Paulo ocasionando alagamento de várias regiões na zona leste da RMSP e intensa precipitação de granizo em várias outras localidades.

SIMULAÇÃO DO EVENTO OCORRIDO NO DIA 01/02/2003.

A tempestade do dia 1 de fevereiro de 2003 teve início após a chegada da brisa marítima, por volta das 18 UTC (15 HL), sendo esta uma situação típica de ocorrência dessas tempestades, conforme citado em Pereira Filho *et al.* (2002). A Figura A6.2 mostra uma comparação entre a taxa de precipitação simulada (mm/h) e aquela obtida através dos CAPPI para o dia 01 de fevereiro de 2003.

Na sequência apresentada na Figura A6.2, notamos que existe uma diferença no horário de início da tempestade em comparação às estimativas obtidas pelo radar. Entretanto, verificamos por uma análise nas imagens do satélite GOES-8 (Figura A6.3) que existe alguma nebulosidade sobre a RMSP neste horário. O sistema existente na região do vale do Ribeira foi relativamente bem detectado desde as 18 UTC. Às 19 UTC a taxa de precipitação simulada é de aproximadamente 20 mm/h sobre a Zona Leste da cidade de São Paulo. Às 20 UTC o radar registra taxas de precipitação entre 75 e 100 mm/h enquanto que na simulação os valores permanecem em torno dos 20 mm/h. Às 21 UTC o radar apresenta taxas de precipitação superiores a 100 mm/h. Existe um aumento significativo nos valores simulados, com taxas de precipitação superiores a 30 mm/h sobre a Zona Leste da cidade de São Paulo. O máximo de precipitação estimado pelo radar está localizado a oeste da cidade de São Paulo. Neste mesmo horário, os resultados obtidos com o modelo são bem mais distribuídos espacialmente do que os estimados pelo radar. Novamente, uma análise nas imagens de satélite sugere que existe um bom acordo entre estas e os resultados do modelo (imagem das 20:45 UTC). Após as 22 UTC, o sistema não mais aparece nas estimativas do radar. Há um deslocamento do sistema para sudoeste na simulação, sendo o mesmo observado nas imagens de satélite.

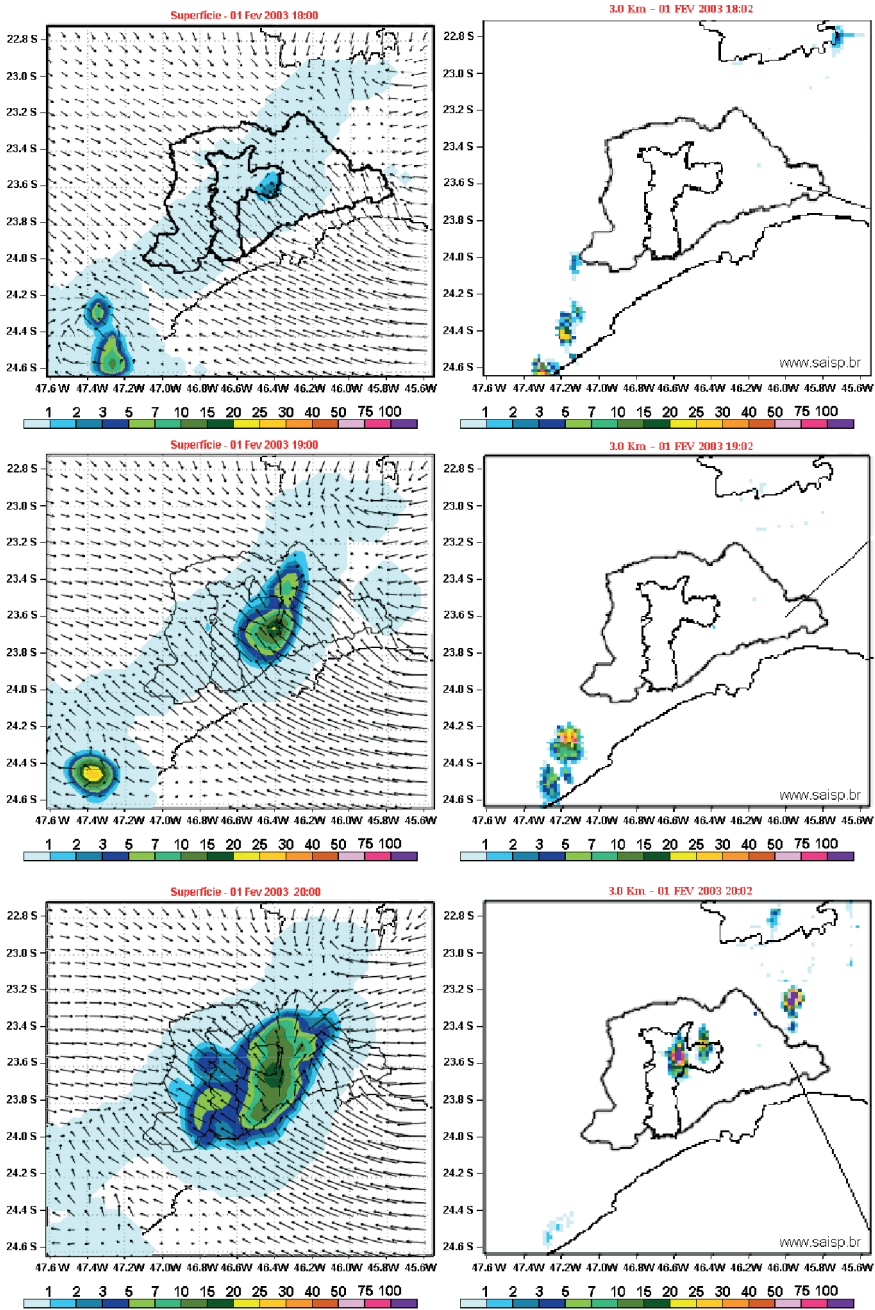


Figura A6.2: Evolução temporal da taxa de precipitação (mm/h) obtida pela simulação com o BRAMS (esquerda) e estimada através dos CAPPi's fornecidos pelo Radar Meteorológico da Ponte Nova (direita). Também nessas figuras são apresentados os campos do vento em superfície. Os vetores são plotados a cada 2 pontos de grade. Parte das figuras apresentadas em Freitas E.D. et al (2009)

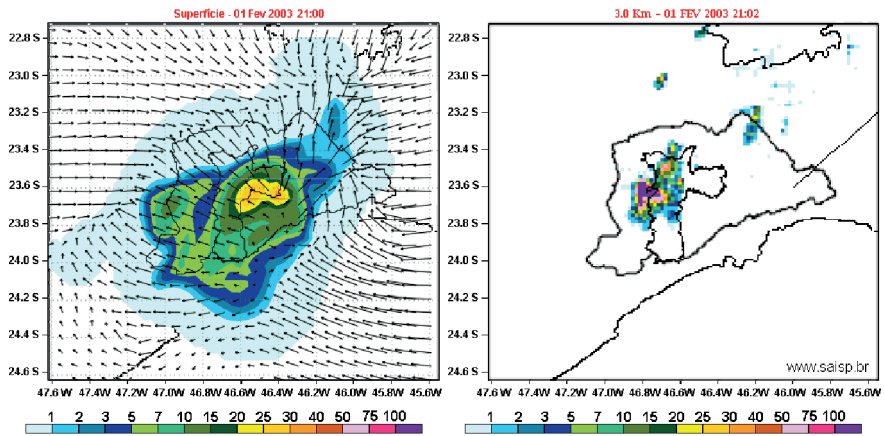


Figura A6.2 (cont.).

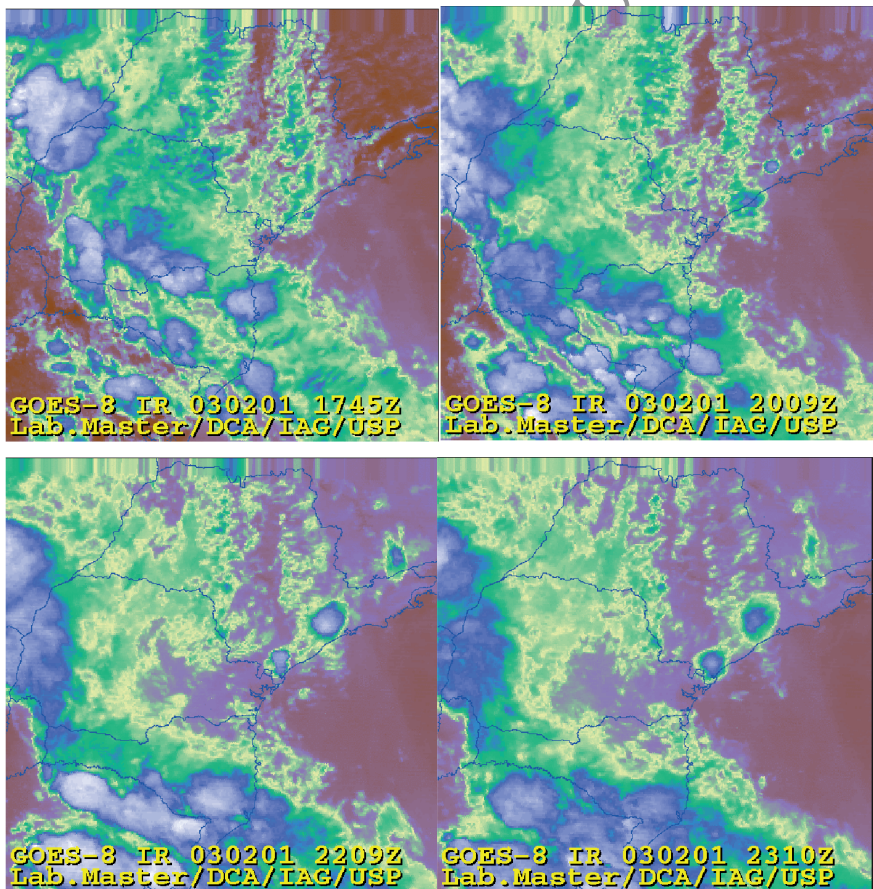


Figura A6.3: Imagens realçadas do satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 01 de fevereiro de 2003.

Apesar das estimativas do radar não apresentarem nenhuma precipitação após as 22 UTC, verificamos pela análise das imagens que o sistema permaneceu com grande nebulosidade sobre a RMSP por até pelo menos 23:45 UTC. Esses resultados mostram que do ponto de vista espacial, a simulação representou muito bem este evento de tempestade severa.

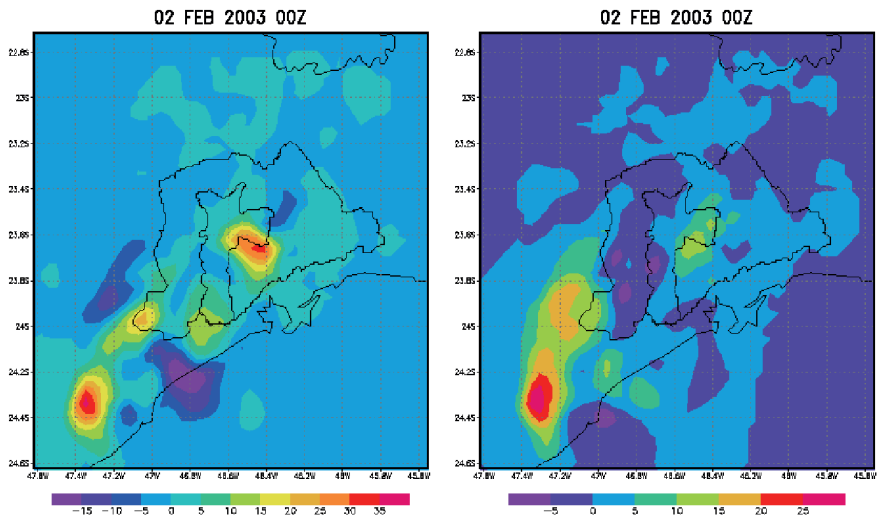
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ILHA DE CALOR URBANA E DA TSM NO CAMPO DE PRECIPITAÇÃO.

Nesta seção, são apresentadas as análises dos fatores associados à formação e desenvolvimento do evento de tempestade severa ocorrido no dia 01 de fevereiro de 2003 no que diz respeito ao total de precipitação acumulado durante as 24 horas de simulação do evento.

Utilizando-se das equações 1.1-1.3, obtêm-se os efeitos principais de cada um dos fatores e da interação entre os mesmos. A Figura A6.4 apresenta os campos obtidos após a aplicação dessas equações para o experimento 1, em que a temperatura da superfície do mar foi aumentada em 2°C.

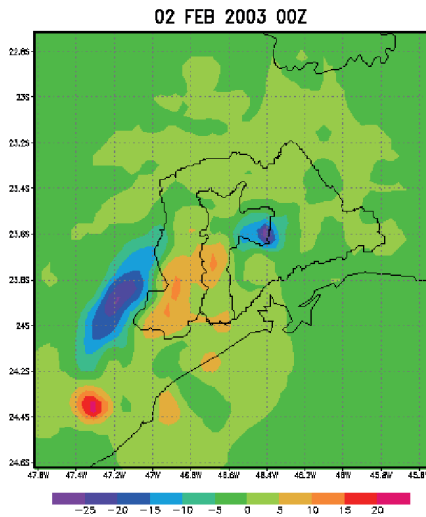
Na Figura A6.4a verificamos que o efeito da ilha de calor é observado não somente na região urbana da RMSP, onde é observada uma contribuição positiva para o total de precipitação acumulado, mas também em regiões remotas onde são observadas alternâncias entre contribuições positivas e negativas. Efeito semelhante é observado com relação à temperatura da superfície do mar, conforme se pode observar na Figura A6.4b. Nota-se que esses dois fatores desempenham papel importante no campo de precipitação acumulado e que as amplitudes das contribuições devidas à ilha de calor urbana são maiores do que as de temperatura da superfície do mar. A Figura A6.4c mostra que a interação entre os dois fatores é da mesma ordem que a contribuição individual de cada um dos fatores. Este fato ressalta a importância da análise conjunta das influências exercidas por esses fatores, pois os mesmos interagem entre si e uma análise isolada pode levar a interpretações incorretas. Dessas figuras nota-se o caráter altamente não linear envolvido nesse processo, o que dificulta sobremaneira o isolamento de cada fator envolvido.

O mesmo conjunto de equações foi aplicado ao experimento 2, em que a temperatura da superfície do mar foi diminuída em 2°C. A Figura A6.5 apresenta os resultados obtidos.



(a)

(b)



(c)

Figura A6.4: Termos das equações 1.1-1.3, aplicados ao experimento 1, ilustrando os efeitos principais da ilha de calor (a), da temperatura da superfície do mar (b) e da interação entre esses efeitos (c) sobre o total de precipitação acumulado (mm) após 24 horas de integração.

ARQUIVO

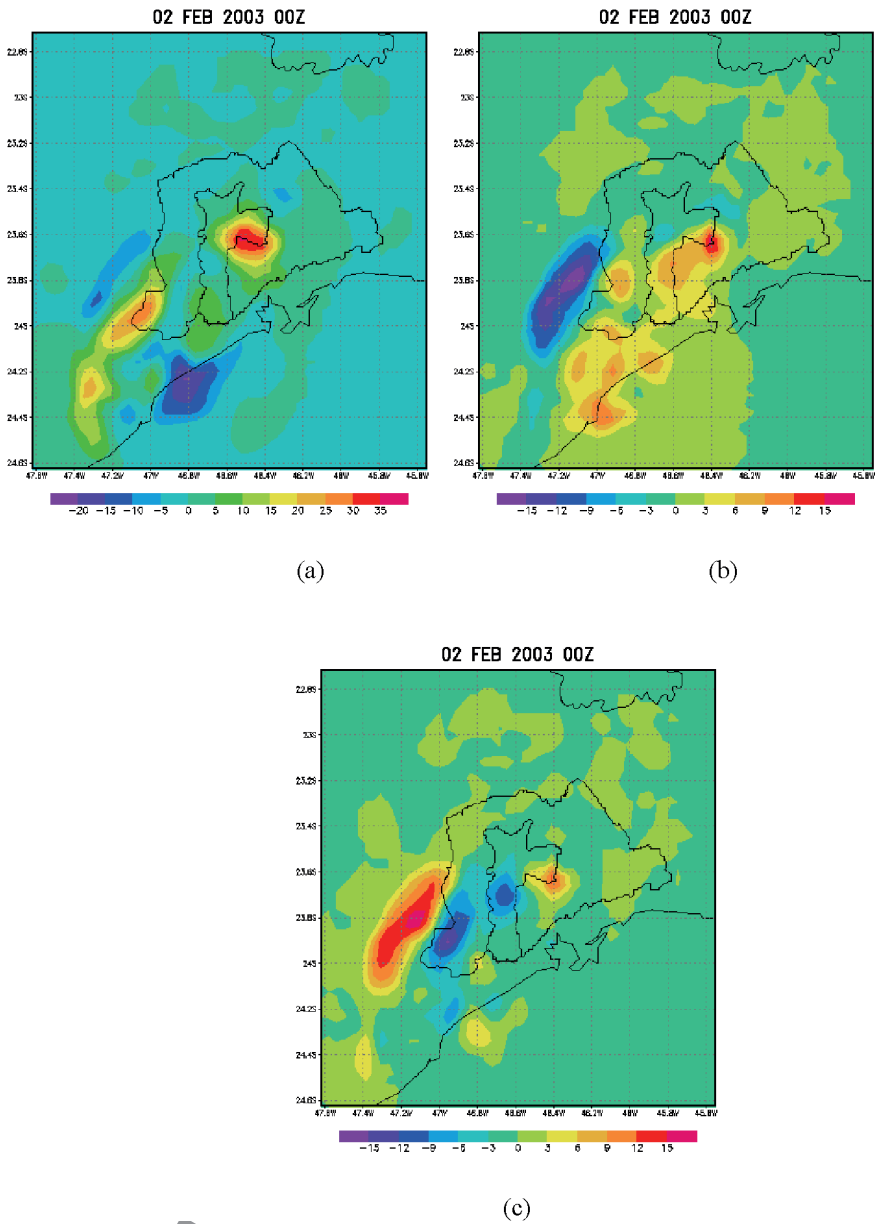


Figura A6.5: Mesmo que na Figura A.6.4, mas para o experimento 2.

Na Figura A6.5 verifica-se um padrão bastante semelhante àquele obtido no experimento 1. Porém, existe uma pequena diferença nas amplitudes e na localização dos centros de influência. Isto mostra, mais uma vez, que a influência da ilha de calor depende da temperatura da superfície do mar envolvida. A maior diferença com relação ao experimento 1 é observada no campo da contribuição da temperatura da superfície do mar (Figura A6.5b). Verifica-se que temperaturas da superfície do mar mais baixas exercem influência positiva em grande parte da RMSP, ficando os núcleos de influência negativa corrente abaixo dessa região. Observa-se também que esses núcleos negativos são mais intensos que aqueles observados no experimento 1.

A conclusão a partir da análise dos dois fatores, urbanização e temperatura da superfície do mar é que ambos, assim como suas interações, são causas plausíveis para a formação de chuvas extremas na RMSP.

MUDANÇAS DE PADRÕES ATMOSFÉRICOS ASSOCIADOS A CHUVA DIÁRIA ENTRE CLIMA PRESENTE E PROJEÇÕES FUTURAS

Tendo em vista a evolução das chuvas extremas diárias, coloca-se a seguinte questão: deveria ser esperada a continuidade dessa tendência nas próximas décadas ou seria observado outro comportamento?

A chuva é reconhecidamente uma das variáveis mais difíceis de simular. Randall *et al.* (2003) discutem o problema, que permanece ainda o mesmo nos dias de hoje, e o atribuem a dificuldades em parametrizar a chuva em modelos climáticos.

Para minimizar o problema da representatividade da chuva produzida por modelos climáticos foi feita uma análise das condições termodinâmicas da atmosfera associadas a formação de chuvas torrenciais. Essas condições são tradicionalmente sintetizadas em índices que utilizam variáveis meteorológicas que são, segundo Randall *et al.* (2003) melhor simuladas do que a chuva.

Foi então feita uma análise das condições termodinâmicas medidas através de índices associados a chuvas no clima do passado até o presente e também no futuro.

DADOS UTILIZADOS

Foram usados dados da simulação regionalizada usando o modelo ETA CPTEC (Chou *et al.*, 2012; Marengo *et al.*, 2012). As condições de contorno para o modelo regional foram obtidas do modelo britânico HadCM3, utilizado para a elaboração de cenários para o IPCC de 2007.

Como base observacional foram usados dados de radiossondagem no período de 1973 a 1988, realizadas no aeroporto de Congonhas (coordenadas 23,61° S, 43,65° W, localizado a 802 m de altitude).

Os dados de reanálise do CFSR (sigla para Climate Forecast System Reanalysis) analisados por Quadro et al (2012) mostram um bom desempenho na representação de observações na América do Sul. Estes dados estão disponíveis em <http://nomads.ncdc.noaa.gov/modeldata/>.

Da mesma forma, foram obtidos os dados do projeto CMIP5 (Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados - Fase 5, ou Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5, na sigla em inglês), disponível em http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_portal.html. Estas rodadas formam a base para o novo relatório do IPCC publicado em 2013-2014. Foi escolhido o modelo HadGEM2-CC (Modelo ambiental global 2 - ciclo de carbono, ou Hadley Global Environment Model 2 - Carbon Cycle, em inglês) (HadGEM2 Development Team, 2011). O modelo analisado simula a situação atmosférica futura considerando forçantes radiativas em diferentes cenários de emissões. Este modelo considera apenas o aumento do carbono na atmosfera, sem considerar gases como o metano e o ozônio, por exemplo. Segundo Yin *et al.* (2012), as simulações dos modelos do Hadley Center são as que melhor representam o clima presente na América do Sul. Assim, o HadGEM-CC foi usado para o clima presente e também para o clima futuro.

Neste trabalho, foram utilizados os cenários descritos em Moss *et al.* (2010): RCP 8.5, que considera um aumento da forçante radiativa, atingindo 8,5 W/m² até 2100 e RCP 4.5, que considera uma estabilização da forçante radiativa sem ultrapassar 4,5 W/m² até 2100.

METODOLOGIA

Para sintetizar as condições atmosféricas associadas à formação de chuva foram utilizados os chamados índices de instabilidade (Silva Dias, 2000). Especificamente foram usados os índices K e TT cujo cálculo é apresentado no Apêndice.

Os dois índices utilizam dados de temperatura e umidade da atmosfera desde os níveis mais baixos até os níveis médios com a diferença que o índice K destaca a presença de umidade em todos os níveis e reflete as condições favoráveis a chuvas abundantes e o índice TT, por não destacar a umidade nos níveis médios, reflete condições para formação de chuvas mais severas, eventualmente levando a extremos. A diferença é basicamente na qualidade e quantidade da chuva, sendo que o índice K reflete grandes acumulados e intervalos de tempo mais longos, da ordem de várias horas, e

o índice TT enfoca chuvas com maior grau de intensidade em curto espaço de tempo, da ordem de poucas horas.

A análise dos índices K e TT foi baseada na identificação de seus valores extremos para cada mês. A evolução dos extremos foi analisada tanto no clima presente, século XX, como nos cenários do clima futuro no século XXI. O foco é no período chuvoso em São Paulo que vai de outubro a março. A evolução da frequência dos extremos dos índices K e TT visa apontar possíveis diferenças entre o passado e o futuro com suas possíveis implicações no gerenciamento dos recursos hídricos.

Para cada mês do período chuvoso e ao longo dos anos em análise foram identificados os 5 maiores valores mensais de cada índice e elaborado um histograma de frequências em intervalos pré-definidos. A seguir foi feito um ajuste da função generalizada de valores extremos (GEV – Generalized Extreme Value) descrita em Coles (2001). O ajuste da GEV fornece o valor mais frequente dos extremos (ou mediana) μ , o parâmetro de dispersão dos dados σ e o parâmetro de forma κ . O nível de confiança do ajuste ao nível de 95% também foi calculado como indicado em Coles (2001).

Para análise da evolução temporal dos parâmetros da GEV foram feitas análises em grupos de 5 anos, tanto para o clima presente como para o clima futuro.

RESULTADOS PARA O CLIMA ATUAL

Os dados sobre extremos dos índices K e TT para o clima atual foram calculados usando as diferentes fontes de dados indicados no item 3.1. Os dados de radiossonda podem ser considerados como referência por serem uma observação *in loco* versus os demais (ETA, Reanálise e HadGEM2-CC), que são informações geradas por modelos numéricos. Tradicionalmente considera-se que os dados de radiossonda representam uma área de poucas centenas de quilômetros ao redor do ponto de observação. Os demais dados são representativos de médias feitas de valores em ponto de grade ao redor de São Paulo. A Figura A6.6 compara essas diversas fontes de observação através do ajuste da função GEV aos histogramas de frequência de ocorrência de extremos dos índices. Nota-se, no caso dos dois índices, que os modelos tendem a superestimar o valor mais frequente dos índices de instabilidade, tem dispersão de dados um pouco menor e forma semelhante.

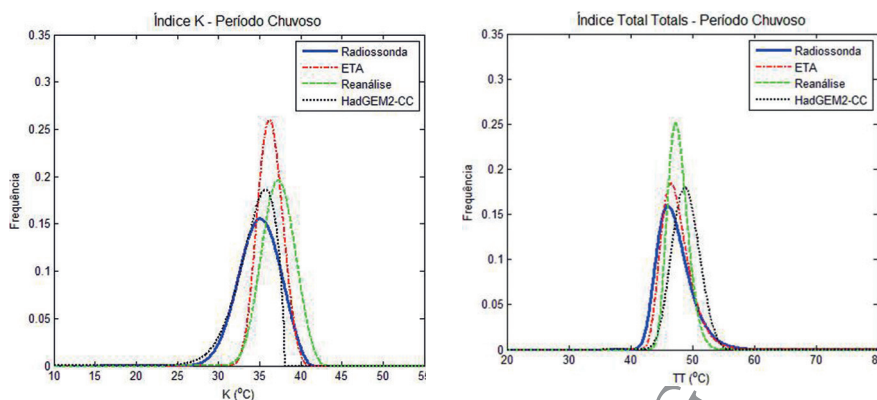


Figura A6.6: Ajuste da função GEV aos histogramas de frequência de extremos dos índices de instabilidade calculados com base em dados de diferentes fontes para o clima atual. À esquerda para o índice K e à direita para o índice TT.

A evolução temporal dos índices no clima do século XX pode ser vista na Figura A6.7 onde está o gráfico do parâmetro μ , ou seja, da mediana ou valor mais frequente dos extremos. Cada um dos pontos das curvas corresponde a 5 anos conforme descrito anteriormente. Nota-se que para o caso do índice K a evolução temporal do HadGEM2-CC tem valores bastante próximos da estimativa baseada em dados de radiossonda (indicada por Radiossonda nas figuras) enquanto que tanto ETA como CFSR superestimam, mas tendem a apresentar um máximo no mesmo quinquênio, centrado em 1983, enquanto o HadGEM2-CC tem um mínimo local. A maioria dos modelos acoplados exhibe variação inter-anual irrealistas na temperatura e umidade específica em baixos níveis. Tais variações podem influenciar o cálculo dos índices de estabilidade.

No caso do índice TT ocorre novamente a mesma semelhança nos máximos entre Radiossonda, ETA e CFSR, correspondendo a um mínimo do HadGEM2-CC. Esta diferença de fase pode ser devida ao fato que o HadGEM2-CC é um modelo acoplado oceano atmosfera iniciado no fim do século IX (HadGEM2 Development Team, 2011) e portanto a fase das oscilações decenais pode ser diferente da fase observada. Neste caso o HadGEM2-CC superestima as estimativas via dados de radiossonda. A superestimativa do HadGEM2-CC pode estar parcialmente associada ao viés positivo do modelo na simulação da temperatura e umidade em baixos níveis com relação à reanálise (e.g. Carvalho e Jones 2013).

Ao comparar as tendências dos índices K e TT com as tendências apresentadas na Figura A6.1, para o número de dias por ano, na estação chuvosa e no total anual, em que o total acumulado diário excede 30 mm e 50 mm, respectivamente, nota-se que o índice K – tanto nas Radiossondas como no HadGEM2-CC, apresenta tendência de aumento no período do clima

presente enquanto o TT varia, porém, sem uma tendência bem definida. Os resultados indicam que os valores extremos do índice K representam melhor a evolução dos valores extremos das chuvas acumuladas diárias do que o índice TT e por essa razão será usado o índice K na análise do clima futuro. A tendência positiva na umidade e temperatura em 850 hPa sobre a América do Sul tropical, sobretudo nas últimas décadas, aparece como uma característica robusta observada tanto com reanálises quanto nas rodadas históricas dos modelos CMIP5 (Carvalho e Jones 2013). Estas mudanças podem ter um papel importante para as tendências observadas no índice K e, conseqüentemente, nas chuvas extremas.

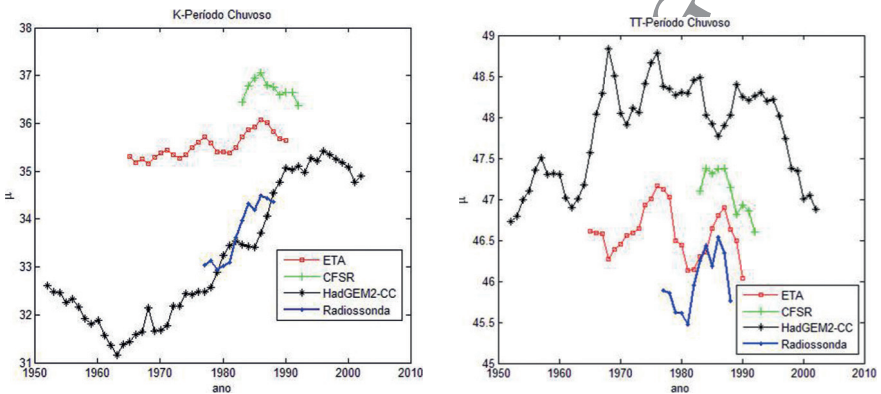


Figura A6.7: Evolução temporal dos valores mais frequentes dos extremos (parâmetro μ) dos índices de instabilidade K (à esquerda) e TT (à direita) ao longo dos períodos de dados disponíveis para as diferentes fontes.

ANÁLISE DAS PROJEÇÕES PARA O CLIMA FUTURO

Para análise do clima futuro utilizou-se com maior ênfase o modelo HadGEM2-CC por ter sido o que melhor reproduziu as observações da evolução do índice K no clima presente. No entanto, foi incluído também o modelo ETA regionalizado com as condições de fronteira da versão anterior do modelo do Hadley Center.

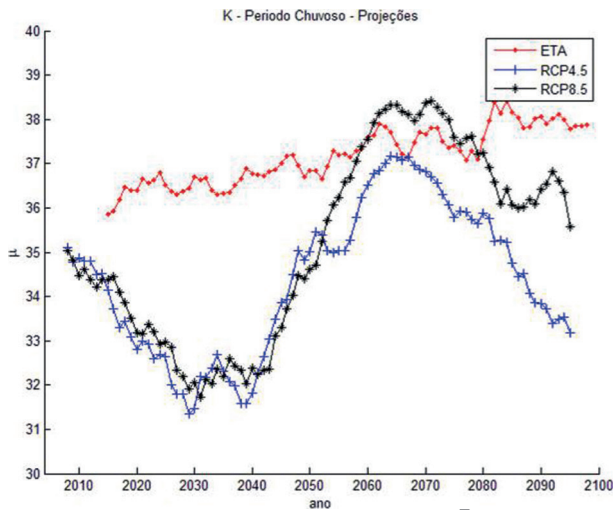


Figura A6.8: Mediana dos extremos (μ) do índice K para o clima futuro para o ETA e dois cenários de emissões do HadGEM2-CC, RCP 4.5 e RCP 8.5.

Nota-se inicialmente, na figura A6.8, que os dois cenários do HadGEM2-CC apresentam uma oscilação multidecadal com período da ordem de 70 anos sendo que a amplitude é um pouco maior para o cenário de maiores emissões. Os dois cenários de emissões foram iniciados no século XX na mesma data e são referidos como r1p1i1 (Taylor *et al.*, 2012). No entanto, estão disponíveis outras rodadas começando em datas ligeiramente diferentes ainda no século XX. A Figura A6.9 compara duas projeções com emissões RCP 8.5 iniciadas em datas distintas, e referidas como r1p1i1 e r2p1i1 (Taylor *et al.*, 2012).

Nota-se que as duas projeções na Figura A6.9 iniciam o século XXI ligeiramente diferentes em função da diferente data de início seguindo o que tipicamente ocorre em sistemas caóticos, onde pequenas diferenças nas condições iniciais podem levar a soluções distintas, condição esta destacada no trabalho clássico de Lorenz (1963). No caso a diferença se apresenta como uma diferença de fase de 180 graus na oscilação com período de 70 anos. Desta forma há uma grande incerteza quanto à épocas de maiores ou menores valores dos extremos do índice. Ambos apresentam uma ligeira tendência linear de aumento, mas essa tendência é muito menor que a amplitude da oscilação.

Voltando à Figura A6.8, o modelo ETA não apresenta a oscilação de várias décadas, tem oscilações interanuais e tendência de aumento ao longo do século XXI. A diferença entre o ETA e as projeções do HadGEM2-CC indicam basicamente um diferente acoplamento com os oceanos que nos modelos numéricos são responsáveis por oscilações de longo período. A

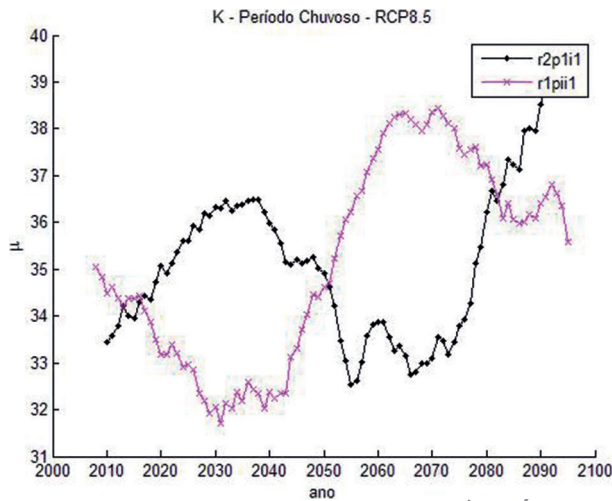


Figura A6.9: Mediana dos extremos (μ) do índice K para o clima futuro para cenário de emissões RCP 8.5 do modelo HadGEM2-CC iniciado em duas datas distintas no século XX (r1p1i1 e r2i1p1).

questão é se essa oscilação, com período de 7 décadas, é realista ou um artefato das simulações. Esta oscilação de 70 anos também aparece na simulação do clima do século XX mostrado na Figura A6.7. Poderia esta oscilação ser parte da Oscilação Inter-Decenal do Pacífico (Power *et al.*, 1999)? Seria um período associado à circulação meridional do oceano Atlântico (Hurrell, 1995)? Essas questões devem ser exploradas em trabalhos futuros. O que chama a atenção comparando as amplitudes nas Figuras A6.7 e A6.8 é que os valores máximos e mínimos denotam uma amplitude maior no século XXI quando comparados com o século XX.

CONCLUSÕES

Mostrou-se que durante o século XX o número de dias com valores extremos de chuvas acumuladas diárias na cidade de São Paulo aumentou. Causas plausíveis são a evolução climática global e as condições locais relativas à urbanização e temperatura da superfície do mar na costa da região Sudeste. Valores extremos do índice K, indicador de chuvas abundantes, podem ser usados para representar a tendência de aumento das chuvas na RMSP. Desta forma utilizaram-se projeções de clima futuro para avaliar o que pode acontecer no século XXI.

Dadas as incertezas nas projeções climáticas, em particular no que se refere à intensidade da precipitação diária (Carvalho e Jones, 2013) pode-se concluir que haverá décadas com valores extremos passando por máximos e mínimos com amplitude maior que no século XXI. Não é possível precisar

quais décadas serão estas. Há também uma tendência linear de aumento dos valores extremos do índice K, porém, essa tendência é bem menor que a variabilidade multidecenal.

Pode-se concluir que esse aumento dos valores extremos provocará impactos na disponibilidade da água na região metropolitana de São Paulo que durarão por volta de 3 a 4 décadas alternando épocas de maiores acumulados com épocas de menores acumulados diários. Devido à longa duração dos eventos isso indica uma necessidade de adaptação da infraestrutura tanto para enfrentar décadas de carestia como décadas de excesso. Olhar para épocas no passado, durante o século XX e início do século XXI, em que o mesmo ocorreu, pode ser um exercício e um aprendizado útil para o planejamento estratégico das próximas décadas.

Dado que parte das causas da evolução das chuvas está ligada a um fator antrópico local que é a urbanização, pode-se considerar alternativas para amenizá-lo. O fator urbanização aparece de diferentes formas, mas para o caso das chuvas um dos principais aspectos é a formação de uma ilha de calor associada a temperaturas mais altas na região urbana quando comparada com as regiões rurais que a cercam. Dado que altas temperaturas estão associadas à presença de edifícios e asfalto, uma possível opção é aumentar os jardins, praças e a arborização de ruas e avenidas. A vegetação evapo-transpira e assim refresca a sua vizinhança e desta forma um menor impacto nas chuvas seria observado. Da mesma forma a presença de áreas verdes reduz o escoamento superficial que leva a eventuais enchentes e alagamentos.

APÊNDICE

O cálculo dos índices K e TT segundo Silva Dias (2000) é feito através das seguintes expressões:

$$K = (T_{850} - T_{500}) + TD_{850} - (T_{700} - TD_{700})$$

$$TT = T_{850} + TD_{850} - 2T_{500}$$

Nestas expressões T é temperatura e TD temperatura do ponto de orvalho em graus C. Os subíndices 850, 700 e 500 se referem ao nível de pressão atmosférica em hPa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, ao CNPq e à USP pelo financiamento de diferentes partes do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS NETO B.; SCARMINO, I. S.; BRUNS, R. E. *Planejamento e otimização de experimentos*. Segunda Edição. Editora da Unicamp, 1995. 299 pp.

CARRIÓ, G., W. R. COTTON, Y. Y. CHENG. Effects of the urban growth of Houston on convection and precipitation. Part I: the August 2000 case. *Atmos. Res.*, v. 96, p. 560-574. 2010

CARRIÓ, G. G., COTTON, W. R. Urban growth and aerosol effects on convection over Houston. Part II: Dependence of aerosol effects on instability. *Atmospheric Research*, v. 102, p. 167-174, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.06.022>. 2011

CARVALHO, L. M. V., JONES, C., SILVA, A. E., LIEBMANN, B., SILVA DIAS, P. L. The South American Monsoon System and the 1970s climate transition. *International Journal of Climatology*, v. 31, p. 1248-1256, doi: [10.1002/joc.2147](https://doi.org/10.1002/joc.2147), 2011.

CARVALHO, L. M. V., C. JONES, B. LIEBMANN. Extreme precipitation events in Southeastern South America and large-scale convective patterns in South Atlantic Convergence Zone. *J. Climate*, v. 15, p. 2377-2394, 2002.

CARVALHO, L. M. V., C. JONES. CMIP5 Simulations of Low-Level Tropospheric Temperature and Moisture over Tropical Americas. *J. Climate*, v. 26, p. 6257-6286, 2013.

CHOU, S., MARENGO, J., LYRA, A., SUEIRO, G., PESQUERO, J., ALVES, L., KAY, G., BETTS, R., CHAGAS, D., GOMES, J., BUSTAMANTE, J., TAVARES, P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate Dynamics*, v. 38, p. 635-653, doi: [10.1007/s00382-011-1002-8](https://doi.org/10.1007/s00382-011-1002-8). 2012.

CLIMANÁLISE 2003. *Boletim de Monitoramento e Análise Climática*. v. 18. nº 1, 2003. (disponível online: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/0103/index.html>)

COLES, S. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. 1a Ed. ed. *Springer*, 2001, 224 pp.

DUFEK, A. S., AMBRIZZI, T. Precipitation variability in São Paulo State, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 93, p. 167-178, doi: [10.1007/s00704-007-0348-7](https://doi.org/10.1007/s00704-007-0348-7), 2008.

FREITAS, E. D. Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes. São Paulo, 2003. 157p. *Tese de doutoramento do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo*, 2003.

FREITAS, E.D. ROZOFF, C.M. COTTON, W.R. DIAS, P.L.S. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of Sao Paulo, Brazil. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 122, p.43-65, doi:10.1007/s10546-006-9091-3, 2007.

FREITAS, E.D., SILVA DIAS, P.L., CARVALHO, V.S.B., MAZZOLI, C.R., MARTINS, L.D., MARTINS, J.A., ANDRADE, M.F. Factors involved in the formation and development of severe weather conditions over the Megacity of São Paulo, 89th American Meteorological Society Meeting. AMS, Phoenix, AZ, 2009.

FREITAS, S. R., LONGO, K. M., SILVA DIAS, M. A. F., CHATFIELD, R., SILVA DIAS, P., ARTAXO, P., ANDREAE, M. O., GRELL, G., RODRIGUEZ, L. F., FAZENDA, A., PANETTA, J. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) *Part 1: Model description and evaluation. Atmospheric Chemistry and Physics*, v.9, p.2843 - 2861, 2009.

HAYLOCK, M.R., PETERSON, T.C., ALVES, L.M., AMBRIZZI, T., ANUNCIACÃO, Y.M.T., BAEZ, J., BARROS, V.R., BERLATO, M.A., BIDEGAIN, M., CORONEL, G., CORRADI, V., GARCIA, V.J., GRIMM, A.M., KAROLY, D., MARENGO, J.A., MARINO, M.B., MONCUNILL, D.F., NECHET, D., QUINTANA, J., REBELLO, E., RUSTICUCCI, M., SANTOS, J.L., TREBEJO, I., VINCENT, L.A. Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, v. 19, p.1490-1512, doi:10.1175/JCLI3695.1, 2006.

HadGEM2 Development Team. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model Climate configurations, *Geosci. Model Dev.* v. 4, p. 723-757, doi:10.5194/gmd-4-723-2011, 2011.

HURRELL, J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation. *Science* 269, doi:10.1126/science.269.5224.676., 1995.

IPCC 2007. *Climate Change 2007: 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. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm, 2007.

IPCC 2013 *The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. WMO, UNEP. <http://www.climatechange2013.org/>, 2013

LIEBMANN, B., JONES, C., CARVALHO, L.M.V. Interannual Variability of Daily Extreme Precipitation Events in the State of São Paulo, Brazil. *Journal of Climate*, v. 14, p. 208-218, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<0208:IVOD EP>2.0.CO;2., 2001.

LORENZ, E.N., Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 20, p. 130-141, doi:10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2, 1963.

MANTUA, N.J., HARE, S.R., ZHANG, Y., WALLACE, J.M., FRANCIS, R.C. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, p. 1069-1079, doi:10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2.1997.

MARENGO, J.A., CHOU, S.C., KAY, G., ALVES, L.M., PESQUERO, J.F., SOARES, W.R., SANTOS, D.C., LYRA, A.A., SUEIRO, G., BETTS, R., CHAGAS, D.J., GOMES, J.L., BUSTAMANTE, J.F., TAVARES, P. 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 Paraná River basins. *Climate Dynamics*, v. 38, p. 1829-1848, doi:10.1007/s00382-011-1155-5. 2012.

MOSS, R.H., EDMONDS, J.A., HIBBARD, K.A., MANNING, M.R., ROSE, S.K., VAN VUUREN, D.P., CARTER, T.R., EMORI, S., KAINUMA, M., KRAM, T., MEEHL, G.A., MITCHELL, J.F.B., NAKICENOVIC, N., RIAHI, K., SMITH, S.J., STOUFFER, R.J., THOMSON, A.M., WEYANT, J.P., WILBANKS, T.J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, v. 463, p. 747-756, doi:10.1038/nature08823, 2010.

PEREIRA FILHO, A. J.; HAAS, R. & AMBRIZZI, T. Caracterização de eventos de enchente na bacia do Alto Tietê por meio do radar meteorológico e da modelagem numérica de mesoescala. *Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Foz do Iguaçu, Paraná, 04 a 11 de Agosto de 2002 (CDROM).

PEREIRA FILHO, A.J., SANTOS, P.M., CAMARGO, R., FESTA, M., FUNARI, F.L., SALUM, S.T., OLIVEIRA, C.T., SANTOS, E.M., LOURENÇO, P.R., SILVA, E.G., GARCIA, W., FIALHO, M.A. Caracterização do Clima e sua Evolução na Região Metropolitana de São Paulo. In: FILHO, P., SANTOS, M.D., XAVIER. (Eds.), 2007 "Evolução do

Tempo e do Clima na Região Metropolitana de São Paulo”. *Linear B*, pp. 99-120.

POWER, S., CASEY, T., FOLLAND, C., COLMAN, A., MEHTA, V. Inter-decadal modulation of the impact of ENSO on Australia. *Climate Dynamics* v. 15, p. 319-324, doi:10.1007/s003820050284, 1999. Quadro, M. F. L. , E. H. Berbery, M. A. F. Silva Dias, D. L. Herdies, L. G. G. Gonçalves. *The atmospheric water cycle over South America as seen in the new generation of global reanalyses AIP Conf. Proc.* v. 1531, p. 732-735; doi:<http://dx.doi.org/10.1063/1.4804874>, 2012

RANDALL, D., KHAIROUTDINOV, M., ARAKAWA, A., GRABOWSKI, W. Breaking the Cloud Parameterization Deadlock. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 84, p. 1547-1564, doi:10.1175/BAMS-84-11-1547. 2003.

SILVA, A.E., CARVALHO, L.M.V. Large-scale index for South America Monsoon (LISAM). *Atmospheric Science Letters*, v. 8, p. 51-57, doi:10.1002/asl.150, 2007

SILVA DIAS, M.A.F. Índices de instabilidade para previsão de chuva e tempestades severas. <http://www.master.iag.usp.br/ind.php?inic=00&pos=1&prod=ensino>, 2000.

SILVA DIAS, M.A.F., DIAS, J., CARVALHO, L.M.V., FREITAS, E.D., SILVA DIAS, P.L. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. *Climatic Change*, v. 116, p.705-722, doi:10.1007/s10584-012-0504-7, 2013

SREX. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. *Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. WMO, UNEP.2011.

STEIN, U. e ALPERT, P. Factor separation in numerical simulations. *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 50, p. 2107-2115, 1993

TAYLOR, K.E., BALAJI, V., HANKIN, S., JUCKES M. , LAWRENCE, B., PASCOE, S. *CMIP5 Data Reference Syntax (DRS) and Controlled Vocabularies*. http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/cmip5_data_reference_syntax.pdf, 2012.

XAVIER, T.M.S., XAVIER, A.F.S., SILVA DIAS, M.A.F. Evolução da precipitação diária num ambiente urbano: o caso da cidade de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 9, p. 44-53, 1994.

YIN, L., FU, R., SHEVLIAKOVA, E., DICKINSON, R. How well can CMIP5 simulate precipitation and its controlling processes over tropical South America? *Climate Dynamics*, p. 1-17. doi:10.1007/s00382-012-1582-y, 2012.

A7. EVOLUÇÃO CLIMÁTICA E OCEANOGRÁFICA NO BRASIL E NO OCEANO ADJACENTE DURANTE O PLEISTOCENO SUPERIOR E O HOLOCENO: UMA ATUALIZAÇÃO

ADRIANA RODRIGUES PERRETTI^{1*}, NICOLÁS MISAILIDIS STRÍKIS^{2*}, VALDIR FELIPE NOVELLO^{2*}, CRISTIANO MAZUR CHIESSI^{1**}, FRANCISCO WILLIAM DA CRUZ JÚNIOR^{2**}

1. INTRODUÇÃO

Entender os ciclos naturais de variabilidade climática é de fundamental importância para compreender como as forçantes antrópicas podem afetar o sistema climático global. Por sua vez, compreender como estas forçantes operam sobre o clima é essencial para que medidas de adaptação e mitigação apropriadas possam ser elaboradas e implementadas. Para avaliar o efeito antrópico sobre o clima e sobre os ecossistemas é necessário conhecer as oscilações naturais do sistema climático em diversas escalas temporais (*i.e.*, interanual, multi-decenal, secular, milenar e variações orbitais). Dentre os diferentes ciclos naturais de oscilação climática, as variações em escala orbital figuram como um dos ciclos mais robustos na modulação do clima global (*e.g.*, Hays, Imbrie e Shackleton, 1976; Berger e Loutre, 1991; Cruz *et al.*, 2006). Em paleoclimatologia o termo “escala orbital” é usualmente empregado em referência às oscilações climáticas decorrentes das variações nos parâmetros orbitais da Terra, também chamados de “ciclos de Milankovitch” (*e.g.*, Milankovitch, 1920; Berger, 1992). Os ciclos de Milankovitch compreendem três ciclos orbitais: (i) precessão (periodicidade de 23 mil anos (ka)); (ii) obliquidade (periodicidade de 41 ka); e (iii) excentricidade (periodicidade próxima de 120ka). Cada um deles afeta de maneira diferente a distribuição da insolação sobre a superfície da Terra. Conforme constatado a partir de reconstituições de temperatura

1. Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo, EACH/USP.

2. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo IGC/USP.

* Estes autores contribuíram igualmente para este trabalho.

** Para informações adicionais, favor contatar um destes autores.

da atmosfera e da superfície do mar, com base em análises isotópicas de testemunhos de gelo da Antártica (*e.g.*, Jouzel *et al.*, 2007) e de testemunhos sedimentares marinhos (*e.g.*, Lisiecki e Raymo, 2005), as glaciações do Quaternário (últimos 2,58 milhões de anos da história geológica da Terra) foram fortemente moduladas pelos ciclos de Milankovitch. Durante os últimos 900ka, cada ciclo glacial apresentou duração aproximada de 120ka (sugerindo a influência dominante das variações na excentricidade da órbita da Terra), enquanto que o padrão anterior de oscilação entre períodos glaciais e interglaciais foi de 41ka (controlado predominantemente pelas variações na obliquidade do eixo da Terra).

Se por um lado os ciclos orbitais de excentricidade e obliquidade exercem um papel importante no controle das temperaturas das zonas subtropicais e de altas latitudes, nos trópicos, é o ciclo de precessão que apresenta maior expressão, justamente por alterar o gradiente de temperatura entre os trópicos do Hemisfério Norte e Sul, com impacto direto no posicionamento latitudinal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (*e.g.*, Kutzbach, 1981; Cruz *et al.*, 2005; Ruddiman, 2006). A ZCIT é uma banda de nebulosidade que se desenvolve sobre os oceanos e se localiza próximo da linha do equador, formada pelo desenvolvimento de uma zona de baixa pressão gerada pela ascensão de massas de ar quente e úmido (Figura A7.1), ela também é a principal feição convectiva da maior parte dos sistemas de monções. Ao afetar o posicionamento médio da ZCIT os ciclos orbitais afetam uma parte importante do clima e da hidrologia dos continentes.

Nos últimos anos, foram publicadas várias reconstituições paleoclimáticas abordando o continente sul americano e o Oceano Atlântico adjacente com alta resolução temporal. O subgrupo “Paleoclima” do Núcleo de Apoio à Pesquisa – Mudanças Climáticas da Universidade de São Paulo contribuiu significativamente para isto. Baseadas em séries isotópicas de espeleotemas e nas análises de diversos parâmetros biogeoquímicos em sedimentos marinhos, esses registros trouxeram constatações importantes a respeito do impacto das mudanças climáticas pretéritas em diferentes escalas temporais no clima das zonas tropical e subtropical da América do Sul, assim como da porção sul do oceano Atlântico. Neste capítulo, foram sintetizados alguns trabalhos recentes publicados por membros do subgrupo “Paleoclima” do Núcleo de Apoio à Pesquisa – Mudanças Climáticas da Universidade de São Paulo e serve como uma atualização nesta área da ciência, que evolui de forma acelerada.

Estas reconstituições podem auxiliar significativamente no entendimento dos processos associados às mudanças climáticas atuais e futuras, pois permitem: (i) separar e compreender os processos naturais dos processos antrópicos; (ii) validar os modelos numéricos utilizados em projeções climáticas futuras; e (iii) conhecer e avaliar as possíveis respostas do sistema

climático e dos ecossistemas frente a modificações climáticas específicas como o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera terrestre.

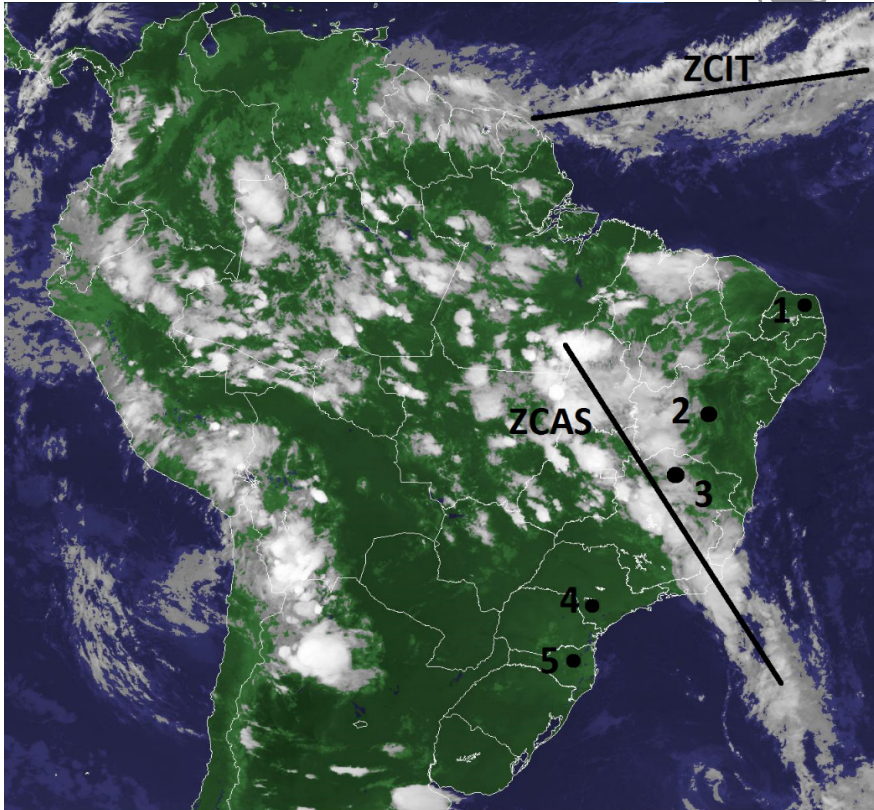


Figura A7.1: Imagem do satélite GOES-INPE durante o verão austral de 2011, com a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), (<http://satelite.cptec.inpe.br/home/>). 1) Registro de espeleotemas do Rio Grande do Norte (Cruz *et al.*, 2009); 2) Registro de espeleotemas da Bahia (Novello *et al.*, 2012); 3) Registro de espeleotemas de Minas Gerais (Stríkis *et al.*, 2011); 4) Registro de espeleotemas de São Paulo (Vuille *et al.*, 2012); 5) Registro de espeleotemas de Santa Catarina (Cruz *et al.*, 2005).

2. REGISTROS PALEOCLIMÁTICOS CONTINENTAIS E OCEÂNICOS

Em paleoclimatologia, para reconstituirmos um parâmetro que seja climático (*e.g.*, temperatura, precipitação) ou ambiental (*e.g.*, salinidade, pH) são utilizados índices biogeoquímicos e isotópicos a partir dos quais é possível avaliar, a depender do índice, qualitativamente ou

quantitativamente, as variações de tais parâmetros no registro geológico (e.g., Wefer *et al.*, 1999; Hillaire-Marcel e de Vernal, 2007). Nesse sentido, o índice paleoclimático ou paleoambiental pode ser resumido como um referencial utilizado para acessar as variações dos parâmetros climáticos e ambientais do meio que, de alguma forma, foram preservadas no registro geológico.

Dentre os registros paleoclimáticos continentais, os espeleotemas precisamente datados pelo método U/Th destacam-se na reconstituição dos padrões de variabilidade de chuva. Eles são formados a partir da água da chuva que percola a rocha carbonática da caverna saturando-se em carbonato de cálcio (CaCO_3) e precipitando em forma de espeleotemas no seu interior, sendo a relação isotópica do oxigênio do precipitado muito próxima a da água das chuvas. No Brasil, assim como em outras áreas sob influência de grandes processos convectivos, uma relação em função da razão entre os isótopos de oxigênio de massa 18 e 16, descrita pela notação $\delta^{18}\text{O}$, reflete a quantidade de chuva local (*i.e.*, *amount effect*) de forma que valores mais negativos de $\delta^{18}\text{O}$ são representativos de maior quantidade de chuva e vice-versa. Com isso, a partir da obtenção de perfis de $\delta^{18}\text{O}$ em estalagmites que apresentam crescimento contínuo, pode-se reconstituir a variabilidade da chuva ao longo do tempo, em uma escala que pode ir de anual a centenas de milhares de anos dependendo do tamanho e da taxa de crescimento da amostra (Clark e Fritz, 1997; Lachniet, 2009).

Os registros provenientes de testemunhos sedimentares marinhos (*i.e.*, longas amostras retiradas do fundo oceânico) guardam diferentes informações sobre o oceano e o clima do passado. Estas informações estão armazenadas de diferentes formas e são geralmente datadas pelo método do radiocarbono (^{14}C) em material carbonático fóssil. Cada um destes parâmetros que ficou preservado no registro sedimentar marinho nos permite reconstituir uma ou mais característica dos oceanos (e.g., Chiessi *et al.*, 2007; Groeneveld e Chiessi, 2011) e/ou do clima continental (e.g., Govin *et al.*, 2012), sendo que, quanto maior o volume de material sedimentar depositado no fundo dos oceanos em função do tempo, melhor a resolução temporal do registro (e.g., Voigt *et al.*, 2013). Os diferentes índices obtidos em testemunhos sedimentares incluem análises do sedimento marinho total, como susceptibilidade magnética, razões de elementos maiores (e.g., Ti/Al, Al/Si e Fe/K) e distribuição granulométrica; assim como a análise química das testas carbonáticas de foraminíferos fósseis (*i.e.*, microorganismos marinho) preservadas no sedimento, como $\delta^{18}\text{O}$, razão isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e razões de elementos traço (El/Ca). A mesma razão $\delta^{18}\text{O}$, utilizada em espeleotemas, quando obtida em testes de foraminíferos nos permite obter uma indicação da temperatura e da salinidade do mar referente ao momento de precipitação daquele material.

Sendo que, os menores valores de $\delta^{18}\text{O}$ indicam maior temperatura e menor salinidade da água do mar.

3. RECONSTITUIÇÕES CLIMÁTICAS EM ESCALA ORBITAL

A partir das reconstituições de chuva do passado, por meio das séries de $\delta^{18}\text{O}$ de espeleotemas, foi possível constatar que as monções da América do Sul são fortemente controladas na escala de dezenas de milhares de anos por variações de insolação geradas pelo ciclo orbital de precessão do eixo da Terra. Ao longo da última glaciação, tanto a porção dos Andes orientais, localizada no Hemisfério Sul, como as regiões sul e sudeste do Brasil registram aumento das monções (*i.e.*, valores mais negativos de $\delta^{18}\text{O}$) em fase com o aumento da insolação de verão descrita pelo ciclo de precessão de Milankovitch (Figura A7.2) (Cruz *et al.*, 2006). Na América do Sul, durante o verão austral, o deslocamento para sul da ZCIT e o aumento do gradiente de temperatura entre o oceano e o continente aumenta a convergência de umidade do oceano Atlântico para o interior da Bacia Amazônica. A umidade ali acumulada é então transportada para sudeste via jatos de baixos níveis formando, por sua vez, a Zona de Convergência do Atlântico Sul, considerada como a feição convectiva mais importante das monções Sul-americanas (Figura A7.1).

Na Ásia, como um todo, os registros de espeleotemas apresentam sinal antifásico se comparados aos registros do Hemisfério Sul. Assim, conforme o Hemisfério Sul experimenta aumento de insolação de verão austral (*i.e.*, de dezembro a fevereiro), e consequente fortalecimento das monções Sul-americanas, a Ásia apresenta diminuição das monções em função da redução de insolação durante o verão boreal (*i.e.*, de junho a agosto) (Figura A7.2).

O comportamento antifásico dos regimes de chuva tropicais em escala global não é exclusivo apenas das relações inter-hemisféricas. Mesmo em porções da América do Sul localizadas ao sul do equador, é possível observar relações antifásicas de paleoprecipitação na escala orbital, como foi descoberto a partir do estudo de espeleotemas do Nordeste do Brasil (Cruz *et al.*, 2009). Essa relação deve-se a mudanças na circulação zonal, que compreende grandes células de convecção, também referida como célula de Walker. O amadurecimento do sistema de monções durante o verão austral leva ao desenvolvimento de uma circulação de altos níveis de caráter zonal ligando uma zona de alta pressão em altos níveis na Bolívia (conhecida como Alta da Bolívia) a uma zona de baixa pressão em altos níveis no nordeste do Brasil (conhecida como baixa do nordeste) (Vera *et al.*, 2006). A consequente subsidência de ar no nordeste inibe a formação de nuvens trazendo estiagem nos anos de maior atividade do sistema de monções Sul-

americano. Essa relação é evidente quando se compara, em escala orbital, os registros de paleoprecipitação do nordeste com os registros do sudeste do Brasil (Cruz *et al.*, 2009) (Figura A7.2).

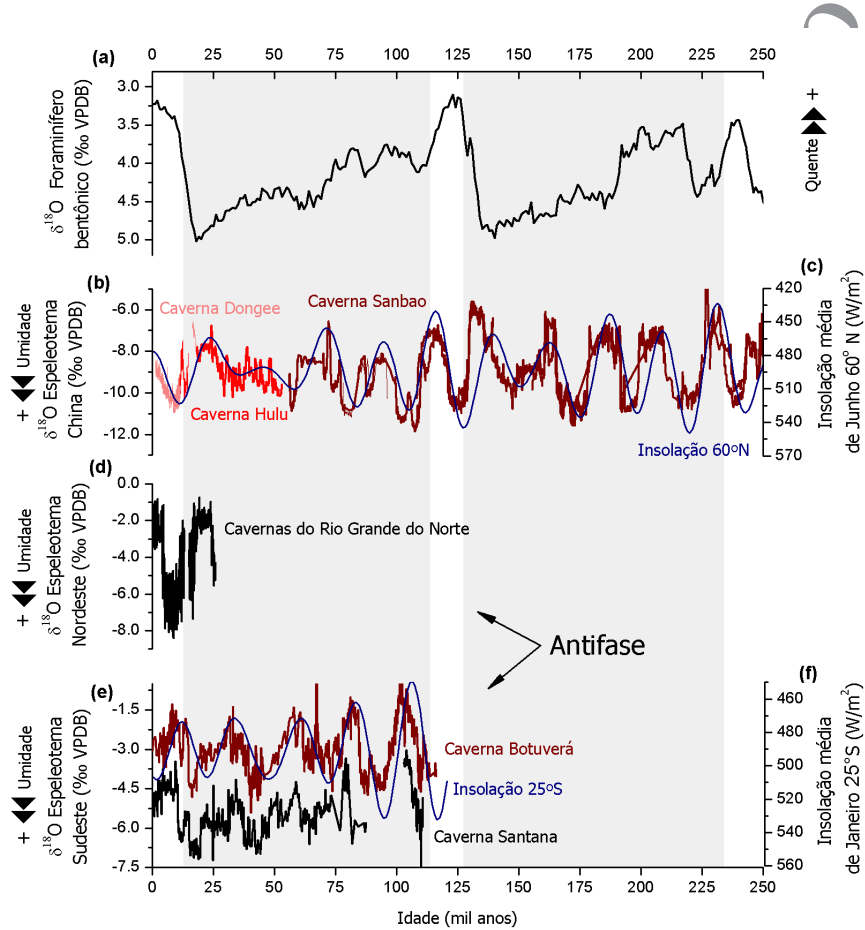


Figura A7.2: Registros de paleoprecipitação monçônica dos trópicos da América do Sul e China ao longo dos últimos dois ciclos glaciais. a) Registro de $\delta^{18}\text{O}$ de foraminíferos bentônicos marcam os eventos glaciais do Hemisfério Norte (Lisiecki e Raymo, 2005); b) Compilação dos dados isotópicos de espeleotemas da China: cavernas Dongge, Hulu e Sanbao (Cheng *et al.*, 2012); c) Curva de insolação média dos meses de junho para a latitude 60°N (Berger e Loutre, 1991); d) Registro isotópico de espeleotemas das cavernas do Rio Grande do Norte (Cruz *et al.*, 2009); e) Registro isotópico de espeleotema das cavernas Santana e Botuverá (Cruz *et al.*, 2006); f) Curva de insolação média de janeiro para a latitude 25°S (Berger e Loutre, 1991). As áreas em cinza marcam os períodos dos dois últimos eventos glaciais.

4. A ÚLTIMA DEGLACIAÇÃO E OS EVENTOS MILENARES

Em termos paleoclimáticos, os eventos milenares abruptos podem ser considerados como as feições mais marcantes do último glacial e da última deglaciação (entre ~19 e 11,7 ka). Esses eventos climáticos de escala milenar são caracterizados por mudanças abruptas no clima, apresentando episódios de frio extremo nas altas latitudes do Hemisfério Norte, conhecidos como Heinrich Stadials (HS), seguidos por episódios de elevação brusca da temperatura, conhecidos como Dansgaard-Oeschger (D-O). Dentre os eventos milenares abruptos destacam-se aqueles que ocorreram durante a última deglaciação, a saber: Younger Dryas (YD, evento do tipo HS), Bølling-Allerød (B-A, evento do tipo D-O) e Heinrich Stadial 1 (HS1).

No Hemisfério Sul, os eventos HS tem como resultado um claro aumento na precipitação monçônica associado ao deslocamento para sul da ZCIT, enquanto os eventos D-O apresentam uma redução de chuvas neste período com o deslocamento da ZCIT para norte. Este padrão de maior e menor precipitação durante os eventos HS e D-O, respectivamente, são observados de forma inversa no Hemisfério Norte, estabelecendo um padrão antifásico similar ao observado no ciclo de precessão (Cheng *et al.*, 2012). No Brasil, dados de $\delta^{18}\text{O}$ de espeleotemas das regiões sul e sudeste (Cruz *et al.*, 2005; 2006) (Figura A7.3) indicam o aumento e redução de chuvas durante os eventos HS e D-O, respectivamente.

No oceano estes eventos podem ser observados em registros paleoceanográficos como o obtido por Razik *et al.* (2013) (Figura A7.3). Neste caso, a maior ou menor intensidade de chuvas durante os eventos pode ser observada através da variação da concentração de ferro (Fe) no material sedimentar. Os maiores valores de Fe indicam uma maior quantidade de material sendo transportado para os oceanos devido ao aumento na erosão continental.

Ainda no oceano, estes eventos extremos também podem ser observados por variações nos padrões da circulação oceânica. O Atlântico Sul apresenta regiões de grande importância para a circulação termohalina global, como a Confluência Brasil-Malvinas a oeste, o Vazamento das Agulhas a leste e, mais genericamente, a porção sul da Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (AMOC, do inglês *Atlantic Meridional Overturning Circulation*), uma componente importante da circulação termohalina (Figura A7.4).

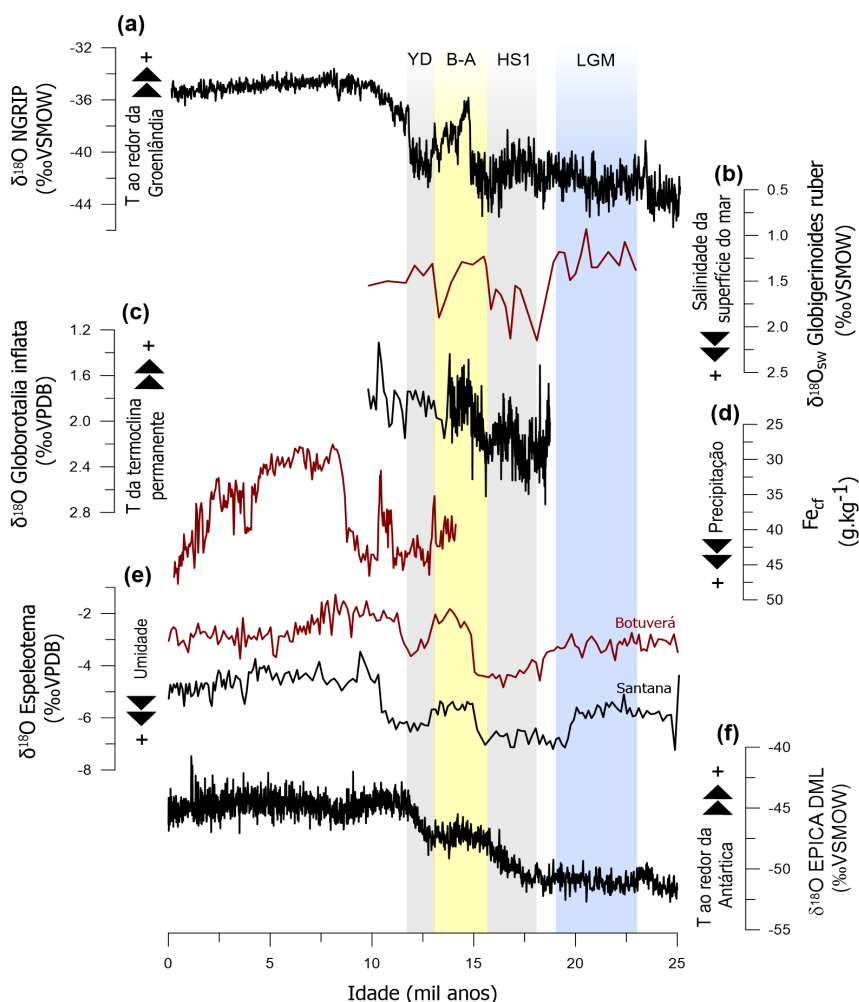


Figura A7.3: Registros paleoclimatológicos da porção oeste do Atlântico Sul dos últimos 25 mil anos e indicadores de temperatura provenientes das altas latitudes dos Hemisférios Norte e Sul. a) Registro de $\delta^{18}\text{O}$ de testemunho de gelo da Groenlândia (NGRIP, 2006); b) Registro de $\delta^{18}\text{O}$ obtido em foraminífero planctônico *Globigerinoides ruber* (Carlson *et al.*, 2008); c) Registro de $\delta^{18}\text{O}$ obtido em foraminífero planctônico *Globorotalia inflata* (Chiessi *et al.*, 2008); d) Registro do teor de Fe no material sedimentar (Razik *et al.*, 2013); e) Registro de $\delta^{18}\text{O}$ de espeleotema das cavernas Santana e Botuverá (Cruz *et al.*, 2005; 2006); f) Registro de $\delta^{18}\text{O}$ de testemunho de gelo da Antártica (EPICA, 2011). Todos os registros encontram-se com seus modelos de idade originais. As barras verticais marcam os seguintes eventos: LGM - Último Máximo Glacial (Mix, Bard e Schneider, 2001), HS1 - Heinrich Stadial 1 (Goñi e Harrison, 2010), B-A - Bølling-Allerød e YD - Younger Dryas (Rasmussen *et al.*, 2006). Outras abreviações usadas na figura: cf - corrigido para carbonato (do inglês, *carbonate free*); T - temperatura; sw - água do mar (do inglês, *sea water*), VPDB - Vienna Pee Dee Belemnite, e VSMOW - Vienna Standard Mean Ocean Water. A localização dos testemunhos marinhos pode ser encontrada na Figura A7.4.

Durante os eventos HS1 e YD houve uma marcante alteração na paleocirculação do Atlântico Sul. Nestes períodos, o enfraquecimento da AMOC levou a um padrão de aumento da temperatura superficial do mar (TSM) nas latitudes subtropicais do Hemisfério Sul e a diminuição desta mesma variável nas altas latitudes do Hemisfério Norte (Figura A7.3). Este enfraquecimento seria resultado do enfraquecimento da formação da Água Profunda no Atlântico Norte, iniciado pelo efeito das modificações do ciclo hidrológico. Os fenômenos oceânicos e atmosféricos se combinaram em uma série de mecanismos de retroalimentação responsáveis pela transmissão deste sinal climático para todo o planeta (Clark *et al.*, 2002).

Em resposta à desintensificação da AMOC durante os eventos HS1 e YD, e em parte devido à alteração no fluxo de massas de águas oriundas do Vazamento das Agulhas, houve uma alteração na termoclina permanente das latitudes subtropicais da porção oeste do Atlântico Sul com um padrão de temperatura e salinidade oposto ao observado na superfície (Figura A7.3) (Chiessi *et al.*, 2008). A termoclina permanente é uma porção da coluna de água na qual se observa uma variação brusca na temperatura. Esta feição pode impedir os processos de troca e mistura entre as camadas de água acima e abaixo da mesma devido à diferença de densidade entre estas camadas. O Vazamento das Agulhas é responsável pelo fluxo de entrada de massas de água salinas e quentes do Oceano Índico para o Oceano Atlântico Sul através de um elaborado sistema de recirculação local.

Ainda, durante os períodos de enfraquecimento da AMOC, foi observada uma maior participação da Água Intermediária Antártica na circulação paleoceanográfica (Pahnke, Goldstein e Hemming, 2008), conforme sugerido pelo registro dos testemunhos localizados no cânion do Mar del Plata (Voigt *et al.*, 2013). Também foi observado nas profundidades intermediárias uma marcante elevação no teor de nutrientes nos eventos HS1 e YD. Este enriquecimento parece estar associado a uma intensificação na ressurgência ao redor da Antártica em função de um alinhamento entre a porção central dos ventos de oeste e da Corrente Circumpolar Antártica (Figura A7.4) (Hendry *et al.*, 2012). Os processos de ressurgência são conhecidos por levarem águas frias e ricas em nutrientes de altas profundidades do oceano para a superfície.

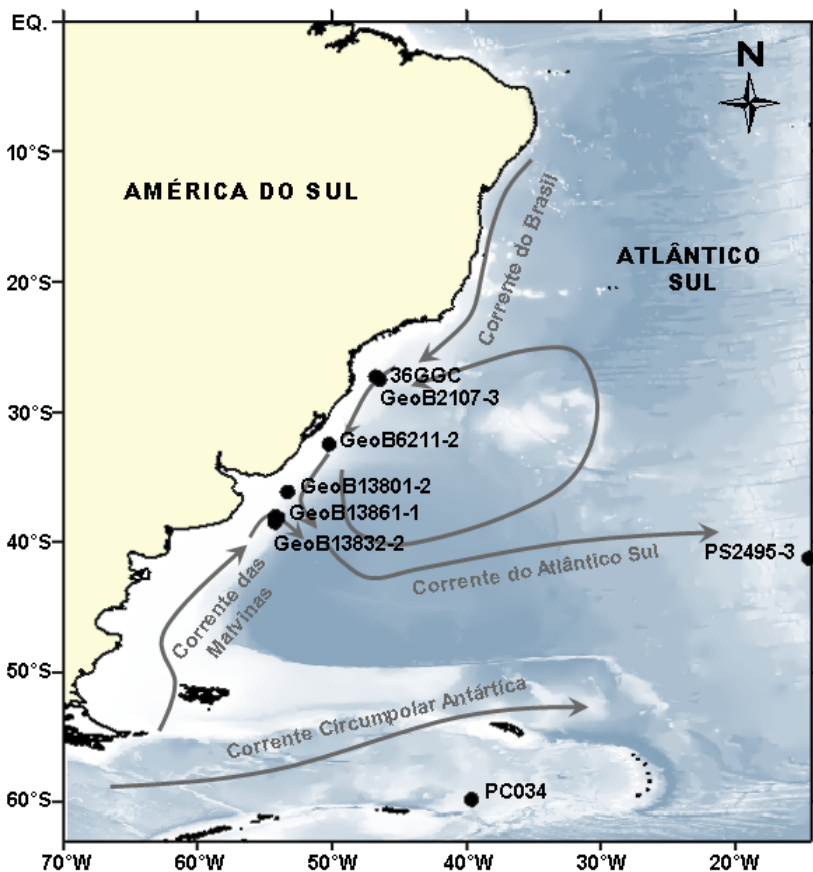


Figura A7.4: Esquema simplificado da circulação superficial da porção oeste do Atlântico Sul (adaptado de Peterson e Stramma, 1991) e localização dos testemunhos sedimentares marinhos citados neste capítulo, exceto os trabalhos que abrangem um número elevado de testemunhos ou se encontram fora dos limites geográficos observados no mapa. GeoB13832-2/GeoB13861-1/GeoB13862-1: Voigt *et al.*, 2013; GeoB13801-2: Bender, Hanebuth e Chiessi, 2013; GeoB6211-1: Chiessi *et al.*, 2008, 2009; Razik *et al.*, 2013; 36GGC: Carlson *et al.*, 2008; PS2495-3: Groeneweld e Chiessi, 2011; PC034/GeoB2107-3: Hendry *et al.*, 2012.

O período conhecido como último máximo glacial (LGM, do inglês *Last Glacial Maximum*, entre ~23 e 19 mil anos) também apresentou uma paleocirculação e operação da AMOC diferenciada da atual, contudo esta circulação ainda é diferente da observada nos eventos milenares. Tais diferenças afetaram a capacidade do Atlântico em absorver CO_2 atmosférico, devido à saturação deste gás no oceano profundo (*e.g.*, Skinner *et al.*, 2010),

e redistribuir calor e nutrientes, em função da alteração das águas que afluem durante ressurgências no Pacífico e Atlântico Sul (e.g., Sarmiento *et al.*, 2004). O LGM ocorreu em um período de máxima insolação de verão no Hemisfério Sul e, conseqüente, mínima insolação de verão no Hemisfério Norte, de acordo com os ciclos de insolação de Milankovitch, sendo um período caracterizado por uma grande expansão da cobertura do gelo no Hemisfério Norte e subsequente deslocamento da ZCIT para sul (e.g., Chiang e Bitz, 2005). Apesar dos poucos dados acerca da TSM durante o LGM, a porção oeste do Atlântico Sul indica uma diminuição da TSM média anual de 1 a 2 °C, com uma maior diminuição da TSM (*i.e.*, 4 a 8 °C) no setor Atlântico do Oceano Austral, próximo a atual Zona Subantártica (MARGO Project Members, 2009). Como o resfriamento na Zona Subantártica deve ter sido significativamente superior aquele observado em baixas latitudes, acredita-se que o gradiente térmico observado na região norte do setor Atlântico do Oceano Austral tenha sido mais marcante do que o atual (Gersonde *et al.*, 2005; Groeneveld e Chiessi, 2011).

5. MUDANÇAS CLIMÁTICAS DO HOLOCENO

Existem poucos registros paleoclimáticos do Holoceno para o Hemisfério Sul, de forma que os principais eventos climáticos ocorridos nesse período foram primeiro observados ou definidos no Hemisfério Norte. Dentre estes, os mais significativos são os eventos Bonds que foram registrados em estratos sedimentares marinhos que continham sedimentos originários das geleiras do Hemisfério Norte, indicando a expansão da zona de ocorrência de icebergs durante períodos anômalos de frio.

No Brasil, devido a sua posição latitudinal, as maiores alterações climáticas se deram pela variação da quantidade de chuva, sendo poucos os indícios de variações de temperatura. Desta forma, assim como nos eventos milenares, as baixas temperaturas no Hemisfério Norte se refletem na América do Sul pelo deslocamento da ZCIT para posições mais a sul de seu posicionamento médio, intensificando o Sistema de Monção Sul-americana (SMSA) durante esses períodos. No Norte de Minas Gerais a resposta da precipitação aos períodos frios do Hemisfério Norte foi detectada no registro isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ de estalagmites por Stríkis *et al.* (2011), como pode ser visto na Figura A7.5. Nos seis eventos Bonds ocorridos durante o Holoceno, cinco deles centrados por volta de 2,7; 4,4; 5,5; 7,5 e 9,3 mil anos, foi observado uma resposta úmida no Norte de Minas Gerais. Esta mesma relação foi também observada durante um evento ocorrido por volta de 8,2 mil anos (Figura A7.5).

Através de uma compilação de mais de uma centena de trabalhos paleoclimáticos envolvendo registro de cavernas, lagos, solos, rios e oceano,

Prado *et al.* (2013) puderam elaborar um cenário relativamente completo da climatologia do Brasil para o Holoceno Médio (por volta de 6 mil anos). Os autores mostraram que nesse período, com exceção do Nordeste brasileiro, o clima foi mais seco para a América do Sul em relação ao presente, o que está de acordo com resultados de simulações de modelos numéricos (Cruz *et al.*, 2009). A redução da insolação de verão para o Hemisfério Sul, e consequente diminuição da cobertura de nuvens, afetou o balanço hídrico alterando a relação evaporação/precipitação. Como foi observado por Prado *et al.* (2013), durante o Holoceno Médio, o consequente aumento da evaporação em detrimento da precipitação levou ao aumento da salinidade das águas da costa Sul-americana, identificado através de registros marinhos próximos da foz do Rio da Prata e do Rio Doce.

O trabalho de Bender, Hanebuth e Chiessi (2013) demonstra como que feições oceanográficas de grande relevância para a plataforma continental da porção oeste do Atlântico Sul estiveram diretamente ligadas ao padrão de circulação atmosférica do Hemisfério Sul e como a influência antrópica no clima pode mudar importantes feições da circulação oceânica regional.

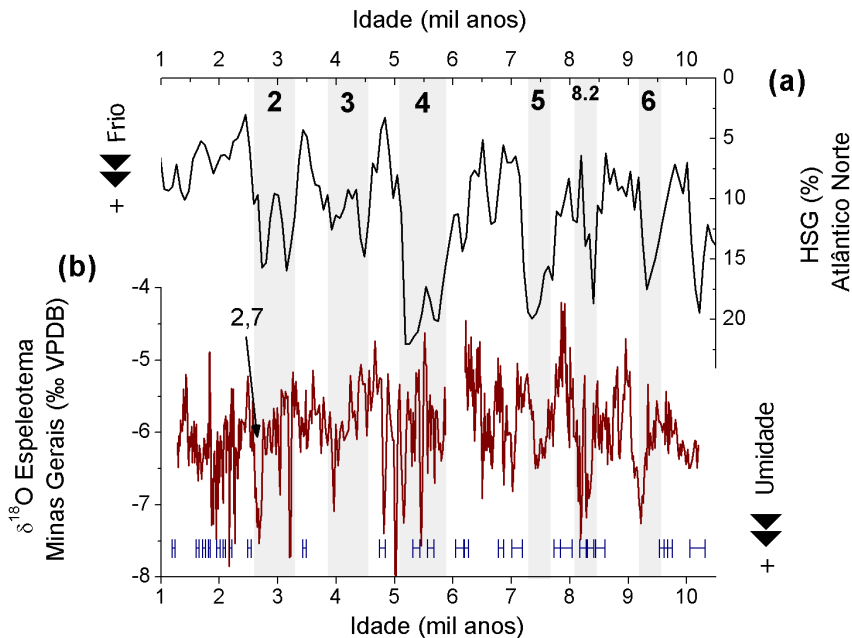


Figura A7.5: Comparação entre a reconstrução de paleoprecipitação do norte de Minas Gerais com os eventos Bond: a) curva de variação de HSG (sigla em inglês para “hematite stained grain”) referente à porcentagem de fragmentos de quartzo mantedo por hematita desprendido no derretimento de icebergs (Bond *et al.*, 1997); b) séries de $\delta^{18}\text{O}$ de espeleotemas do Norte de Minas Gerais. As barras em cinza delimitam os eventos Bond. A distribuição das idades e os erros são representados pelas barras laterais azuis.

Para os últimos milênios, as principais alterações no clima foram detectadas inicialmente na Europa, com exceção do evento ocorrido em 700 A.C. (2,7 mil anos atrás) que tem sido identificado em diversos registros paleoclimáticos da América do Sul (Chambers *et al.*, 2007). Esse evento, coincidente com o evento Bond número 2 do Hemisfério Norte, propiciou um aumento da precipitação no centro-leste e sudeste do Brasil como apontam os registros de $\delta^{18}\text{O}$ do Brasil, como de Minas Gerais (Stankis *et al.*, 2011), São Paulo (Vuille *et al.*, 2012) e de forma acentuada na Bahia (Novello *et al.*, 2012) (Figura A7.6).

Os eventos que ocorreram no último milênio, além de serem preservados nos registros geológicos, também foram identificados em registros históricos e podem ser observados em documentos escritos, assim como pinturas que registraram a paisagem da época. Dentre esses eventos, destacam-se os ocorridos aproximadamente entre 900 e 1100 D.C., denominado de Anomalia Climática Medieval (ACM), que causou o aumento anômalo da temperatura na Europa e, mais recentemente, por volta de 1550 a 1850, a Pequena Idade do Gelo (PIG), responsável pela diminuição drástica e abrupta da temperatura.

As variações da intensidade das monções Sul-americanas ao longo dos últimos 3 mil anos para três regiões distintas do Brasil (Bahia, Minas Gerais e São Paulo) podem ser observadas na Figura A7.6. Durante a ACM os registros da Bahia e de São Paulo mostram uma redução da quantidade de chuva, o que indica um enfraquecimento da monção durante esse período em boa parte da América do Sul. Nesse mesmo período, foi detectado aumento de chuva na Venezuela com base em registros paleoceanográficos dos sedimentos marinhos da baía de Cariaco, localizada na zona costeira, região esta fortemente influenciada pelo posicionamento meridional da ZCIT (Figura A7.1). Dessa forma é possível concluir que, a exemplo dos eventos milenares, o sinal antifásico das chuvas de monções entre os Hemisférios Norte e Sul apontam para o deslocamento meridional da ZCIT como o principal fator responsável pela estiagem detectado no Brasil durante o ACM.

Durante a PIG o registro isotópico de espeleotemas de São Paulo mostra um salto para valores condicionados a maior umidade, isso é corroborado por outros diversos registros paleoambientais disponíveis na literatura para regiões sob influência do SMSA (Bird *et al.*, 2011, Reuter *et al.*, 2009). Já na Bahia, esse período apresenta-se como o período mais seco dos últimos 3 mil anos, esse fato é associado por Novello *et al.* (2012) como consequência da intensificação do cavado do Nordeste. Esta intensificação inibiu a precipitação no Nordeste e contribuiu para o aumento da precipitação nas demais regiões onde o SMSA se faz presente, concomitantemente pode ter

ocorrido nesse período o deslocamento da ZCIT para sul como resposta ao frio do Hemisfério Norte.

Através dos dados de maior resolução temporal dos espeleotemas para os últimos séculos pode-se notar uma série de eventos climáticos de escalas interanuais a multidecenais que não foram constatados pelos dados instrumentais de chuva devido a curta abrangência temporal desses registros. A chuva do Nordeste brasileiro mostrou estar relacionada à Oscilação Multidecenal do Atlântico (OMA) em uma periodicidade de 50-70 anos (Novello *et al.*, 2012), com aumento de precipitação nos períodos de fase negativa da OMA. A mesma relação foi anteriormente proposta por Chiessi *et al.* (2009) ao encontrar a periodicidade de 60 anos em registros sedimentares de milhares de anos da Bacia do Rio do Prata, a qual recebe sua carga sedimentar de rios cujo volume de água é associado ao SMAS.

Ainda são poucos os registros publicados com dados referentes ao último século que possam apontar a direção em que o clima atual está evoluindo, a exceção do registro do Nordeste (Novello *et al.*, 2012) que mostrou uma progressiva aridificação ocorrendo na parte central da Bahia desde o começo do século. Essa tendência foi quebrada na década de 70 por alguns eventos úmidos e retornou em seguida, sendo mantida até os dias de hoje. Por esse registro, pode-se verificar também que a região está em um dos períodos mais secos dos últimos 3 mil anos, com valores próximos aos encontrados durante a PIG.

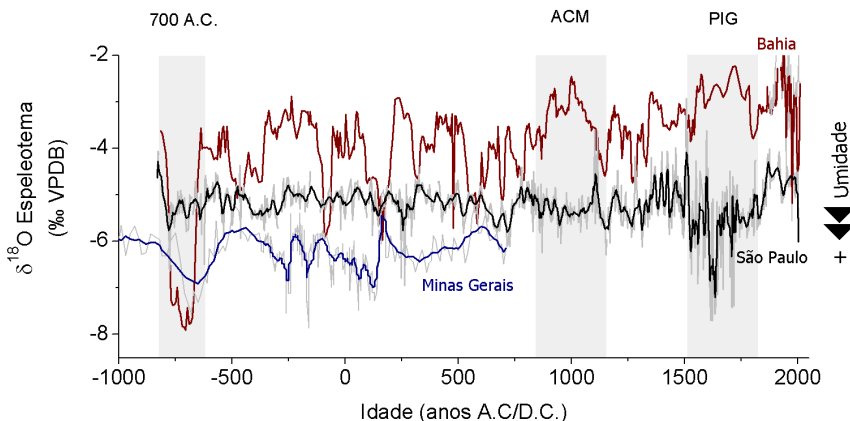


Figura A7.6: Registros isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ de espeleotemas de três regiões distintas (Bahia, São Paulo e Minas Gerais) sob influência de chuvas do SMSA indicando a variação de pluviosidade. As barras em cinza destacam os principais períodos de anomalias dos últimos milênios: o evento 700 A.C., a Anomalia Climática Medieval (ACM) e a Pequena Idade do Gelo (PIG).

6. ACRÔNIMOS, NOTAÇÕES E SIGLAS

ACM: Anomalia Climática Medieval

AMOC: do inglês *Atlantic Meridional Overturning Circulation* (Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico)

B-A: Bølling-Allerød

D-O: Dansgaard-Oeschger

HS: Heinrich Stadial

HS1: Heinrich Stadial 1

HSG: do inglês *hematite stained grain*

LGM: do inglês *Last Glacial Maximum* (Último Máximo Glacial)

OMA: Oscilação Multidecenal do Atlântico

PIG: Pequena Idade do Gelo

SMSA: Sistema de Monção Sul-americana

SSM: Salinidade superficial do mar

TSM: Temperatura superficial do mar

YD: Younger Dryas

ZCAS: Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT: Zona de Convergência Intertropical

$\delta^{18}\text{O}$: Razão isotópica de oxigênio

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENDER, V. B.; HANEBUTH, T. J. J.; CHIESSI, C. M. Holocene shifts of the Subtropical Shelf Front off southeastern South America controlled by high and low latitude atmospheric forcings. *Paleoceanography*, v. 28, n. 3, p. 481-490, 2013.

BERGER, A.L. Astronomical theory of paleoclimates and the last glacial-interglacial cycle. *Quaternary Science Reviews*, v. 11, p. 571-581. 1992.

BERGER, A.L., LOUTRE, M.F. Insolation Values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, v. 10, p. 297-317. 1991.

BIRD, B. W. *et al.* A 2,300-year-long annually resolved record of the South American summer monsoon from the Peruvian Andes. *Proceedings of the*

National Academy of Sciences of the United States of America, v. 108, n. 21, p. 8583-8588, 2011.

BOND, G. *et al.* A Pervasive Millennial-Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates. *Science*, v. 278, p. 1257-1266, 1997.

CARLSON, A. *et al.* E. Subtropical Atlantic salinity variability and Atlantic meridional circulation during the last deglaciation. *Geology*, v. 36, n. 12, p. 991-994, 2008.

CHAMBERS, F.M. *et al.* Globally synchronous climate change 2800 years ago: Proxy data from peat in South America. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 253, p. 439-444, 2007.

CHENG, H. *et al.* The Global Paleomonsoon as seen through speleothem records from Asia and the Americas. *Climate Dynamics*, v. 39, n. 5, p. 1045-1062, 2012.

CHIANG, J. C. H.; BITZ, C. M. Influence of high latitude ice cover on the marine Intertropical Convergence Zone. *Climate Dynamics*, v. 25, n. 5, p. 477-496, 2005.

CHIESSI, C. M. *et al.* Signature of the Brazil-Malvinas Confluence (Argentine Basin) in the isotopic composition of planktonic foraminifera from surface sediments. *Marine Micropaleontology*, v. 64, p. 52-66, 2007.

CHIESSI, C. M. *et al.* South Atlantic interocean exchange as the trigger for the Bolling warm event. *Geology*, v. 36, n. 12, p. 919-922, 2008.

CHIESSI, C. M. *et al.* Possible impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the South American summer monsoon. *Geophysical Research Letters*, v. 36, 2009.

CLARK, I. D.; FRITZ, P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Boca Raton: CRC Press, 1997. 352.

CLARK, P. U. *et al.* The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change. *Nature*, v. 415, n. 6874, p. 863-869, 2002.

CRUZ, F. W. *et al.* Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil. *Nature*, v. 434, n. 7029, p. 63-66, 2005.

CRUZ, F. W. *et al.* Reconstruction of regional atmospheric circulation features during the late Pleistocene in subtropical Brazil from oxygen isotope composition of speleothems. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 248, n. 1-2, p. 495-507, 2006.

CRUZ, F. W. *et al.* Orbitally driven east-west antiphasing of South American precipitation. *Nature Geoscience*, v. 2, n. 3, p. 210-214, 2009.

EPICA MEMBERS. EPICA Dronning Maud Land Ice Core 10-51 KYrBP $\delta^{18}\text{O}$ Data. *Data Contribution Series # 2011-056*. NOAA/NCDC PALEOCLIMATOLOGY PROGRAM, B. C., USA. : IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology 2011.

GERSONDE, R. *et al.* Sea-surface temperature and sea ice distribution of the Southern Ocean at the EPILOG Last Glacial Maximum - A circum-Antarctic view based on siliceous microfossil records. *Quaternary Science Reviews*, v. 24, n. 7-9, p. 869-896, 2005.

GOÑI, M. F. S.; HARRISON, S. P. Millennial-scale climate variability and vegetation changes during the Last Glacial: Concepts and terminology Introduction. *Quaternary Science Reviews*, v. 29, n. 21-22, p. 2823-2827, 2010.

GOVIN, A. *et al.* Distribution of major elements in Atlantic surface sediments (36°N-49°S): Imprint of terrigenous input and continental weathering. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, v. 13, 2012.

GROENEVELD, J.; CHIESSI, C. M. Mg/Ca of *Globorotalia inflata* as a recorder of permanent thermocline temperatures in the South Atlantic. *Paleoceanography*, v. 26, 2011.

HAYS, J.D., IMBRIE, J., SHACKLETON, N.J. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, v. 194, p. 1122-1132, 1976.

HENDRY, K. R. *et al.* Abrupt changes in high-latitude nutrient supply to the Atlantic during the last glacial cycle. *Geology*, v. 40, n. 2, p. 123-126, 2012.

HILLAIRE-MARCEL, C.; DE VERNAL, A. Paleoceanography, tracers, proxies and methods In: HILLAIRE-MARCEL, C. e DE VERNAL, A. (Ed.). *Proxies in Late Cenozoic Paleoceanography: Elsevier*. 2007. cap. Introduction, p.1-14. (Developments in Marine Geology).

JOUZEL, J. *et al.* Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the past 800,000 Years. *Science*, v. 317, p. 793-796, 2007.

KUTZBACH, J. Monsoon climate of the early Holocene: climate experiment with Earth's orbital parameters for 9000 years ago. *Science*, v. 214, p. 59-61, 1981.

LACHNIET, M. Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values. *Quaternary Science Reviews*, v. 28, p. 412-432, 2009.

LISIECKI, L. E.; RAYMO, M. E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, v. 20, n. 1, p. PA1003, 18, 2005.

MARGO PROJECT MEMBERS. Constraints on the magnitude and patterns of ocean cooling at the Last Glacial Maximum. *Nature Geoscience*, v. 2, p. 127-132, 2009.

MILANKOVITCH, M. Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire. *Paris: Gauthier-Villars*, 1920. 338

MIX, A. C.; BARD, E.; SCHNEIDER, R. Environmental processes of the ice age: land, oceans, glaciers (EPILOG). *Quaternary Science Reviews*, v. 20, n. 4, p. 627-657, 2001.

NGRIP GROUP. Greenland Ice Core Chronology 2005 (GICC05). *Data Contribution Series #2006-118*. NOAA/NCDC PALEOCLIMATOLOGY PROGRAM, B. C., USA.: IGBP PAGES/World Data Center of Paleoclimatology 2006.

NOVELLO, V. F. *et al.* Multidecadal climate variability in Brazil's Nordeste during the last 3000 years based on speleothem isotope records. *Geophysical Research Letters*, v. 39, 2012

PAHNKE, K.; GOLDSTEIN, S. L.; HEMMING, S. R. Abrupt changes in Antarctic Intermediate Water circulation over the past 25,000 years. *Nature Geoscience*, v. 1, n. 12, p. 870-874, 2008.

PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-Level Circulation in the South-Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, v. 26, n. 1, p. 1-73, 1991

PRADO, L. F. *et al.* Mid-Holocene climate reconstruction for eastern South America. *Climate of the Past* v. 9, p. 2117-2133, 2013.

RASMUSSEN, S. O. *et al.* A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, v. 111, n. D6, 2006.

RAZIK, S. *et al.* Interaction of the South American Monsoon System and the Southern Westerly Wind Belt during the last 14 kyr. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, v. 374, p. 28-40, 2013.

REUTER, J. *et al.* A new perspective on the hydroclimate variability in northern South America during the Little Ice Age. *Geophysical Research Letters*, v. 36, 2009.

RUDDIMAN, W.F. Viewpoint: What is the timing of orbital-scale monsoon changes? *Quaternary Science Reviews*, v. 25, p. 657-658, 2006.

SARMIENTO, J. L. *et al.* High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity. *Nature*, v. 427, n. 6969, p. 56-60, 2004

SKINNER, L. C. *et al.* Ventilation of the Deep Southern Ocean and Deglacial CO₂ Rise. *Science*, v. 328, n. 5982, p. 1147-1151, 2010.

STRÍKIS, N. M. *et al.* Abrupt variations in South American monsoon rainfall during the Holocene based on a speleothem record from central-eastern Brazil. *Geology*, v. 39, n. 11, p. 1075-1078, 2011.

VERA, C. *et al.* Toward a unified view of the American Monsoon Systems. *Journal of Climate*, v. 19, n. 20, p. 4977-5000, 2006.

VOIGT, I. *et al.* A submarine canyon as a climate archive - Interaction of the Antarctic Intermediate Water with the Mar del Plata Canyon (Southwest Atlantic). *Marine Geology*, v. 341, p. 46-57, 2013.

VUILLE, M. *et al.* A review of the South American monsoon history as recorded in stable isotopic proxies over the past two millennia. *Climate of the Past*, v. 8, n. 4, p. 1309-1321, 2012.

WEFER, G. *et al.* Clues to ocean history: a brief overview of proxies. In: FISCHER, G. e WEFER, G. (Ed.). Use of proxies in Paleoceanography: Examples from the South Atlantic. *Germany: Springer-Verlag*, 1999. p.1-68.

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

**PARTE B : ESTUDOS DE IMPACTOS, ADAPTAÇÃO E
VULNERABILIDADE**

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

B1. RECURSOS HÍDRICOS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

EDUARDO MARIO MENDIONDO^{1,2}, HUMBERTO RIBEIRO DA ROCHA³

Resumo – Este capítulo trata das relações entre recursos hídricos e serviços ambientais sob um contexto de mudanças. A primeira parte introduz de forma interdisciplinar aspectos de bacia hidrográfica, sua dinâmica e incertezas de processos de ciclos biogeoquímicos, aspectos de escala e regionalização de estimativas, seguido de alguns exemplos. A segunda parte do capítulo trata sobre efeitos das mudanças no escoamento superficial e estudos de casos no Brasil.

1. INTRODUÇÃO: A BACIA HIDROGRÁFICA COMO PALCO SOB CONTÍNUAS MUDANÇAS

A bacia hidrográfica é a unidade territorial de gestão e planejamento para os recursos hídricos (Lei Federal 9.433/97). Embora esta seja uma definição aparentemente óbvia, sua abrangência interdisciplinar é ampla. No caso, e se admitirmos uma analogia simples entre os recursos hídricos e as artes cênicas, algumas correspondências emergem (Tabela B1.1). Por exemplo, entre a bacia hidrográfica e um palco de uma peça de teatro (Figura B1.1), onde as atuações dos processos são singulares e características.

Nesta visão “bacia-palco” da Figura B1.1 e Tabela B1.1, aqueles ciclos hidrogequímicos próprios do bioma, aos quais a bacia está sujeita, se prestariam como uma analogia de “roteiro inicial”. Os próprios processos que ocorrem na bacia, então, encarnariam as “personagens”. Restaria definir que o “ato ou apresentação teatral” seria a fiel integração das variáveis desses processos cujas magnitudes se interrelacionam em espaço e tempo determinados.

1. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, EESC/USP.

2. Centro Nacional de Monitoramento de Alertas e Desastres, Min. Ciência, Tecnologia e Inovação, Parque Tecnológico de São José dos Campos.

3. Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, IAG/USP.

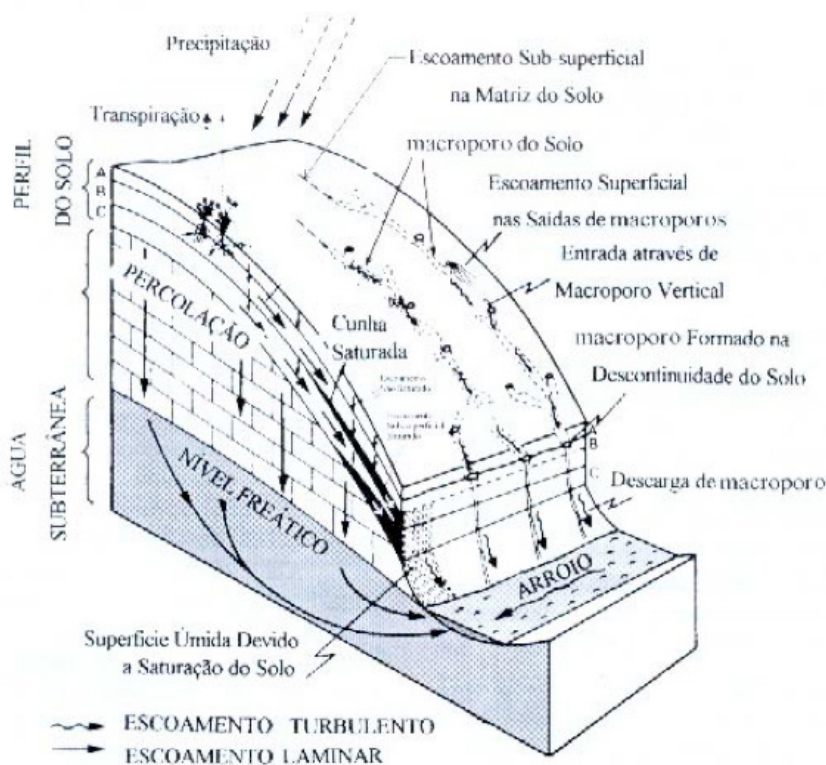


Figura B1.1: A bacia hidrográfica como palco de transformações sob mudanças (adaptado de Mendiondo e Tucci, 1997).

Tabela B1.1: Uma analogia alternativa da correspondência interdisciplinar, neste caso entre os recursos hídricos e as artes cênicas

Recursos Hídricos	Exemplos	Analogia em Artes cênicas
Bacia hidrográfica	Área de drenagem (Ad)	Palco de atuação ou cenografia
Bioma	Cerrado, Mata Atlântica	Gênero (comédia, drama, etc)
Modelo hidrológico	Diversas combinações [1]	Tipo de direção
Componente hidrológica	Evaporação, Escoamento	Personagens
Variáveis dos processos	Recarga média mensal	Atuações e interpretações
Equações	$Q_{max} = f(\text{Prec.}, \text{Ad})$	Roteiros de atuação

[1]: Em relação ao espaço: Concentrado, distribuído; em relação à forma de apresentar os processos: conceitual, semi-conceitual, probabilístico. Outras classificações podem ser obtidas em Clarke (1998).

Esta analogia, embora simplificada, pode agregar mais elementos. Da mesma forma, se um roteiro de teatro versa em prosa e poesia, as integrações espaço-temporais das variáveis hidrológicas se estendem entre um punhado de equações, empíricas, conceituais, às vezes determinísticas, às vezes mais estocásticas. Cada papel ou atuação, isto é a forma de cada ator viver sua personagem, é característico e próprio. Também o grau de permissão de exercer essa capacidade de atuação é diferente de diretor para diretor. Portanto, raramente uma peça, ou até uma única apresentação de teatro, é idêntica às outras. Isto a torna única, irrepetível, difícil de ser imitada novamente. Na bacia hidrográfica, isto ocorre de igual maneira, ou seja de forma dinâmica e não estacionária, como nas atuais condições de Antropoceno.

Em síntese, ambos palco de teatro e bacia hidrográfica são espaços de transformações e mudanças. E quando tratarmos a relevância interdisciplinar a outras áreas, oferecer ludicamente a bacia hidrográfica como “local de aprendizagem” pode ajudar na forma de como nos adaptamos a conviver com a dinâmica e incertezas dos recursos hídricos sob cenários de contínuas mudanças.

2. DINÂMICA E INCERTEZAS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Da analogia anterior há algumas especificidades que escapam ao objeto deste capítulo. Um corolário do anterior é que, assim como o palco de teatro é vivo, a bacia hidrográfica também apela às novidades e à dinâmica dos seus processos. Ambos, palco e bacia, nunca são os mesmos. Inclusive aquelas atuações memoráveis, aquelas que ficam na memória do público, podem ser comparadas àqueles eventos extremos, quando variáveis hidrológicas assumem magnitudes fora do comum. Exemplos disso são a seca prolongada no NE brasileiro no período 2012-2013, a estiagem no SE brasileiro no Sudeste do Brasil no período 2013-2015, e as inundações na região amazônica em 2014 e em 2015.

Um segundo aprendizado é que esses ciclos biogeoquímicos têm altíssima heterogeneidade e vasta complexidade. Mesmo assim, as equações gerais desses processos continuam válidas. Comparando bacias de diferentes biomas, não é raro admitir que as incertezas desses processos sejam, às vezes, de ordem parecida ou superior às magnitudes médias esperadas das variáveis. De volta à analogia “bacia-palco”, alguns “biomas” (“gêneros”) permitiriam as suas “variáveis” (“atores”) ter menor ou maior imprevisibilidade (“grau de improvisação”) nas suas formas de representar. Disto se extrai que é possível ter apresentações comuns, ou até peças memoráveis, porém imprevisíveis, como parte da dinâmica e incertezas das bacias hidrográficas.

Assim como atores podem improvisar seus personagens, as variáveis desses ciclos podem sofrer perturbações. De fato, podemos aceitar que uma peça

de teatro se desenvolva a partir do roteiro, dando maior liberdade aos seus personagens. Na bacia hidrográfica, também, as equações podem continuar válidas, ainda que com magnitudes de variáveis diferentes daquelas inicialmente previstas. Quando as escalas espaço-temporais aumentam, por exemplo em escala regional-global e sob cenários de mudanças de longo prazo, essas incertezas podem assumir um papel de destaque (p.ex. Mendiando e Tucci, 1997-a, -b, -c; Donohue et al, 2007; Wang e Wu, 2013).

3. CICLOS BIOGEOQUÍMICOS ASSOCIADOS

Como, então, abordar os ciclos biogeoquímicos em bacias hidrográficas sob mudanças do clima, do uso de solos e de hábitos de consumo? Quais representações simples e de caráter interdisciplinar podem ser representadas por fluxos em escalas espaço-temporais definidas? Uma forma para responder estas questões pode ser abordada pela integração de aspectos de quantidade e de qualidade. Como a mistura de comportamentos é comumente alta, há um alto grau de combinação de efeitos superpostos, incluindo as transformações biogeoquímicas. Portanto, quando se estuda um ecossistema natural da bacia hidrográfica é de alta utilidade aproximar abordagens que discriminem, no possível, este tipo de carga quali-quantitativa.

Sob uma bacia hidrográfica, os fluxos mássicos podem ser classificados por cargas difusas e por cargas concentradas. O primeiro grupo representa aqueles fluxos mássicos que ocorrem de forma distribuída, sobre ou dentro do volume de controle que é a bacia hidrográfica. O segundo grupo representa os fluxos observados ou estimados em pontos ou locais específicos da bacia. As cargas difusas são oriundas do ciclo de transporte das componentes do ciclo hidrológico, especialmente dos tipos de escoamento em superfície, subsuperficial e subterrâneo que ocorrem nos ecossistemas terrestres. Nesse sentido, as cuestas, vertentes e planos de escoamento (Mendiando e Tucci, 1997-a, -b, -c) apresentam uma diversidade de processos em escalas diferentes que respondem pela poluição difusa que chega até a rede de drenagem (ver Figura B1.1).

Por outro lado, as cargas pontuais são originadas por atividades intensivas, geralmente restritas às pequenas porções da paisagem, desde uma seção transversal de um rio como um efluente de origem antrópico, p.ex. doméstico, industrial, pecuária e agricultura. Embora a poluição difusa seja mais difícil de perceber na paisagem, seus efeitos são comuns ao longo de um ciclo anual. Em contrapartida, as cargas pontuais podem apresentar variação temporal significativa, em função de regras de operação de reservatórios, inundações localizadas provocadas por tormentas severas, ou até atividades antrópicas com despejo irregular de resíduos ou efluentes.

Finalmente, as cargas podem ser também classificadas de forma determinística ou aleatória. No caso, a abordagem de monitoramento e estimativa de cargas pode responder a um equacionamento com parâmetros de calibragem que são assumidos constantes (abordagem determinística) ou a partir de uma teoria sobre os erros ou desvios (aleatória).

4. REGIONALIZAÇÃO DE PROCESSOS SOB MUDANÇAS

Na Figura B1.2 aparecem resultados experimentais de produção de nitrogênio total (NT), fosfato inorgânico (POI) e sólidos suspensos totais (SST) para duas bacias hidrográficas. Estes gráficos apresentam a relação de três variáveis: no eixo horizontal aparece a componente de escala regional, representada pelo tamanho da bacia à montante do ponto monitorado. No eixo vertical mostra-se a vazão específica observada, isto é o fluxo líquido dividido pela área de drenagem da bacia.

O tamanho do círculo, medida em unidades de $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, é proporcional à carga específica, isto é o tamanho do círculo representa o produto da concentração do elemento (NT, POI ou SST) pela vazão específica que escoou na seção de monitoramento sobre o rio da respectiva bacia analisada. Uma reflexão rápida dessa figura é que o eixo vertical representa a vulnerabilidade potencial do sistema em receber cargas mássicas. Em teoria, quanto maior o tamanho da bacia é de se esperar uma menor vulnerabilidade potencial do meio em receber, transformar e diluir cargas mássicas. O tamanho do círculo é uma medida composta do potencial impacto nestes sistemas: quanto maior o círculo, maior impacto potencial. Alguns exemplos podem ilustrar casos práticos comentados a seguir.

5. EXEMPLO 1: VULNERABILIDADE E IMPACTOS SOB BACIAS HIDROGRÁFICAS

Na analogia anterior “bacia-palco”, como a vulnerabilidade da bacia seria representada? Seguindo a Figura B1.2, em tese, a vulnerabilidade potencial de uma bacia tenderia a diminuir com aumento do tamanho da área de drenagem. Por quê? Quanto maior a área de bacia contribuinte, maior o fluxo líquido que potencialmente escoará na sua rede de drenagem. Porém, este processo é de forma não-linear. Por exemplo, áreas das cabeceiras da bacia são mais suscetíveis às mudanças e ingressos de cargas mássicas; por outro lado, áreas maiores da bacia tendem a atenuar, mas não retirar, esta vulnerabilidade potencial.

Porém, a vulnerabilidade é uma condição necessária, mas não suficiente para induzir impactos. Por exemplo, uma bacia com carga poluidora considerável na sua rede de drenagem é uma condição que precisa ser comparada com a capacidade de autodepuração desses corpos hídricos. Se

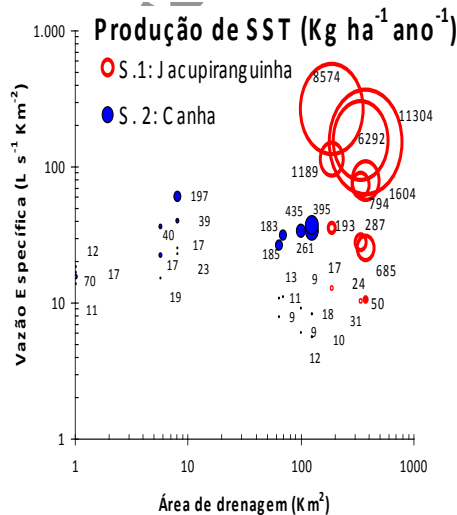
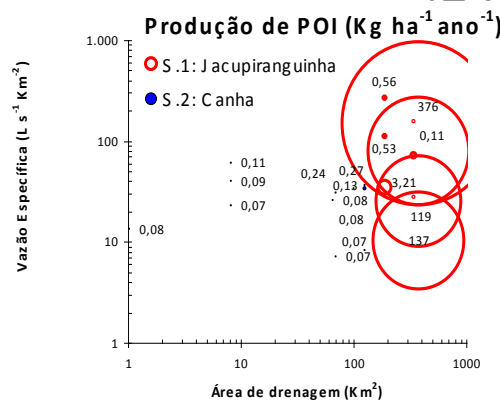
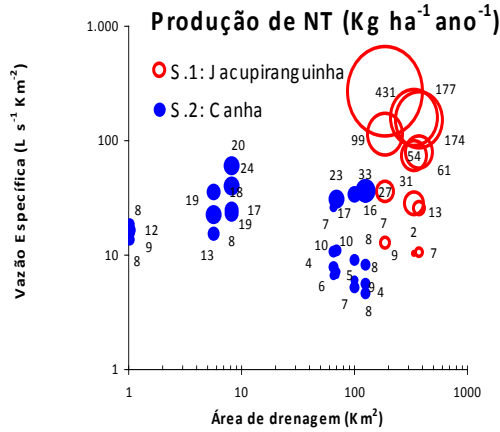


Figura B1.2: Exemplo de regionalização empírica de produção de cargas de nitrogênio total (quadro superior), fosfato inorgânico (quadro central) e sólidos suspensos (quadro inferior) em sub-bacias afluentes do Rio Jacupiranguinha (●) e Canha (○), respectivamente. Ver explicações sobre vulnerabilidade e impactos no texto.

essa capacidade de autodepuração não for alta o suficiente, há impactos pelo desequilíbrio de cargas. Por exemplo, a Figura B1.3 apresenta a variação espacial da produção de nitrogênio total na bacia desde uma zona de montante (esquerda) para uma de jusante (direita).

Na figura B2.3, a primeira área de cabeceira somente está ocupada por florestas. As outras áreas, a jusante da cabeceira, apresentam usos de florestas e agricultura mista (cultivos, solos expostos e pastagens). Esta situação foi observada para uma condição sazonal de temperatura média ambiente de 18 °C, com índice de precipitação de sete dias antecedentes à observação (IPA_7) de 9,7 mm e uma radiação solar incidente de 101 Wm^{-2} . No eixo de categorias da Figura B1.4 aparece o quociente entre o tamanho da bacia incremental entre os pontos amostrados e o tamanho da bacia de drenagem acumulada até o ponto de controle. Esta relação é um indicador potencial do grau da vulnerabilidade relativa da sub-bacia afluente parcial em relação à bacia de drenagem acumulada. Quanto maior esta relação, maior a influência espacial da sub-bacia afluente da bacia completa.

Por outro lado, na Figura B1.4 percebe-se que a produção de carga de nitrogênio total de áreas de florestas, áreas agrícolas e áreas urbanas variam espacialmente. Para taxas de produção de florestas medianamente constantes ($\approx 2,7 \text{ Kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), as três novas áreas de jusante apresentam taxas de produção de nitrogênio total muito variável, com três ordens de magnitude diferentes e decrescentes ($\approx 470, 120$ e $4,5 \text{ Kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, respectivamente). Estes valores são correlacionados positivamente com as declividades médias do relevo e, portanto, apresentam estes comportamentos. Em síntese, os impactos são relativos às condições da bacia hidrográfica e seus comportamentos dinâmicos, que dependem da ecologia local.

Para a mesma bacia, a vulnerabilidade e os impactos seriam constantes ao longo de um ano? A Figura B1.5 apresenta a comparação da sazonalidade de produção de poluição difusa para os tipos de uso, e a Figura B1.6 mostra o balanço de cargas poluidoras no balanço de massa geral, distribuído por sub-bacias, para o nitrogênio total.

Variação da Produção Potencial de NT para Usos do Solo:
Condição #1: T = 18,6 °C; I.P.A = 9,7 mm; Rad = 101 Wm⁻²

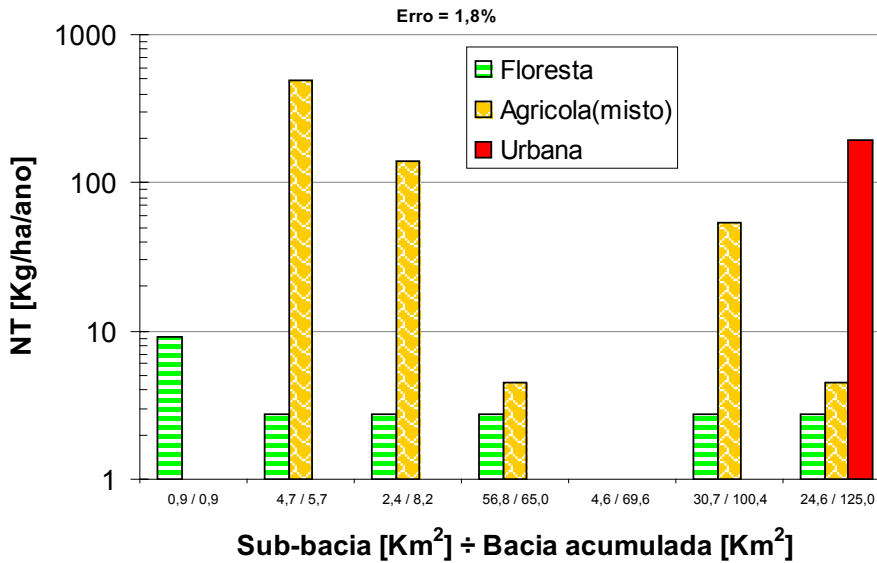


Figura B1.3: Variação espacial das produções de nitrogênio total conforme uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica. As áreas de drenagem das sub-bacias parciais e da bacia acumulada, desde montante (lado esquerdo) até o exutório (lado direito).

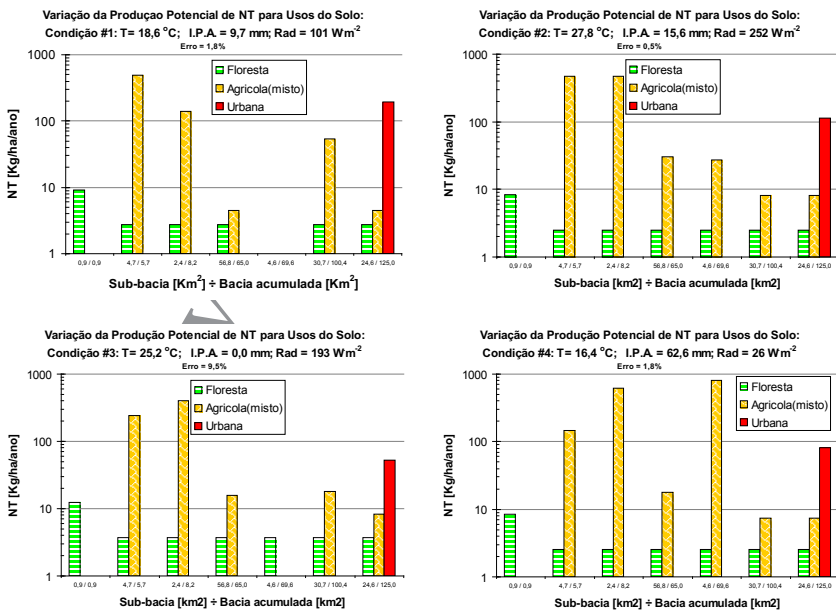


Figura B1.4: Variação espacial e temporal de produção de cargas poluidoras de nitrogênio total.

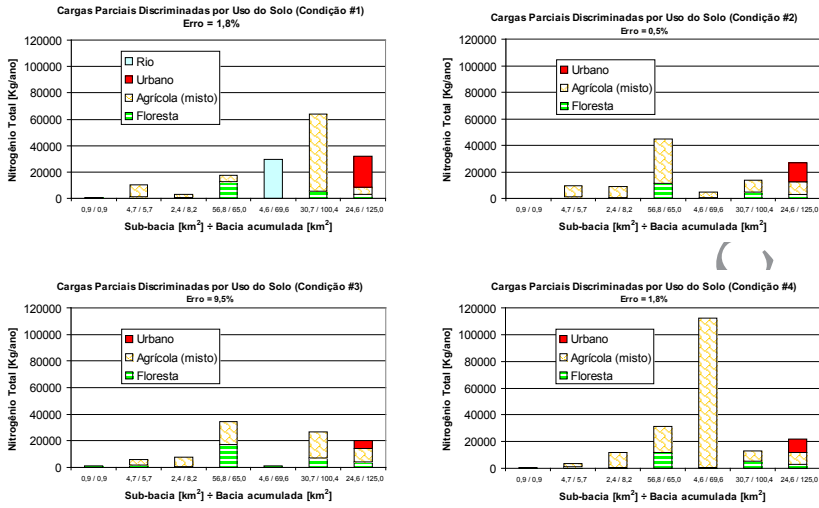


Figura B1.5: Variação espacial e temporal do balanço de cargas poluidoras de nitrogênio total.

6. REGIME QUALI-QUANTITATIVO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Dos exemplos anteriores, podemos então definir a carga poluidora transportada por um rio como carga específica por unidade de área de drenagem da bacia, na forma $Y_{i,j} = C_{i,j} \cdot Q_{i,j} \cdot A_i^{-1}$. A expressão corresponde à i -éssima bacia de drenagem com área A_i e para uma j -éssima condição sazonal, associada à vazão específica correspondente, $Q_{i,j}^* = Q_{i,j} \cdot A_i^{-1}$. A condição sazonal pode ser atribuída ao comportamento médio esperado ou regime hidrológico. Associando regime com probabilidade, podemos atribuir a mesma probabilidade de permanência de uma vazão específica, isto é $Q_{i,j}^*(Prob)$, a um percentil $q_{p\%}$ da curva de permanência, e este ser relacionado com uma carga específica, $Y_{i,j}(Prob)$.

A Figura B1.7 apresenta, de forma gráfica, o conceito de relação ec hidrológica de regimes quantitativos de vazões e qualitativos de cargas poluidoras. O método tem a limitação de que atribui, conforme a dinâmica sazonal, intervalos de variação aos valores de produção $Y_{i,j}$ das cargas sob análise. Por outro lado, permite supor que processos encontram-se em equilíbrio dinâmico que pode ter parâmetros regionalizados hidrológicamente. Essa hipótese aceita diferentes forças motrizes, p.ex sob condições de mudança do clima, do regime fluvial e/ou do uso do solo. Avaliar o comportamento de curvas de permanência quali-quantitativas é um meio simplificado de verificar os estágios de vulnerabilidade e impacto em bacias hidrográficas.

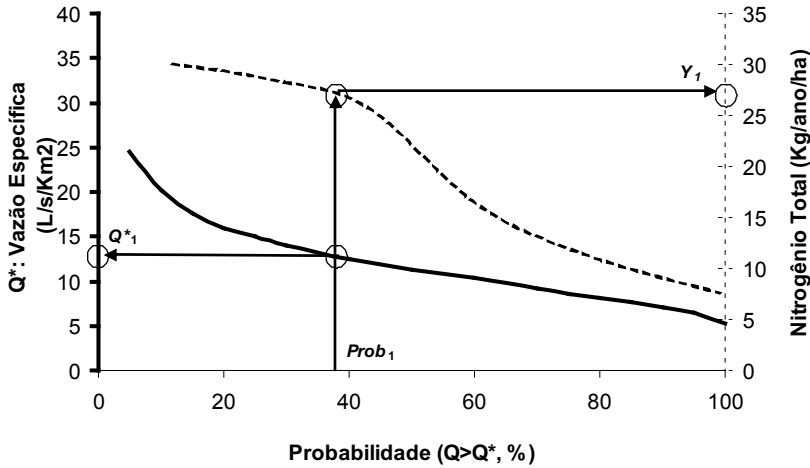


Figura B1.6: Abordagem ec hidrológica de curvas de duração quali-quantitativas para a integração de cargas poluidoras (eixo vertical da direita) com vazões de bacias hidrográficas (eixo vertical da esquerda).

7. EXEMPLO 2: INTEGRAÇÃO COM MUDANÇAS DE USO DO SOLO E DO CLIMA

A Figura B1.8 apresenta, para a mesma permanência de vazões da Figura B1.7, a estimativa de mudanças de regime fluvial, com curva de permanência sob mudança climática, a partir de aumento de temperatura média, de diminuição da umidade relativa futura e, portanto, diminuição da precipitação média e vazão de longo período. Portanto, para essa nova condição, espera-se uma diminuição de vazão específica (ΔQ^*) e de produção específica (ΔY). Por exemplo, a análise de variabilidade temporal pode assumir previsões de aumento de temperatura regional (ΔT) a partir de modelos de circulação global. Em suma, se a vazão média de longo período é afetada, a curva de linhas contínuas é modificada e, por sua vez, afeta a curva de permanência de qualidade.

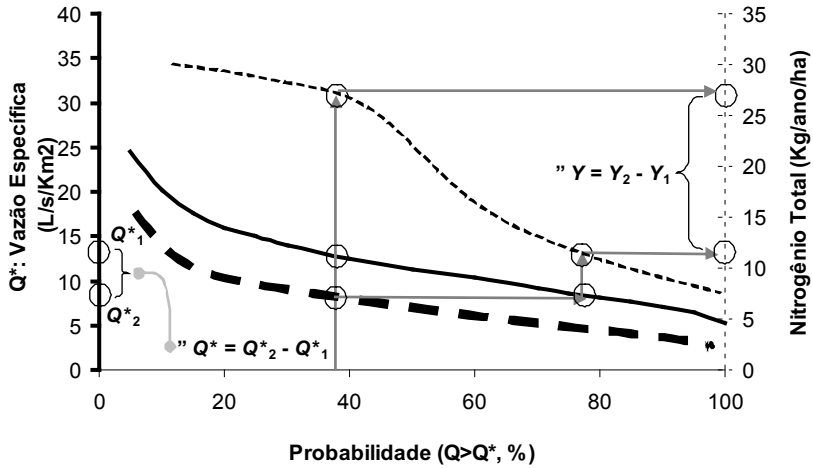


Figura B1.7: Variabilidade ou mudança climática potencial que afeta a permanência de vazão específica ($\Delta Q^* = Q^*_2 - Q^*_1$) e sua correspondente produção de carga poluidora ($\Delta Y = Y_2 - Y_1$) em bacia hidrográfica (a partir da hipótese dual da Figura B1.7).

A variação da precipitação média anual acarreta mudança na vazão média de longo período, e nos valores adimensionais da curva de permanência regional. A mudança climática de temperaturas tem impacto no regime fluvial médio esperado das condições futuras e de forma proporcional entre precipitações médias e vazões médias de longo período. Por outro lado, curvas de permanência para vazões adimensionais assumem-se como representativas, homogêneas e constantes nos cenários.

Seguindo a abordagem de Figura B1.7, apresenta-se um cenário de mudança de uso do solo, com a variação de cargas na bacia hidrográfica e sua afectação no regime fluvial de longo prazo. Sua mudança de longo prazo afeta a curva de permanência quali-quantitativa como aparece na Figura B1.9.

ARQUIVO PERMANENTE

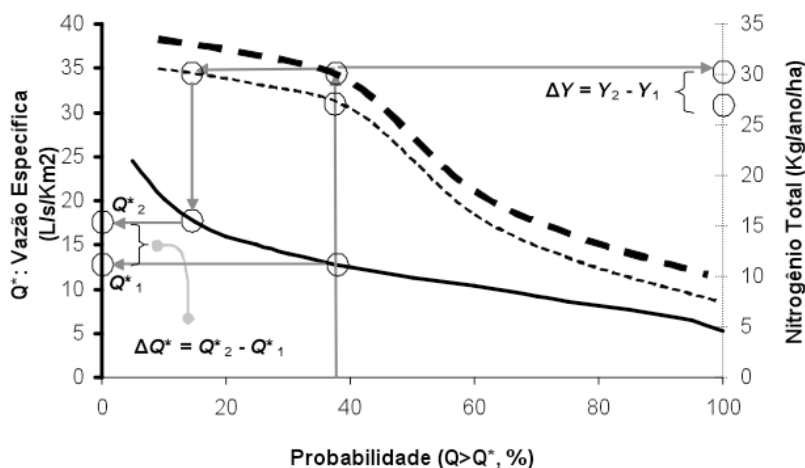


Figura B1.8: - Cenários de mudanças de uso do solo que afetam a produção de carga poluidora (ΔY) e pegada hídrica cinza (ΔWF_{grey}) e permanência de vazão específica (ΔQ^*) sobre bacia hidrográfica.

8. EXEMPLO 3: INTEGRAÇÃO COM MUDANÇAS DE USO DE SOLO

Na Figura B1.10 é apresentado um terceiro exemplo, com os alcances e limitações de cenários prospectivos de uso das várzeas: (1) da situação atual e (2) com ocupação da várzea mais construção de diques laterais. Este segundo cenário impediria a continuidade e conexão do rio durante a passagem de cheias e o transbordamento natural. Os diques, ao acelerarem o escoamento, confinariam mais as linhas de corrente e aumentariam os termos de inércia das equações de *momentum* das cheias (CUNGE *et al*, 1980; p.17); assim, por continuidade hidráulica, isto ocasiona rebaixamento das cotas hidrométricas, aumento localizado de vazões e propagação de processos erosivos nas margens e a aumento de cheias em áreas de jusante (MAYS, 2001, p.535).

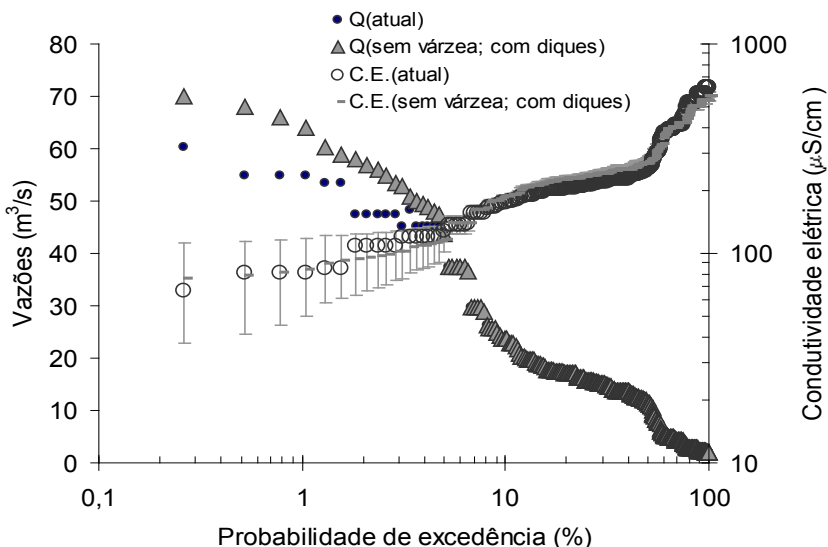


Figura B1.9: - Cenário de permanência (1) “atual”, com a manutenção das várzeas, para as vazões (●) e para a condutividade elétrica (○), e (2) “com remoção das várzeas e construção de diques” para as vazões (Δ) e para a condutividade elétrica (intervalos).

Na Figura B1.10, para as vazões altas, i.e. $Q > Q_{5\%}$, o cenário atual indica decréscimo da condutividade elétrica CE (círculos brancos), predispondo processo de diluição potencial das cargas poluidoras transportadas pelo escoamento do rio durante vazões altas. Para o cenário de ocupação da várzea, a descaracterização do uso e a construção de diques que impeçam a conexão com o rio, prováveis efeitos de natureza mista. Neste cenário, há remoção de áreas de lagoas dentro das várzeas e diminuição do perímetro molhado da seção transversal total, da várzea mais canal. Este induzido cenário, no caso, aumentaria as vazões ($+\Delta Q$) e diminuiria a condutividade elétrica ($-\Delta CE$). Este primeiro comportamento, de relação inversa ou de interação negativa entre magnitudes, é responsável pelo intervalo inferior (\perp) de CE (Figura B1.10). No entanto, conforme as novas alturas hidrométricas do segundo cenário forem menores que as do atual cenário ($-\Delta h$) e as novas áreas implantadas artificialmente na antiga várzea serem novas fontes de poluição difusa e/ou local ($+\Delta CE$), haverá novo aumento de cargas poluidoras e possível aumento de CE . Este novo processo é responsável pelo intervalo superior (\top) de CE na Figura B1.10.

9. EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CICLO HIDROLÓGICO SUPERFICIAL

Dentre os processos naturais do ciclo hidrológico superficial que contribuem para os recursos hídricos no Brasil, destacam-se dentre outros a evapotranspiração e o escoamento hidrológico (superficial e subsuperficial) como os que podem ser expressivamente perturbados pelas mudanças climáticas globais. As projeções do clima para as próximas décadas mostram consensualmente o aumento da temperatura média do ar entre 1°C a 4°C aproximadamente, e o aumento da precipitação média global entre 10% a 15% aproximadamente, esta última em parte decorrente do aumento da evaporação oceânica, com ênfase nos trópicos devido ao efeito termodinâmico (Emori e Brown, 2005). Em escala regional, na América do Sul, as várias projeções dos diferentes modelos do sistema climático mostram regiões com aumento da chuva e outras com redução da chuva, mas que não concordam inteira e convincentemente entre si – neste aspecto reside um ponto de incerteza sobre o impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos no Brasil.

A geração de escoamento superficial nos eventos de precipitação, em detrimento da infiltração da água e geração de escoamento básico, e com possíveis desdobramentos em inundações, será um impacto estimulado pelas mudanças climáticas globais na medida em que se confirmarem o aumento da frequência e/ou da intensidade dos eventos extremos de precipitação. De forma oposta, a maior ocorrência de eventos extremos de estiagem, geralmente acompanhados por ondas de calor, poderá gerar uma perturbação expressiva no padrão da evapotranspiração e conseqüentemente uma queda expressiva do estado da umidade do solo devido ao aumento da demanda evaporativa.

Na hipótese da alteração do regime de evapotranspiração pelas mudanças climáticas, pode-se por sua vez decorrer uma alteração da vazão superficial média anual, e conseqüentemente da oferta hídrica na escala de grandes bacias e microbacias. Para investigar este ponto, os seguintes aspectos podem ser por exemplo alinhados: (i) como o estado da atmosfera *per se* controla a alteração da evapotranspiração, entendida como um processo biofísico do sistema solo-vegetação; (ii) como será alterada a evaporação nos reservatórios de abastecimento; e (iii) como se mostram as projeções do clima das próximas décadas para a evapotranspiração em escala regional/continental.

No que diz respeito às possíveis mudanças na evapotranspiração real, especialmente em microbacias de áreas florestais e agrícolas, entram no mérito outras variáveis, que por sua vez também poderão se alterar pelas mudanças climáticas, em especial a radiação solar, o vento e a concentração

de CO₂ atmosférica. A evapotranspiração real é uma soma de componentes devido à transpiração, interceptação da chuva e evaporação do solo. Com o aquecimento do ar e o aumento do déficit de pressão de vapor, as perdas por interceptação e evaporação do solo podem aumentar por hipótese, e que pode ser mais expressivo caso haja concorrentemente um aumento da chuva e da umidade do solo em proporções suficientes. Para a componente de transpiração, com o aquecimento do ar, pode-se esperar um aumento devido à necessidade da planta exercer maior controle de regulação térmica, e caso não haja limitação hídrica onde possam haver formas de redução de abertura estomática compensatórias. O enriquecimento atmosférico de CO₂ por sua vez pode em tese provocar a queda da condutância estomática, para equilibrar as concentrações internas da folha, e portanto reduzir a transpiração. De maneira oposta, as plantas podem se aclimatar de forma que a condutância estomática não tenha expressiva mudança, e adicionalmente o enriquecimento de CO₂ pode levar ao aumento da produtividade primária e conseqüentemente das taxas de acréscimo de área foliar, que por sua vez aumentam a transpiração. Para ilustrar as possíveis conseqüências da elevação de CO₂ atmosférico na transpiração, mostra-se na literatura de forma dominante um efeito de queda da evapotranspiração real, desde os estudos observacionais iniciais em pequenas bacias (Idso e Brazel, 1984) até as análises prospectivas de modelos em escala global (Gedney *et al.* 2006; Betts *et al.* 2007).

As projeções da evapotranspiração reportadas no IPCC (Bates *et al.* 2008) na América do Sul mostram expressiva variação espacial (áreas ora de aumento, ora de redução), a exemplo do que ocorre com a precipitação, em que a propósito mostram-se positivamente correlacionadas, ou seja, com nítido aumento/redução da evapotranspiração em direta dependência do aumento/redução da chuva. As projeções do IPCC, todavia, ainda devem avançar muito para descrever adequadamente os processos acoplados do ciclo do carbono e do ciclo hidrológico da biosfera e em especial na grande diversidade de ecossistemas existente em escala regional na América do Sul.

No ciclo hidrológico, preocupa também a questão do armazenamento de água em reservatórios, igualmente uma questão relevante no cenário dos recursos hídricos com um potencial impacto das mudanças climáticas. Os reservatórios de abastecimento e de geração hidroelétrica, no que tange à dependência dos processos hidroclimáticos, poderão estar susceptíveis de expressivas variações de massa decorrente do balanço entre a precipitação, a evaporação e a vazão afluente. Em especial para a evaporação, os impactos variam muito se forem em regiões mais úmidas (Adeloye *et al.* ,1999) ou mais secas, nestas últimas atingindo por exemplo perdas na ordem de 70% ou mais (Helfer *et al.*, 2012). Dentre as variantes climáticas que tendem

a acelerar as perdas por evaporação, destacam-se o aquecimento do ar, a redução da umidade relativa, o aumento da velocidade do vento e o aumento da irradiância solar incidente. Além das variáveis atmosféricas, as perdas por evaporação em lagos se dão também pela variabilidade espacial destas variantes climáticas devido aos efeitos de topografia nas bordas, com modificações do vento e da circulação interna do lago, e da própria redistribuição de calor na superfície que depende da turbulência atmosférica (Fenessey, 2000).

10. ESTUDOS DE CASO NO BRASIL

É nosso ponto de vista que o entendimento dos processos de dependência da evapotranspiração e da umidade do solo com relação ao clima depende dos vários ecossistemas do Brasil e das mudanças de uso da terra, como via de conhecimento da implicação das mudanças climáticas nos recursos hídricos. Serão comentados a seguir várias contribuições de estudos do Incline abordando estes aspectos de funcionamento dos processos.

Nossas observações de umidade do solo em terra firme na Amazônia, como por exemplo na área de floresta tropical em Santarém (Bruno *et al.* 2006, Doughty *et al.* 2006, Goulden *et al.* 2006) mostrou como aquele ecossistema, mesmo em uma região com estação seca prolongada (4 a 5 meses) demonstra resistência ao estresse hídrico na escala sazonal. A percentagem de contribuição da extração da umidade do solo em cada camada (Fig. B2.10a) indicou na estação chuvosa a contribuição de 40% do primeiro metro sob a floresta, e de 60% nos primeiros 3 m de profundidade, enquanto na estação seca o padrão manifestou-se de forma mais homogênea, com extração de 75% até 6 m (11% por metro de camada). Em ambos os casos, houve extração significativa até 10 m (Fig. B2.10b), o que corrobora indicações qualitativas anteriores.

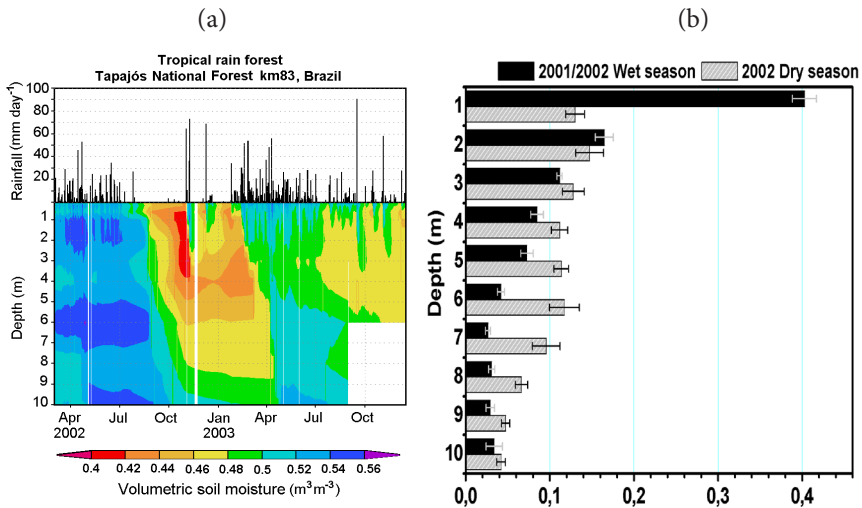


Figura B1.10: - Medidas na floresta tropical na Floresta Nacional do Tapajós: (a) Precipitação diária (barras) (mm dia-1) e perfil vertical de 10 m da umidade volumétrica do solo (m³ m⁻³); (b) Fração da extração de água pelas raízes ao longo do perfil nas estações úmida 2001/2002 (barra preta) e seca 2002 (barra cinza). Fonte: Bruno *et al.* (2006).

Os padrões de variabilidade sazonal de evapotranspiração real, com medidas em 6 torres de fluxo pelo método de *eddy covariance*, na Amazônia e nos Cerrados, especificamente sobre a floresta tropical úmida (Manaus k34, Santarem k83 e Santarem k67), floresta semi-decídua (Rondonia Jaru), floresta alagável sazonalmente (Tocantins, Javaes), e cerrado *sensu stricto* (Santa Rita, Pe de Gigante), indicaram a comparação da diferente sazonalidade dos controles climáticos e do ambiente entre as áreas. O padrão sazonal nas florestas tropicais é predominantemente marcado pelo controle da energia, ou seja do saldo de radiação, em que ocorre um pico na estação seca e uma redução na estação chuvosa. No Cerrado, por sua vez, a dependência com o saldo de radiação também é notável, mas o padrão é oposto ao dos sítios de floresta tropical, ou seja, há uma redução na estação seca e um aumento na estação chuvosa.

(A)

(B)

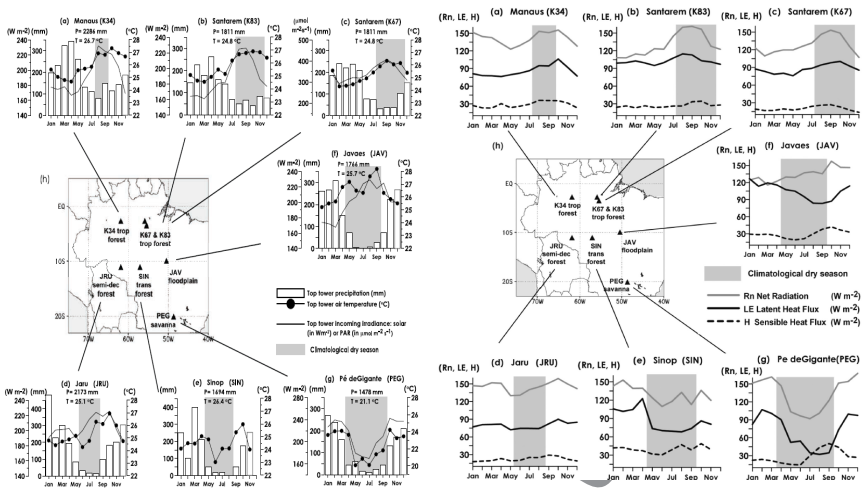


Figura B1.11: - Médias mensais de variáveis hidroclimatológicas medidas em 6 torres de fluxo no Brasil, especificamente (a) Manaus k34, (b) Santarém k86, (c) Santarém k67, (d) Rondonia, Jaru, (e) Tocantins, Javaes (f) Santa Rita, Pe de Gigante. (A) Precipitação e temperatura do ar, Precipitação em mm m^{-1} . Barras sombreadas são a média climatológica de 30 anos na estação climatológica mais próxima da torre, barras em branco são a precipitação medida na torre. A temperatura em $^{\circ}\text{C}$: linha pontilhada com quadrado branco são as médias de 30 anos da temperatura climatológica, e linha sólida com círculos em preto são a temperatura na torre. A precipitação (mm ano^{-1}) e temperatura média anual ($^{\circ}\text{C}$) são indicadas em cada sítio, em conjunto com o tipo climático (classificação de Thornthwaite). (B) fluxo de calor latente (LE) (linha sólida grossa), saldo de radiação (R) (linha sólida fina) e fluxo de calor sensível (H) (linha pontilhada), em W m^{-2} . Fontes: Rocha *et al.* (2009 a,b).

Por outro lado, na floresta tropical não somente sustenta-se, mas aumenta a evapotranspiração durante a seca apesar do deplecionamento da umidade do solo e das variações fenológicas sazonais. A maior variação anual do balanço de energia à superfície ocorreu no Cerrado, onde a evaporação aumentou no início da estação chuvosa e permaneceu alta, na média de $\sim 3.0 \text{ mm d}^{-1}$, reduzindo-se então pausadamente a partir do início da estação seca, quando então atingiu a média de $\sim 1.3 \text{ mm d}^{-1}$ (Figura B2.11).

No estado de SP as medidas da evapotranspiração real e do fluxo de CO_2 com torres de fluxo utilizando o método de eddy covariance, mostraram o balanço de água e carbono sobre plantações de cana-de-açúcar e eucalipto, reportadas em Cabral *et al.* (2010, 2012). Os máximos diários de evapotranspiração na cana-de-açúcar atingiram 5 mm dia^{-1} durante o verão e pleno desenvolvimento da cultura, com totais anuais de 829 mm e 690 mm em dois anos consecutivos, respectivamente implicando em

razões Evapotranspiração/Precipitação de 69% e 51%, respectivamente. No eucalipto, com medidas em dois anos com idade da planta entre 2 e 4 anos, mostrou valores diários de evapotranspiração abaixo de 1 mm dia^{-1} no inverno mas acima de 7 mm dia^{-1} no verão. Os totais de evapotranspiração em cada ano do eucalipto foram 1124 mm e 1235 mm , respectivamente, e representaram 82% e 96% da precipitação anual, portanto expressivamente superiores à cana-de-açúcar.

Para se avaliar o efeito das mudanças de uso da terra em escala secular do estado de SP na evapotranspiração, Martins (2011) utilizou um modelo da biosfera calibrado com informações das torres de fluxos micrometeorológicos. Mostrou-se a evapotranspiração média anual igual a $3,3 \text{ mm d}^{-1}$ na hipótese da vegetação primitiva, aproximadamente 20% superior à evapotranspiração da cobertura vegetal atual (Fig. B2.12), que foi dominada expressivamente pelas gramíneas (pastagem e cana-de-açúcar).

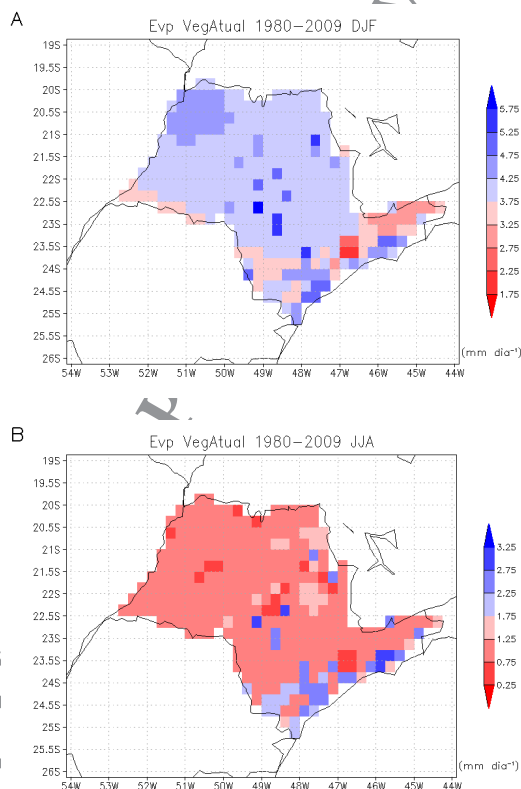


Figura B1.12: - Evapotranspiração média sazonal entre 1980 e 2009 para a vegetação atual. A) trimestre Dezembro, Janeiro e Fevereiro; B) trimestre Junho, Julho e Agosto. [mm dia⁻¹]. Fonte: Martins (2011).

Negrón-Juárez (2004) investigou a variabilidade simulada do clima no Sudeste do Brasil, por meio da simulação com o modelo atmosférico BRAMS, em que comparou a resposta da condição da vegetação primitiva com a condição da vegetação presente; verificou que temperatura do ar média diária foi $\sim 0,5^{\circ}\text{C}$ superior na condição atual em relação à primitiva, com ênfase para as áreas de cana-de-açúcar no nordeste do estado, o que decorreu principalmente devido à redução da evapotranspiração sobre plantações de cana em comparação com a evapotranspiração de cerrado que foi simulada na condição primitiva.

11. DESAFIOS E OPORTUNIDADES

Como estabelecer esforços para integrar clima, hidrologia e avaliações de gestão e políticas públicas em bacias hidrográficas urbanas e peri-urbanas a partir de impactos esperados da desagregação espacial e temporal dos modelos utilizados por grupos do INCLINE? A primeira parte desta pergunta permite explorar algumas combinações de cenários com mudança de uso da terra e de variáveis climáticas, mediante a inclusão de modelos de transferência de riscos hidrológicos, ou seguros. Como visto neste capítulo, podem ser testadas novas metodologias de avaliação de vulnerabilidade social, econômica, física e até disponibilidade a pagar para a sociedade ter segurança para enfrentar riscos de extremos hidrológicos ligados às mudanças próprias do ciclo atual do Antropoceno. A segunda parte desta pergunta possibilita avaliar balanços hídricos que incluem componentes reais e virtuais, como elementos de adaptação de demanda hídrica de longo prazo. Os cenários gerados de mudanças futuras pesquisados por grupos de INCLINE/USP podem ser aqui abordados em consonância com as componentes de demanda local e suas fontes de vulnerabilidade que pode ser mitigada com medidas estruturais e não-estruturais de recursos hídricos. Para isto, é possível aplicar metodologias aninhadas em varias escalas hidrográficas, desde lotes urbanos até bacias de médio porte, buscando medidas compensatórias de gestão descentralizada de recursos hídricos sob mudanças de longo prazo. No atual contexto brasileiro, é possível discutir recursos hídricos e mudanças com mecanismos de adaptação em, pelo menos, duas frentes: modelos de seguros e balanço hídrico de terceira geração, isto é com a inclusão de indicadores de sustentabilidade hídrica usando tanto as componentes de água real do ciclo hidrológico como a componente de água virtual ligada ao ciclo de vida de bens e serviços socio-econômicos.

Agradecimentos: Os autores agradecem à Coordenação e Secretariado do NAP/MC-INCLINE/USP e o apoio do projeto FAPESP-IVA 2008/58161-1

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADELOYE, A. N. R. NAWAZ & M. MONTASERI. Climate Change Water Resources Planning Impacts Incorporating Reservoir Surface Net Evaporation Fluxes: A Case Study, *International Journal of Water Resources Development*, 15:4, 561-581. 1999.
- BATES, B.;KUNDZEWICZ, Z. W.;WU, S.;PALUTIKOF, J. *Climate change and water*. 2008, IPCC Technical Paper VI.
- Brasil - Lei Federal 9.433/97 - *Política Nacional de Recursos Hídricos*. Pres. República, Brasília, 1997.
- BETTS, R.A., BOUCHER, O., COLLINS, M., COX, P.M., FALLOON, P.D., GEDNEY, N., HEMMING, D.L., HUNTINGFORD, C., JONES, C.D., SEXTON, D.M.H. e WEBB, M.J. Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide. *Nature* 448: 1037-1041. 2007.
- BRUNO, R. D. ; DA ROCHA, H. R. ; FREITAS, H. ; GOULDEN, M. ; MILLER, S. SOIL moisture dynamics in an eastern amazonian tropical forest. *Hydrological Processes* , v. 20, p. 2477-2489, 2006.
- BUNN, S.E.; ARTHINGTON, A.H. Basic principles and ecological consequences of the altered flow regimes for aquatic diversity. *Environmental Management*, v.30, nº 4, p. 492-507. 2002.
- CABRAL, O.M.R., ROCHA, H.R., GASH, J.H.C., LIGO, M.A.V., FREITAS, H.C., TATSCH, J.D. The energy and water balance of a Eucalyptus plantation in southeast Brazil. *Journal of Hydrology*, 388, 208-216. 2010.
- CABRAL, O.M.R., ROCHA, H.R., GASH, J.H.C., LIGO, M.A.V., TATSCH, J.D., FREITAS, H.C., BRASILIO, E. Water use in a sugar-cane plantation. *GCB Bioenergy*, 4, 555-565. 2012.
- CLARKE, R. T. *Stochastic processes for water scientists*, New York, Wiley, 1998.
- CUNGE, J. A, F. HOLLY, A. VERWEY . Practical aspects of computational river hydraulics. *Boston: Pitman Adv. Publ. Program*. 1980.
- DONOHUE, R., RODERICK, M., MCVICAR, T R. On the importance of including vegetation dynamics in Budyko's hydrological model, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 983-995, 2007.
- DOUGHTY, CHRISTOPHER ; GOULDEN, M. ; MILLER, S. ; DA ROCHA, H. R. Circadian rhythms constrain leaf and canopy gas exchange in an Amazonian forest. *Geophysical Research Letters* , v. 33, p. 1-5, 2006.

EMORI, S., e S. J. BROWN. Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L17706, doi:10.1029/2005GL023272. 2005.

FENESSEY, N. Estimating average monthly lake evaporation in the Northeast United States. *Journal of the American Water Resources Association* VOL. 36, NO.4. 2000.

GEDNEY, N., COX, P.M., BETTS, R.A., BOUCHER, O., HUNTINGFORD, C. e STOTT, P.A. Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature* 439: 835-838. 2006.

GOULDEN, M. ; MILLER, S. ; DA ROCHA, H. R. ; MENTON, M. ; FREITAS, H. C. Physiological controls on tropical Forest CO₂ exchange. *Ecological Applications* , EUA, v. 14, n.4, p. S42-S54, 2004.

HELPER, F. *et al.* Impacts of climate change on temperature and evaporation from a large reservoir in Australia. *Journal of Hydrology* 475 365–378. 2012.

IDSO, S.B. e BRAZEL, A.J. Rising atmospheric carbon dioxide concentrations may increase streamflow. *Nature* 312: 51-53. 1984.

MARTINS, C. A. Estimativa da evapotranspiração no estado de São Paulo com o modelo da biosfera SiB2. *Dissertação de Mestrado do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo*. 135 p. 2011.

MAYS, L. *Water resources engineering*, New York: John Wiley. 2005.

MENDIONDO, E. M. Challenging issues on urban biodiversity related to ecohydrology. *Braz. Journal of Biology*, 68 (4, Suppl.): 983-1002, 2008.

MENDIONDO, E. M., Tucci, C. E. Escalas hidrológicas I, II, III: conceitos, diversidade de processos, e hipótese integradora de processos na bacia vertente. *Rev. Bras. Rec. Hídricas*, v. 2, n. 1, p. 53-122. (1997-a,-b,-c)

NEGRÓN-JUAREZ, R.I. Variabilidade Climática Regional e Controle da Vegetação no Sudeste: Um estudo de Observações sobre cerrado e Cana-de-açúcar e Modelagem Numérica da Atmosfera. *Tese de Doutorado do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo*. 159 p. 2004.

NIEL, C., L. DEEGAN, S. THOMAS, C. HAUPER, A. KRUSCHE, M. BALLESTER, R. VICTORIA. Deforestation alters hydraulic and biogeochemical characteristics of small lowland amazonian streams. *Hydrological Processes*, 20: 2563-2580. 2006.

ROCHA, HUMBERTO R. ; MANZI, A. ; SHUTTLEWORTH. Evapotranspiration. In: Keller, M.; Bustamante, M.; Gash, J.; Silva Dias P. (Org.). *Amazonia and Global Change*. Washington, DC, US: *American Geophysical Union*, 2009, v. , p. 261-272.

ROCHA, HUMBERTO R. ; MANZI, ANTONIO O. ; CABRAL, OSVALDO M. ; MILLER, SCOTT D. ; GOULDEN, MICHAEL L. ; SALESKA, SCOTT R. ; R.-COUPE, NATALIA ; WOFSY, STEVEN C. ; BORMA, LAURA S. ; ARTAXO, P. ; VOURLITIS, GEORGE ; NOGUEIRA, JOSÉ S. ; CARDOSO, FERNANDO L. ; NOBRE, ANTONIO D. ; KRUIJT, BART ; FREITAS, HELBER C. ; VON RANDOW, CELSO ; AGUIAR, RENATA G. ; MAIA, JAIR F. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. *Journal of Geophysical Research* , v. 114, p. G00B12, 2009.

RODRIGUES, D. B.B.; OLIVEIRA, P.T.S.; ALVES SOBRINHO, T.; MENDIONDO, E.M. Hydrological benefits in the context of brazilian environmental services program. *Environment, Development and Sustainability* 15: 1037-1048, DOI: 10.1007/s10668-012-9424-y

WANG, D., WU, L. Similarity of climate control on base flow and perennial stream density in the Budyko framework *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 315–324, 2013.

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

B2. CIDADES E MUDANÇAS GLOBAIS: REDES ACADÊMICAS E DESAFIOS INTERDISCIPLINARES

SONIA MARIA VIGGIANI COUTINHO¹, ANA MARIA BARBIERI BEDRAN MARTINS², ARLINDO PHILIPPI JR.³

O hall de *check in* do Aeroporto Port Moresby, Papua Nova Guiné, 2006, está repleto de pessoas, bagagens, equipamentos, pacotes e carrinhos de bebês, formando filas paralelas em direção aos diversos guichês, atrás dos quais empregados uniformizados de companhias aéreas registram em seus computadores os *tickets* de embarque. Destacam-se, no meio destas pessoas, pilotos, comissários, fiscais de bagagem e policiais. Os *scanners* de raio X examinam malas que serão etiquetadas e enviadas em esteiras automáticas para os voos apropriados. Dezenas de lojas vendem todo tipo de mercadorias e *fast food*. Notam-se relógios de parede, telefones, escadas rolantes e, claro, aviões decolando e aterrissando nesse terminal. A multidão exibe expressão de bom humor, paciência e respeito, enquanto esperam em filas, cumprimentando pessoas que nunca viram e que provavelmente nunca verão novamente (Diamond, 2012).

Este relato inicial do livro de Jared Diamond é contraposto com a descrição de uma foto de 1931, tirada quando então a atual Papua Nova Guiné, fora descoberta. Na foto, os antigos habitantes ainda aparecem utilizando ferramentas de pedra e vestimentas rudimentares. Vivendo em quase total isolamento do mundo, olham desconfiados e amedrontados para a máquina que lhes tira um instantâneo. Isso há apenas 75 anos atrás! (Diamond, 2012)

Em uma geração ou duas estas pessoas aprenderam a escrever, usar computadores e aviões. Algumas devem ter sido as primeiras pessoas de suas tribos a aprenderem a ler e escrever e hoje levam seus velhos pais atônitos em viagens de avião. Se não fosse a imagem atual, reflete Diamond

1. Pós-doutorado pela Faculdade de Saúde Pública/USP, com apoio FAPESP.

2. Doutoranda da Faculdade de Saúde Pública/USP, com apoio Capes e CNPq.

3. Professor Titular da Faculdade de Saúde Pública/USP, Coordenador do subgrupo "Saúde - Vulnerabilidade e Adaptação no Contexto da Saúde Ambiental" do NapMC/INCLINE.

(2012), quem poderia apostar que uma sociedade tal qual demonstrada na foto de 1931, seria capaz de tornar-se assim em apenas uma geração?

A base econômica da humanidade baseia-se na exploração de recursos naturais, renováveis e não renováveis. Esse fato determina a dependência do processo de desenvolvimento na continuidade da existência dos ecossistemas e dos estoques de recursos naturais. Trata-se dos serviços que os ecossistemas fornecem à humanidade (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

O homem sempre alterou o seu meio na busca de seus interesses, convertendo campos e florestas em plantações agrícolas, mudando o curso de rios e destruindo espécies. Estas alterações, apesar de trazerem benefícios econômicos em curto prazo, acabaram por impor em um prazo mais longo altos custos ao meio ambiente.

Em 75 anos, a população da Papua Nova Guiné experimentou mudanças que levariam anos para ocorrer no resto do mundo, mesmo considerando que as ferramentas das modernas sociedades sejam relativamente novas, pois surgiram nos últimos 11 mil anos, a partir dos quais a maioria das sociedades passou de sociedades tradicionais, nas quais viver em bandos e tribos dependentes da caça e pesca era normal, e em alguns lugares ainda é, para viver em sociedades modernas, nas quais poucas pessoas envolvem-se na produção agrícola de alimentos que servem o restante da população (Diamond, 2012).

De fato, ao contrário de sociedades que ainda dependem diretamente da pesca, da plantação ou da extração de produtos florestais para sua sobrevivência diária, outra grande parcela da população vive em centros urbanos, longe do local onde os bens e serviços são produzidos, perdendo, por isso, quase que por completo, a ligação direta com os ecossistemas naturais. Os bens para consumo são facilmente encontrados nos centros comerciais e há dependência de tecnologia para os serviços de abastecimento de água e energia. Este distanciamento entre o consumidor e os locais de produção faz com que a atenção para importância dos recursos naturais só seja notada em situações de carência ou de desabastecimento, momento em que todos se tornam conscientes do real valor destes recursos e do grande custo econômico gerado pelo mau gerenciamento do meio ambiente.

CIDADES: VILÃS E VÍTIMAS

A maioria da população encontra-se vivendo em áreas urbanas. Estimativas de 2007 das Nações Unidas demonstram que o crescimento da população mundial urbana deve continuar sendo mais rápido do que o crescimento da população mundial. Como consequência, a população urbana mundial,

em 2011, era de 3,63 bilhões (52 %), devendo alcançar 4,98 bilhões (60%), em 2030, e 6,25 bilhões (67%), em 2050.

No Brasil, a situação é ainda mais alarmante, com 84,4% da população já vivendo, pelo censo de 2010, em áreas urbanas. Projeções do IBGE estimam que, em 2050, a população brasileira seja de 215 milhões de pessoas, o que, se mantidas as percentagens atuais de população urbana, demandará infraestrutura e serviços urbanos para milhares de habitantes a mais em regiões já saturadas e impactadas (IBGE, 2008, p. 28).

O adensamento sem infraestrutura das cidades, sem prévio planejamento, com carência de recursos e de infraestrutura, e padrões atrasados de gestão, vem gerando problemas de moradia, saneamento, doenças, atendimento hospitalar deficiente, pobreza, degradação ambiental e poluição, cujo efeito tem sido tema de diversos estudos em saúde pública (Carmo, 2005). Além disso, as cidades criam condições para que a geração de calor combinada com a impermeabilização do solo diminua a percolação da água da chuva no solo, tornando-as altamente vulneráveis ao aquecimento e seus efeitos em eventos extremos (Campbell-Lendrum e Corvalán, 2007).

As cidades são, direta ou indiretamente, fontes de emissão de gases do efeito estufa, pela queima de combustíveis fósseis para aquecimento, arrefecimento, processos industriais e transporte de mercadorias e de pessoas (Grimmond, 2007), mas estes fatores, determinantes para determinação das emissões de gases de efeito estufa, dependem quase exclusivamente do modo como as cidades crescem, da densidade populacional, do uso do solo, do transporte, e como demandam energia.

Em outras palavras, não são cidades, ou a urbanização, por si só, que contribuem para as emissões de gases de efeito estufa, mas sim como ocorre o processo de crescimento, ou desenvolvimento dessas áreas.

Dentro do espectro das mudanças globais, as mudanças climáticas refletem o impacto de processos socioeconômicos e culturais sobre os recursos naturais e ciclos biofísicos, tais como aumento populacional, urbanização, pobreza e inovações tecnológicas que possibilitam aumento da extração de recursos naturais (McMichael, 1999; Confalonieri *et al*, 2002).

Embora as áreas urbanas ocupem pouca massa global de terra (Potere e Schneider, 2007), elas contribuem com grande percentagem para as emissões de carbono (O'meara, 1999, p. 07; Grimm *et al.*, 2008). Neste sentido, Svirejeva-Hopkins, Schellnhuber e Pomaz (2004) buscam estimar a contribuição qualitativa e quantitativa das áreas urbanas para o ciclo global do carbono (GCC), considerando, não somente as emissões antrópicas diretas de CO₂ (estimadas entre 96 a 98%), mas as derivadas da conversão de ecossistemas e paisagens naturais em áreas urbanas, para o espriamento

das cidades. Churkina (2008) indica, neste sentido, a necessidade de modelagem urbana do ciclo de carbono que inclua observação tanto de fluxos biofísicos e humanos, quanto suas inter-relações.

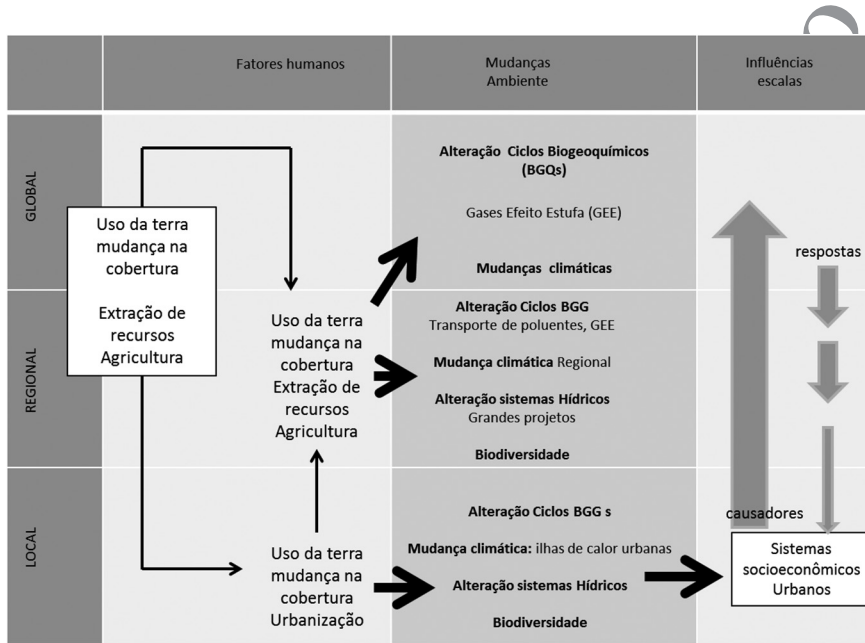


Figura B2.1: Estrutura do Sistema Socioeconômico Urbano
 Fonte: Traduzida de Grimm *et al.*, 2008, p. 758.

De acordo com Grimm *et al* (2008), o aumento da temperatura no interior das cidades já excede o aumento previsto da temperatura global previsto para as próximas décadas. Embora as alterações climáticas locais exerçam maior influência sobre os ecossistemas urbanos locais do que sobre as temperaturas globais, as alterações globais e regionais representam risco para as cidades, que terão que fortalecer sua capacidade de resposta, com medidas de mitigação e adaptação, bem como estratégias de mercado. A influência da mudança climática global sobre as cidades, portanto, pode ser sobreposta às alterações locais no clima que são típicas da urbanização como aumento das temperaturas mínimas, aumento das máximas, redução ou aumento das precipitações (Fig. B2.1).

As ilhas de calor podem constituir exemplo da alteração climática antropogênica nas cidades. Estas costumam ter maiores temperaturas do ar e de superfície do que as áreas rurais, especialmente durante as noites. Estas ilhas podem resultar de calor devido ao modelo de uso do solo utilizado, o tamanho da cidade, o aumento de superfícies impermeabilizadas, a redução de vegetação, entre outros. Seus efeitos,

por sua vez, poderão impactar, não somente o clima local e regional como também os recursos hídricos, a qualidade do ar, a saúde, a biodiversidade, o funcionamento dos ecossistemas, além de poderem induzir a formação de poluição fotoquímica e criarem padrões de circulação do ar de forma a favorecer a dispersão de poluentes para longe da cidade. O aumento da temperatura pode gerar maior consumo de energia para tornar as residências e locais de trabalho com temperaturas mais baixas (Grimm *et al.*, 2008). Para garantir os múltiplos usos da água, as cidades alteram sistemas hídricos, com retificação de rios, construção de barragens e canais, perdendo importantes ecossistemas.

E A SAÚDE, PARA ONDE VAI?

Sabendo-se que a saúde sofre alteração pelas variações temporais e geográficas de temperatura e de clima (McMichael *et al.*, 2004), de acordo com diversos estudos (Organização Pan-Americana da Saúde *et al.*, 2008; World Health Organization e World Meteorological Organization, 2012; Confalonieri *et al.*, 2002; Kasperson e Kasperson, 2001; Campbell-Lendrum e Corvalán, 2007; McMichael *et al.*, 2004) estima-se que as alterações climáticas intensificarão, direta ou indiretamente, doenças que podem também ser atribuídas a múltiplas causas.

Um aumento da temperatura exercerá, por exemplo, impacto na incidência das doenças infecciosas, que em geral são sensíveis às alterações climáticas, embora muitas delas, como as diarreias, que chegam a matar dois milhões de pessoas por ano; meningites e malária, que matam cerca de um milhão de pessoas ao ano, sejam determinadas também por outros fatores, tais como pobreza, falta de saneamento, falta de cobertura de vacinas, entre outros. A dengue, que afeta cerca de cinquenta milhões de pessoas todos os anos, está associada à urbanização sem planejamento, moradias precárias, entre outros fatores.

Nesse sentido, Confalonieri *et al.* (2002, p. 144) destaca que a saúde poderá ser afetada por meio de alterações nos padrões das doenças infecciosas endêmicas transmitidas pela água ou por vetores; pela mudança na distribuição geográfica e abundância de espécies; pela diminuição da biodiversidade de ecossistemas marinho ou pelas alterações em eventos extremos, tais como as tempestades, furacões, ondas de calor e inundações, modificando a distribuição dos padrões locais de tempo, principalmente a prevista intensificação do ciclo hidrológico, que podem gerar mortes associadas com acidentes e com epidemias de doenças transmissíveis derivadas de desastres climáticos.

Nesse sentido, avaliação e previsão meteorológica são importantes no sentido de anteverem-se cenários em que epidemias possam ocorrer e, assim medidas de controle possam ser tomadas, mas certamente devem ser acompanhadas de melhorias em programas de saúde, habitação e saneamento (World Health Organization e World Meteorological Organization, 2012).

Os impactos das mudanças climáticas sobre a saúde podem ocorrer de forma direta, como vêm ocorrendo com os eventos extremos, tais como ondas de calor, furacões e inundações, ou indireta, pela alteração nos ecossistemas e ciclos biogeoquímicos que podem aumentar a incidência de doenças infecciosas e algumas doenças não transmissíveis. Embora o aumento da temperatura possa gerar invernos menos rígidos e diminuição da disseminação de alguns vetores, reduzindo a mortalidade, em geral entende-se que os impactos negativos serão mais importantes (Barcellos *et al.*, 2009)

O esquema da Figura B2.2, proposto por McMichael, Woodruff, Hales (2006), demonstra que o aquecimento global pode ter consequências diretas sobre a morbidade e mortalidade, por meio da produção de desastres como enchentes, ondas de calor, secas e queimadas como, por exemplo, a onda de calor que atingiu a Europa Ocidental no verão de 2003, causando a morte de cerca de 15.000 pessoas na França (Kovats, Wolf e Menne, 2005), que ocorreram muito mais por falta de atendimento em situações de emergência, do que por questões de agravos à saúde (Barcellos *et al.*, 2009).

Estudos ressaltam que eventos extremos, tais como enchentes, secas, queimadas e inversões térmicas podem modificar a dinâmica das doenças de veiculação hídrica e respiratórias, através de um agravamento nas condições de qualidade da água e do ar. Flutuações climáticas sazonais podem produzir efeito sobre a dinâmica de doenças vetoriais, como a dengue e malária (Organização Pan-Americana da Saúde *et al.*, 2008; Barcellos *et al.*, 2009)

Em contrapartida, as respostas em relação a alterações climáticas estão diretamente associadas a fatores individuais ou coletivos, tais como idade, saúde, entre outros (Martins *et al.*, 2004).

Estas questões são desafios para pesquisadores em saúde pública, na medida em que estando diante de impactos cada vez mais complexos, limites disciplinares devem ser transpostos para engajar, não somente as ciências sociais ou humanas, mas as diversas ciências da terra. A abordagem interdisciplinar passa a ser necessária devido a complexidade que significa, por exemplo, a avaliação das mudanças climáticas sobre a saúde (Confalonieri *et al.*, 2002, p. 153; McMichael, 2003; Jacobi, 1996).

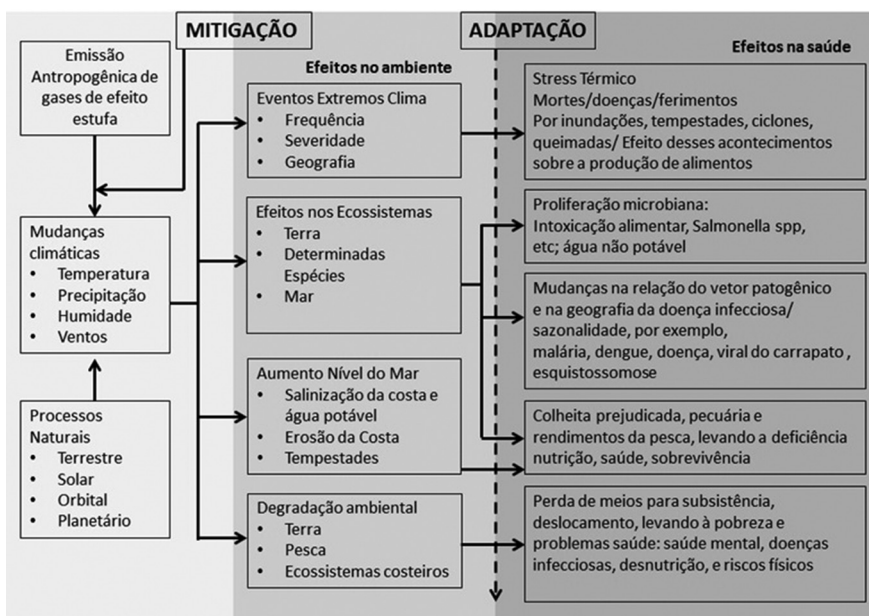


Figura B2.2: Meios pelos quais as Mudanças Climáticas podem afetar a saúde
 Fonte: Traduzido de McMichael, Woodruff, Hales, 2006, p. 860

SOB O ENFOQUE DAS CIÊNCIAS AMBIENTAIS

Entre saberes, alguns são naturalmente especiais, como as ciências ambientais. O ambientalismo toma força em um momento em que se observa, de um lado, o aumento populacional e o crescente uso dos recursos naturais, e, de outro, os vários desastres ambientais, como o da Baía de Minamata, no Japão, o de Bhopal, na Índia e o da Usina Nuclear de Chernobyl, na antiga União Soviética, durante as décadas de 1960 e 1980, trazendo ao mundo em escala planetária a preocupação com os problemas ambientais, que antes eram preocupações locais e, mais à frente confinadas apenas às fronteiras dos estados nacionais. Com efeito, diante da poluição de rios internacionais, da chuva ácida, da depleção da camada de ozônio, do efeito estufa e de outros problemas, entendeu-se que era preciso encontrar novos instrumentos de intervenção capazes de alcançar o espaço internacional (Barbieri, 1997) e pesquisas que enfrentem estas questões.

As teorias científicas mais tradicionais não são capazes de oferecer soluções viáveis para abordagem de fenômenos cada vez mais complexos (Alvarenga, Sommerman e Alvarez, 2005, p.13), surgindo a necessidade de um princípio maior do que o da simplificação e fragmentação, que seria o “princípio da complexidade (Morin, 2010, p.30).

Estes novos saberes exigem mudança de paradigmas, produção de novos conhecimentos, diálogo, hibridação, integração de saberes e colaboração de diferentes especialidades, sugerindo uma nova organização interdisciplinar do conhecimento com o objetivo de se alcançar desenvolvimento em bases mais sustentáveis (Leff, 2001).

A nova realidade global e o meio ambiente, conforme Coimbra (2002, p. 290-291), exigem uma multivisão, uma conjugação de olhares sobre o Universo e intercâmbio permanente entre pessoas, uma vez que “O método científico moderno da análise decompôs o mundo em tantos fragmentos, cada qual criando à sua volta uma esfera de conhecimentos, que acabamos por precisar uns dos outros até nas informações mais banais”.

O papel da academia, então, enquanto produtor e divulgador do conhecimento científico perante uma sociedade cada vez mais complexa, é oferecer informações para permitir uma melhor formulação e seleção das políticas de meio ambiente e desenvolvimento no processo de tomada de decisões, sugerindo como objetivos para estes fins o aumento do número de programas interdisciplinares de pesquisa e a expansão de redes de informação científica e tecnológicas regionais e mundiais (Conferência das Nações Unidas Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1997, item 35.1).

A atividade científica atual, ao contrário de uma posição social periférica, passa também a ser um processo inter-retroativo, onde ciência é colocada no centro da sociedade, transformando-a e sendo transformada por ela (Morin, 2010), sendo capaz de estabelecer ligações complexas, a fim de constituir-se fonte de informações e subsídios à formulação e implementação de políticas públicas.

A complexidade destas questões, entende Leff (2001, p. 238), exigirá a interdisciplinaridade, enquanto método para a integração de saberes. E não por acaso, o Congresso de Nice sobre “A interdisciplinaridade nas Universidades”, em 1970, é contemporâneo à publicação “Os limites do crescimento”, de autoria de um grupo coordenado por Donella Meadows, que aparece como marco que pautará todas as discussões ambientais durante toda a década de 1970, e à Conferência de Estocolmo, de 1972. De acordo com Klein (1990, p. 22):

O pensamento interdisciplinar surge a partir do discurso de unificação da ciência, da necessidade de síntese e integração do conhecimento, que fora compartimentalizado a partir do século XIX, contudo este pensamento encontrava limitações, e pode-se dizer, ainda encontra, na estrutura organizacional das universidades, na política de disciplinas individuais, na possibilidade de conexão

entre as disciplinas e possibilidade de que um conceito possa ser tão geral a ponto de ser capaz de incluir todas as disciplinas.

Passa-se também a considerar a visão interdisciplinar como essencial à pesquisa ambiental, devendo ser aplicada, tanto nas metodologias de pesquisa, quanto na formação de equipes e compreensão do meio ambiente de forma integrada (Philippi Jr., 2000).

Klein (1990) apresenta a origem do conceito de interdisciplinaridade como sendo, para alguns, um conceito antigo, já presente em Platão, Aristóteles, Kant, Hegel, entre outros, descritos como pensadores interdisciplinares e enciclopédicos, e, para outros, como apenas surgido na metade final do século XX, com a reforma na educação, a pesquisa aplicada e os movimentos através das fronteiras disciplinares.

Para Rocha (2001), no iluminismo do séc. XVII já se pressupunha a aproximação das diversas ciências, visando a síntese, a totalidade e a complexidade em detrimento da simplificação.

No entanto, o pensamento interdisciplinar surge modernamente no discurso sobre a unificação da ciência, a partir da necessidade de síntese e integração do conhecimento, que fora compartimentalizado a partir do século XIX, com “a evolução moderna das ciências naturais, a ‘cientificação’ geral do conhecimento, a revolução industrial, os avanços tecnológicos e agitação agrária”, que limitavam, em certo ponto, e ainda limitam hoje, a formação integral dos indivíduos pela estrutura disciplinar das universidades (Klein, 1990).

Segundo Klein (1990, p. 22), a expansão do pensamento interdisciplinar teria se dado em virtude de tentativas de se retomar a ideia de unidade e síntese, contudo esta expansão encontrava limitações, e pode-se dizer que ainda em certos pontos encontra, na estrutura organizacional das universidades, na política de disciplinas individuais, na questão de poder fazer conexões entre as disciplinas e possibilidade de que um conceito possa ser tão geral a ponto de ser capaz de incluir todas as disciplinas.

Conceitualmente, a interdisciplinaridade possui objetivo diferente da multidisciplinaridade, pois envolve a transferência de métodos de uma disciplina para outra e há alargamento nos limites das disciplinas, podendo inclusive gerar novas disciplinas (Nicolescu, 2009), enquanto que a multidisciplinaridade refere-se a estudar determinado tópico de pesquisa a partir da perspectiva de várias disciplinas ao mesmo tempo, que irão incorporar perspectivas das diversas disciplinas, trazendo algo a mais ao universo disciplinar. Contudo este algo a mais será sempre usado a serviço de uma disciplina. Na verdade, Nicolescu (2009, p. 03) alega que a abordagem multidisciplinar transpassa os limites disciplinares enquanto seus objetivos permanecem limitados à estrutura disciplinar de pesquisa.

Para o documento da área interdisciplinar da Capes a multidisciplinaridade é entendida como a “agregação de diferentes áreas do conhecimento em torno de um ou mais temas, no qual cada área ainda preserva sua metodologia e independência”. Já a interdisciplinaridade é entendida como “onde se faz a relação entre os saberes, o encontro entre o teórico e o prático, o filosófico e o científico, a ciência e tecnologia, apresentando-se, assim, como um saber que responde aos desafios do saber complexo. A interdisciplinaridade se coloca como espaço privilegiado, como decorrência de sua própria natureza transversal indicada em seu prefixo, para avançar além das fronteiras disciplinares, articulando, transpondo e gerando conceitos, teorias e métodos, ultrapassando os limites do conhecimento disciplinar e dele se distinguindo, por estabelecer pontes entre diferentes níveis de realidade, diferentes lógicas e diferentes formas de produção do conhecimento” (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, 2009, p.06).

Trata-se de formas diferenciadas e, muitas vezes complementares de geração de conhecimento, que exigem a identificação de novas possibilidades e limites.

Fala-se de uma nova produção do conhecimento, que idealmente deve ser concebida e desenvolvida dentro de uma racionalidade substantiva, onde haja articulação das ciências e paradigmas, que afaste as especialidades em favor da integração de saberes, onde esteja envolvida a sociedade, que transforma o ambiente e é transformada por ele. Onde o trabalho em rede, por sua característica, implique não mais um trabalho sistêmico, mas um trabalho onde a conformação dos nodos da rede se forma e se desfaz inúmeras vezes, de acordo com interesses e objetivos dos participantes da rede. Ambiente este complexo de cujas predições esbarram na incerteza.

PRODUÇÃO DE CONHECIMENTO EM REDE

As atividades em grupos e rede, principalmente as acadêmicas, passam a facilitar a interação, a cooperação e a transferência de conhecimentos e tecnologia entre grupos em torno de tema de interesse comum. Por meio destes podem ser desenvolvidas atividades de formação, capacitação, intercâmbio, mobilidade e interação científica, com o objetivo de manter as instituições pertencentes à rede em posição relevante em relação ao tema tratado.

A sinergia de um grupo ou rede, além da vantagem de somar conhecimento e experiências entre as diversas instituições participantes, se estende à soma de esforços no tempo gasto na pesquisa, ao capital financeiro investido e à infraestrutura necessária para o funcionamento da rede.

Os grupos e redes de pesquisa podem melhorar significativamente a oportunidade de influência, através da solidariedade, lealdade, confiança e reciprocidade que promovem. Desta forma comportamentos oportunistas diminuem em favor da cooperação em um problema comum de projeto político, além de que melhores recursos e capital social podem ser mobilizados no esforço de estabelecer as agendas políticas (Stone, 1996, p.134).

O pesquisador atento à necessidade de se comunicar e criar formas não compartimentalizadas de conhecimento encontra saída na integração, na participação de grupos e redes de pesquisa que aos poucos vão sendo criadas dentro e fora das instituições de ensino. Entre os diversos tipos de redes existentes, as redes ambientais surgem a partir da necessidade da integração de saberes necessária à pesquisa ambiental.

Como preconiza Coimbra (2002, p.290), “o meio ambiente, como realidade global, só pode ser visto em multivisão. (...) É a conjugação de olhares sobre o Universo que nos dará a visão de conjunto, o sentido cósmico da nossa realidade”.

A nossa realidade demonstra-se cada vez mais intrincada de relações das mais diversas ordens e níveis – o local com o global; o social com o ambiental e o econômico. Exige-se igualmente uma nova governança de conformação diferente. A ciência vem demonstrando há alguns anos que o paradigma até então dominante não é mais suficiente para abarcar a complexidade das relações do homem com a natureza.

Dito nas palavras de Pena-Vega (2005, p. 31) “o princípio fundamental da ecologia é baseado na interação, na interdependência. Um ecossistema é, então, um princípio dinâmico (...), um ciclo gigantesco que engloba o conjunto da biosfera e no qual todas as unidades de interação são interconectadas numa vasta e intrincada rede de relações”.

Assim, não é mais possível um método científico que decomponha o mundo em fragmentos, criando esferas de conhecimentos, mas é necessária uma nova ciência “baseada na união cooperativa entre previsibilidade/imprevisibilidade, certo/incerto, determinado/indeterminado, complicado/completo, ordem e desordem” (Pena-Vega, 2005, p.23).

Se essa produção do conhecimento exige uma reforma do pensamento teórica e conceitual, os diversos encontros ambientais desde a década de 1960 atestam a necessidade da integração, da cooperação, do trabalho em rede.

A Carta da Terra, projeto iniciado pelas Nações Unidas e finalizado como uma iniciativa global da sociedade civil envolveu mais de 4500 organizações internacionais, exemplifica a necessidade da construção de relações entre as

nações para enfrentamento das questões ambientais, requerendo um novo sentido de interdependência global e de responsabilidade universal (United Nations, 1982). Além disso, a constituição de redes de natureza internacional permite o desenvolvimento de estudos comparados que, sem rede, seriam difíceis de serem feitos.

Os termos em que o Relatório Brundtland foi concebido demonstra claramente o esforço cuidadoso e gradual de construir relações entre os ministérios, organizações e agências regionais e internacionais, ainda que tenha disposto literalmente que era frustrante a tentativa das instituições políticas e econômicas, que evoluíram sob a regência de um mundo fragmentado, em se adaptar e cooperar com a nova realidade (Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1988).

Uma atenta leitura de suas 428 páginas demonstra a seriedade e amplitude em que foi construído, e o esforço de se trabalhar de forma coletiva. O grupo era formado por 22 comissários, representantes de 23 países, muitos deles em desenvolvimento, mas também houve a representação de diversos países desenvolvidos. A grande maioria dos participantes era de grandes especialistas que ocupavam importantes cargos em seus países. Junto ao comissariado, foram criados painéis consultivos integrados por especialistas de renome para orientação nas recomendações e conclusões do grupo nas áreas de energia, indústria e segurança alimentar e também um corpo de juristas para assisti-los na questão dos princípios e direitos legais. Além disso, foram realizadas diversas reuniões deliberativas (audiências públicas) em todas as regiões do mundo, para conhecer de perto suas questões ambientais e de desenvolvimento e, ao mesmo tempo, colher sugestões e preocupações junto ao governo, instituições de pesquisa, Organizações não Governamentais, setor industrial e pessoas em geral. Como resultado, foram oferecidas cerca de 10 mil páginas de material para análise (Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1988).

A questão ambiental se apresenta, portanto, com necessidade de uma multivisão e de uma atuação coletiva e cooperativa, que acaba induzindo naturalmente o trabalho em rede, que seria o formato marcante das sociedades contemporâneas (Castells, 2000).

Várias são as organizações internacionais de pesquisas ambientais que possuem este formato desde a década de 1990, como o *International Institute for Sustainable Development* (IISD), no Canadá; a REDESA – *Red de Instituciones y Expertos em Estadísticas Sociales y de Médio Ambiente de América Latina y el Caribe*, com temas ambientais mais amplos. No tema das Mudanças Climáticas pode ser citada a *Climate Change Knowledge Network* (CCKN); a *Urban Climate Change Research Network* (UCCRN); a *Asian Cities Climate Change Resilience Network* (ACCCRN); a *Climate Action*

Network Australia (CANA), além da *Climate Leadership Group*, que engloba representantes das 40 maiores cidades do mundo.

A *Climate Change Knowledge Network* (CCKN), coordenada pelo IISD - Instituto Internacional para o Desenvolvimento Sustentável - Canadá foi criada em 1998 para o intercâmbio de conhecimento e experiências entre países desenvolvidos e em desenvolvimento sobre as atividades relacionadas com as alterações climáticas e para tornar esse conhecimento acessível a todos os países do mundo. Seus projetos envolvem especialmente um Compêndio de Clima, que apresenta o status dos principais atores e negociações envolvidos no tema; construção de capacidade para negociações em países em desenvolvimento; programas para avaliar o papel de energias renováveis descentralizadas; questões de vulnerabilidade e adaptação e mecanismos do protocolo de Quioto.

A *Urban Climate Change Research Network* (UCCRN), vinculada a Universidade de Columbia, EUA, tem como objetivo a análise da mitigação e adaptação à mudança climática sob a perspectiva urbana, a fim de compartilhar conhecimentos entre pesquisadores, tomadores de decisões e partes interessadas. Neste sentido, possui mais de 200 membros de 60 cidades, criando uma rede que liga grandes e pequenas cidades de países em diferentes graus de desenvolvimento, com ênfase em produção de ciência de ponta.

A rede *Asian Cities Climate Change Resilience Network* (ACCCRN), ligada à Fundação Rockefeller, pretende catalisar a atenção, financiamento e ação na construção de resiliência às alterações climáticas para as pessoas pobres e vulneráveis através da criação de modelos e metodologias para avaliar e abordar o risco através do envolvimento ativo e análise de várias cidades.

A rede *Climate Action Network Australia* (CANA) é uma aliança de mais de 50 pesquisadores em nível regional, estadual e nacional de meio ambiente, saúde e desenvolvimento da Austrália que reúne esforços para fortalecer respostas da sociedade e políticas climáticas mais eficazes, em nível nacional e internacional.

O grupo C40 (*Climate Leadership Group*) foi criado em 2005, pelo então prefeito de Londres, Ken Livingstone, que convidou 18 representantes das maiores cidades do mundo, para se reunirem, discutirem e trabalharem juntos para combater o aquecimento global e as mudanças climáticas. Esta iniciativa tem por objetivo criar cooperação na redução da emissão de gases do efeito estufa e promover ações em grupo entre empresas, administrações públicas e a sociedade, visando combater as mudanças climáticas.

O Relatório de Desenvolvimento Humano de 2002 dispõe que o número de redes não governamentais transnacionais chegou a 20.000 em todo o mundo

(Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, 2002, p.102). De acordo com o World Resources Institute *et al* (2003), as redes, especialmente as coalizões de Ongs que atuam entre fronteiras, podem ajudar a transcender questões de soberania nacional, reconciliar diferenças Norte-Sul, e chamar atenção de uma audiência mundial para as questões regionais e locais importantes, obtendo muito mais resultados do que muitos especialistas em política conseguiriam obter. Neste sentido, são diversas as experiências que podem ser destacadas, sendo algumas coordenadas por universidades.

No Brasil este movimento mostra-se crescente, tanto no âmbito das universidades e institutos de pesquisa, quanto nas agências de fomento e setor empresarial. Neste sentido, em 1999, foi criada, pelo Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS), a Rede Brasileira de Produção Mais Limpa, com a participação de dezenove estados brasileiros, que permitiram a implementação da produção mais limpa em várias empresas brasileiras.

Nas universidades brasileiras, pesquisadores vêm saindo do isolamento de seus departamentos e criando grupos, redes e núcleos de pesquisa, alguns interinstitucionais, como demonstra o Diretório de Grupos de Pesquisa desenvolvido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq a partir de 1992, e que corresponde à base da pirâmide de ciência, tecnologia e inovação brasileira. Trata-se de base de dados censitária e corrente que contém informações sobre os grupos de pesquisa em atividade no País. A fim de mantê-lo atualizado, foram realizados até hoje oito censos, apresentando 6.480 grupos, em 1993 e 27.523 grupos, em 2010. Os resultados desses inventários atualizados estão disponíveis para pesquisa, com dados de área do conhecimento, da instituição de pesquisa e pesquisadores líderes.

Os grupos de pesquisa que integram o DGP/CNPq são formados por universidades, instituições isoladas de ensino superior, institutos de pesquisa científica, institutos tecnológicos e laboratórios de pesquisa e desenvolvimento de empresas estatais ou ex-estatais.

Em busca simplificada por palavras-chave neste Diretório, em 2013, foi possível identificar 291 grupos de pesquisa que atuam em temas de clima; 262 grupos em adaptação; 219 grupos no tema vulnerabilidade e 193 grupos em mudanças climáticas.

Pesquisa concluída em 2011, em grupos de pesquisa que atuavam na área ambiental concluiu que, dos 1691 grupos participantes da amostra da pesquisa, 137 grupos possuíam conformação de rede de pesquisa, caracterizada pelos grupos que atendiam critérios de conformação institucional diversificada, trabalho integrado e atuação na área ambiental (Coutinho, 2011).

O 1º Simpósio Brasileiro de Mudanças Ambientais Globais, realizado em 2007, no Rio de Janeiro, foi promovido pela Academia Brasileira de Ciências (ABC), pelo Programa Internacional da Geosfera-Biosfera (IGBP) e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), e teve por objetivo trazer o estado da arte de pesquisas científicas sobre mudanças globais a representantes do setor acadêmico, governamental e empresarial. Este Simpósio propiciou a criação da Rede Brasileira de Pesquisa sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede CLIMA), o edital do CNPq para a implementação dos Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCTs) e as chamadas para as propostas do programa FAPESP de Pesquisa sobre Mudanças Climáticas Globais (PFPMCG) entre 2007 e 2008 (CONCLIMA, 2013)

Neste sentido, por iniciativa do governo federal, através de Portaria do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), foi criada, em 2007, a Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais - Rede Clima, composta por integrantes de diversas áreas, como governo e academia, com o objetivo de produzir e disseminar conhecimentos e tecnologias nesse tema, além de contribuir para a formulação e acompanhamento de políticas públicas no âmbito do território brasileiro. A Rede Clima, constituída por 13 sub-redes temáticas, tem o propósito de apoiar, através de suas pesquisas, juntamente com outros institutos e centros universitários, o Painel Brasileiro sobre Mudanças do Clima, instituído em 2009.

Compete às agências de fomento brasileiras a tarefa de ditar as regras para o desenvolvimento da pesquisa em todo o país. Auxiliadas por professores e pesquisadores, os editais de fomento vêm sendo construídos nos últimos anos de forma a impulsionar a comunidade acadêmica a se organizar de forma coletiva, seja em institutos de pesquisa, núcleos, redes ou grupos de pesquisa (Figura B2.3).

Para corroborar esta afirmação, basta consultar os editais das diversas agências de fomento brasileiras para verificar que, em grande parte destes, atualmente é estimulada a pesquisa em rede que traga retornos para o setor privado e setor público, por meio de impacto em políticas públicas, tais como os Centros de Pesquisa, Inovação e Difusão - CEPIDs e os Programas de Pesquisas em Políticas Públicas - PPPPs, da Fapesp; os Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia - INCTs e os Programas de Apoio a Núcleos de Excelência - Pronex, do CNPq.

O INCT para Mudanças Climáticas, sediado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em São José dos Campos, SP, está diretamente associado à Rede CLIMA, ao Programa FAPESP de Pesquisas em Mudanças Climáticas, bem como parceria com o LBA (Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera da Amazônia), o GEOMA (Rede

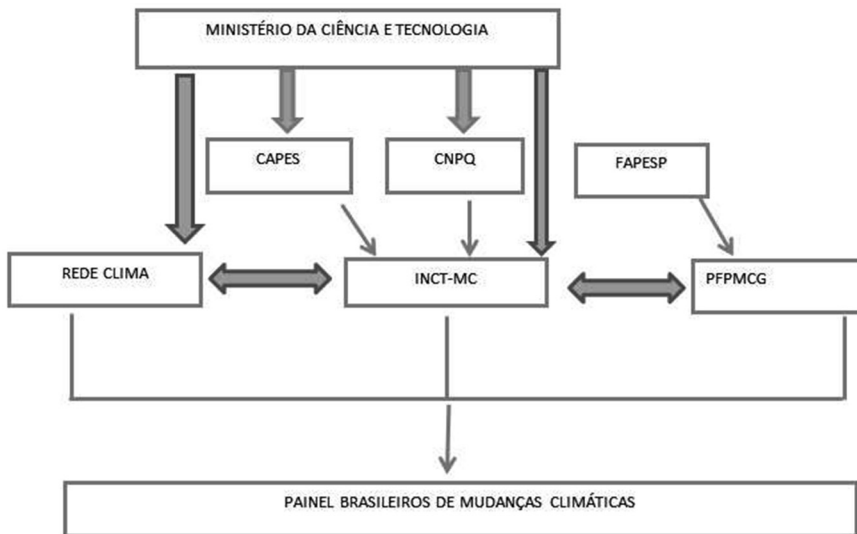


Figura B2.3: Redes em Mudanças Climáticas

Fonte: Elaboração autores

Temática de Pesquisa em Modelagem Ambiental da Amazônia) e o PBMC (Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas). Envolve cooperação de 65 grupos de pesquisa nacionais de todas as regiões e 17 grupos de pesquisa internacionais, integrando na sua totalidade mais de 400 pesquisadores, estudantes e técnicos, constituindo-se a maior rede de pesquisas ambientais já desenvolvida no Brasil.

O PFFPMCG é um programa interdisciplinar e atua em parceria com o Ministério da Ciência e Tecnologia com objetivo de avançar no conhecimento e auxiliar na tomada de decisões sobre avaliações de risco, estratégias de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

O PROANTAR - Programa Antártico Brasileiro criado em 1982, é financiado pelo CNPq e possui, entre seus escopos, o objetivo de investigar os reflexos das alterações ambientais globais percebidas na Antártica, com intuito de aprofundar conhecimento sobre o papel da Antártica como um dos controladores do clima terrestre e, em especial, do clima da América do Sul. Além do estudo da variabilidade climática, essa rede monitora parâmetros físicos e biológicos e tenta identificar as causas para a rápida alteração ambiental, que tem sido verificada na região nos últimos 20 anos. Essa rede é formada por cientistas de 16 instituições brasileiras, que também realizam projetos conjuntos com grupos de pesquisa de outras nações.

Também devem ser destacados os Núcleos de Apoio à Pesquisa – NAPs, apoiados por Programa da Reitoria da Universidade de São Paulo de Incentivo à Pesquisa. Até 2013 foram contabilizados 65 núcleos,

que visam aumento do impacto da produção científica, revertendo tendência à fragmentação de grupos de pesquisa. Com eles, pretende-se a reorganização da produção científica da universidade fora da lógica exclusivamente disciplinar, com ênfase em temas atuais relevantes, que possibilitem associação de pesquisadores de diversas formações, bem como a multiplicidade de produtos gerados.

O subgrupo “Saúde - Vulnerabilidade e Adaptação no Contexto da Saúde Ambiental” constitui um dos subprojetos do Núcleo de Apoio à Pesquisa em Mudanças Climáticas, agregando diversos pesquisadores e estudantes em níveis de mestrado e doutorado.

Diante do cenário previsto para áreas urbanas, indicado no início deste capítulo, as diversas pesquisas deste grupo têm por foco a qualidade de vida da população no contexto urbano sob o cenário das mudanças climáticas e os impactos sobre as cidades (Figura B2.4).

Neste sentido, indaga-se de que maneira entender e aprimorar medidas de adaptação frente às múltiplas vulnerabilidades? Que conjunto de indicadores de saúde ambiental seriam capazes de caracterizar a vulnerabilidade humana frente estas mudanças? Quais as relações entre políticas ambientais e econômicas adotadas pelo poder público para mudanças climáticas e quais as implicações para o meio ambiente e para a saúde humana em virtude da implementação destas políticas, levando em conta a complexidade político administrativa das metrópoles? Como construir autonomia e mecanismos para adaptação às mudanças climáticas em relação aos eventos de cheias?

Questionam-se também quais princípios e modelo de governança serão necessários para atingir os objetivos da Política Municipal de Mudanças Climáticas de São Paulo? E qual a contribuição da oferta de áreas verdes na ampliação da capacidade adaptativa às mudanças climáticas em áreas urbanas, especificamente no Município de São Paulo? A estas indagações, soma-se estudo no semiárido brasileiro visando avaliar o papel que as intervenções do PBF (Programa Bolsa Família) e do PSF (Programa Saúde da Família) teriam sobre os indicadores sociais existentes e sobre a percepção de qualidade de vida e de ambiente das famílias de agricultores de sequeiro.

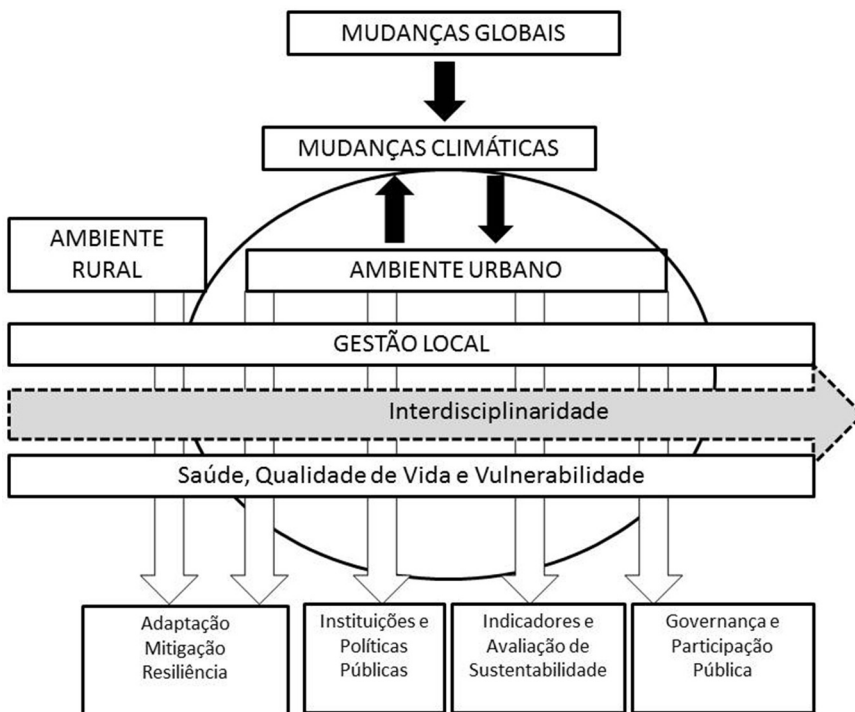


Figura B2.4: Interfaces das Pesquisas do Subgrupo “Saúde - Vulnerabilidade e Adaptação no Contexto da Saúde Ambiental
 Fonte: Elaboração autores

Pesquisa sobre a interdisciplinaridade aparece como ferramenta transversal que perpassa, tanto as pesquisas do subgrupo em questão, quanto as pesquisas dos demais subgrupos do NapMC. Nesse contexto ela assume papel de intermediar os múltiplos saberes do grupo, possibilitando a produção científica conjunta. Este papel da interdisciplinaridade está presente em Pacheco, Tosta e Freire (2010) e claramente destacado em Furtado (2007):

Do nosso ponto de vista, a interdisciplinaridade assume grande importância na medida em que identifica e nomeia uma mediação possível entre saberes e competências e garante a convivência criativa com as diferenças. Além da função de mediador, o conceito de interdisciplinaridade vem apontar a insuficiência dos diversos campos disciplinares, abrindo caminhos e legitimando o tráfego de sujeitos concretos e de conceitos e métodos entre as diferentes áreas do conhecimento. Assim sendo, a interdisciplinaridade representa uma ferramenta fundamental na grande oficina de produção que se constitui a ciência, não devendo ser tomada como um fim

em si mesmo ou uma nova ciência a ser constituída. Ferramenta conceitual, cuja função como tal só se realizará a medida que sua inserção epistemológica criar pontes com as práticas concretas, (...) (p.244/245)

CONCLUSÕES

Observa-se grande desafio para a gestão das cidades diante de um cenário previsto em que estas são e serão protagonistas nas emissões de gases de efeito estufa e vítimas dos impactos oriundos de alterações climáticas, que serão sentidos especialmente através de eventos de extremos, cujos efeitos na saúde têm sido bem delineados.

As aglomerações urbanas terão dificuldade no enfrentamento dos cenários climáticos por vários motivos: pela escassez ou excesso de água e/ou qualidade de água potável; pelo excesso e frequência ou mesmo ausência de chuvas, com cidades despreparadas para atender as emergências que vêm acontecendo e virão a acontecer.

Além disso, resultados de pesquisas demonstram panorama, cuja tendência é de piora do quadro atual pela falta de alternativas dadas às populações desprovidas de recursos que ao chegarem às cidades costumam buscar moradia em locais de baixo custo, geralmente localizadas em franjas urbanas, distantes, em áreas não regularizadas, com declividades e condições geológicas instáveis, às margens de rios, áreas de proteção, ou seja, em áreas inadequadas ao uso e ocupação. Essas condições são agravadas com baixos índices de saneamento.

Além da falta de possibilidade de escolha de um local adequado para construção da moradia, a construção, normalmente, é de uma habitação precária e não preparada para suportar as condições extremas e adversas dos fenômenos climáticos previstos pelos cenários do IPCC. A precariedade destas habitações as torna extremamente vulneráveis a fenômenos extremos como inundações, frio, calor, ciclones, tornados, entre outros.

Cada vez torna-se mais evidente demanda fundamental do uso da interdisciplinaridade diante do aumento da complexidade que envolve questões relacionadas com áreas urbanas, ambiente e saúde. São grandes os desafios a serem enfrentados na busca de integração de conceitos, metodologias e práticas.

Neste sentido, as redes acadêmicas de pesquisa surgem como espaço para atuação interdisciplinar, conjugação de esforços, redução de tempo, economia de recursos e maior impacto dos resultados das pesquisas sobre os tomadores de decisões.

Sabe-se que o mundo moderno oferece inúmeras vantagens em relação às antigas sociedades tradicionais, tais como conforto, acesso à saúde, trabalho e educação. Maior segurança alimentar e longevidade, menor vulnerabilidade ao ambiente e mortalidade infantil. Fatores presentes nas grandes cidades, embora nem sempre disponíveis para todos. Não se trata, portanto, de voltar-se a viver em sociedades tradicionais, baseadas na caça e na pesca, mas significa que se podem aprender algumas lições com as sociedades do passado (recente).

Populações rurais de áreas distantes ainda conservam muitos aspectos das sociedades tradicionais. Não obstante, há grandes diferenças entre estas sociedades e as denominadas *WEIRD societies* - *Western, educated, industrial, rich and democratic*.

Destarte aspectos que muito provavelmente não podem mais ser objeto de modificação nos grandes centros urbanos, existem algumas lições que podem ser aprendidas. Os hábitos de consumo exagerado de sal e açúcar, bem como o stress vivido nas modernas sociedades, por exemplo, são fatores que inexistiam nas sociedades tradicionais e, portanto, não foram detectadas questões de saúde relacionadas com obesidade, diabetes ou hipertensão entre seus habitantes.

A nova cena apresentada no aeroporto de Papua Nova Guiné, de habitantes com perfil ocidentalizado, demonstrado através do vestuário e da obesidade, leva-nos a sensação de que nosso exemplo nesse sentido demonstra-se incisivo e prejudicial. Gastam-se alguns milhares de anos para se conhecer as ferramentas para caça e pesca, mas frações de anos são capazes de tornar estas sociedades réplicas fieis do modelo ocidental de consumo, infelizmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, A. T. de; SOMMERMAN, A.; ALVAREZ, A. M. de S. *Congressos internacionais sobre transdisciplinaridade: reflexões sobre emergências e convergências de ideias e ideais na direção de uma nova ciência moderna. Saúde sociedade*. vol.14, n.3, pp. 9-29, 2005.

BARBIERI, J.C. *Desenvolvimento e meio ambiente: as estratégias de mudanças da agenda 21*. Petrópolis (RJ):Vozes, 1997.

BARCELLOS, C. *et al. Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil*. Epidemiol. Serv. Saúde [online], vol. 18, n. 3, pp. 285-304, 2009. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/Miguel/Observatorio_Clima_e_Saude/Xris_Miguel_Epi&SerSaude_Republicacao_TextoOficinaEPISUS_2009.pdf [Acessado em 17/06/2015]

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE *et al.* *Mudanças climáticas e ambientais e seus efeitos na saúde: cenários e incertezas para o Brasil*. Brasília: Organização Pan-Americana da Saúde/Organização Mundial da Saúde, 40p: il, 2008.

CAMPBELL-LENDRUM, D; CORVALÁN, C. Climate Change and Developing-Country Cities: Implications For Environmental Health and Equity. *Journal of Urban Health: Bulletin of the New York Academy of Medicine*, Vol. 84, No. 1, 2007.

CARMO, R.L. *Urbanização, metropolização e recursos hídricos no Brasil*. In: DOWBOR, L.; TAGNIN, R.A. (orgs.). *Administrando a água como se fosse importante. Gestão ambiental e sustentabilidade*. São Paulo: Senac, 2005, p.111-120.

CASTELLS M. *A sociedade em rede. A era da informação: economia, sociedade e cultura*. 3ª ed. São Paulo: Paz e Terra, 2000.

CHURKINA, G. *Modeling the carbon cycle of urban systems*. *Ecological Modelling*. vol. 216, Issue 2, pp 107–113, 2008.

COIMBRA, J.A.A. *O outro lado do meio ambiente*. Campinas, SP: SENAC; 2002.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO [CMMAD]. *Nosso futuro comum*. Rio de Janeiro: Editora Faculdade Getúlio Vargas; 1988

CONFALONIERI, U. *et al.* *Mudanças globais e desenvolvimento: importância para a saúde. Informe Epidemiológico do SUS*, v. 11, n.3, p. 139-154, 2002.

CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. [CNUMAD]. *Agenda 21*. Brasília: Senado Federal, Subsecretaria de edições técnicas; 1997

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR [CAPES]. *Diretoria de Avaliação*. Documento de área Interdisciplinar (CAInter) 2009. Disponível em http://www.ppgneim.ffch.ufba.br/_ARQ/INTER03ago10.pdf Acessado em 14.04.2014

COUTINHO, S. M. V. *Redes acadêmicas para pesquisa e capacitação em meio ambiente e desenvolvimento sustentável*. 2011. 289. Tese (Doutorado em Ciência) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6134/tde-29112011-162408/>. Acessado 14.04.2014

DIAMOND, J. *The World Until Yesterday: What Can We Learn from Traditional Societies?* Nova Iorque: Penguin Group, 2012.

FURTADO, J.P. *Equipes de referência: arranjo institucional para potencializar a colaboração entre disciplinas e profissões*. Interface (Botucatu) [online]. 2007, vol.11, n.22 [cited 2013-08-12], pp. 239-255.

GRIMM, N. B. *et al.* *Global Change and the Ecology of Cities*. Science, 2008, v. 319, p. 756-760.

GRIMMOND, S. *Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming*. The Geographical Journal. Vol; 173, 1, pp 83–88, Março 2007

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA [IBGE]. *Projeção da População do Brasil por Sexo e Idade – 1980 – 2050*. Revisão 2008. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/projecao_da_populacao/2008/projecao.pdf Acessado em 14.04.2014.

JACOBI, Pedro Roberto. *Ampliação da cidadania e participação: desafios na democratização da relação poder público-sociedade civil no Brasil*, 1996. (Tese de Livre Docência). Faculdade de Educação. Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 1996. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/48/tde-25102005-105004/en.php> . Acessado em 14.04.2014.

KASPERSON R.E.; KASPERSON, J.X. *Climate Change, vulnerability, and Social Justice*. Stockholm Environmental Institute, 2001.

KLEIN, J.T. *Interdisciplinarity: history, theory and practice*. Detroit: Wayne University Press, 1990.

KOVATS S; WOLF T; MENNE B. *Heatwave of August 2003 in Europe: provisional estimates of the impact on mortality*. Eurosurveillance Weekly. Vol.8, n.11, p. 2004. Disponível em <http://www.eurosurveillance.org/ViewArticle.aspx?ArticleId=552> Acessado em 14.04.2014

LEFF, E. *Saber Ambiental. Sustentabilidade, Racionalidade, Complexidade, Poder*. Tradução Lúcia Mathilde Endich Orth; Petrópolis, RJ: Vozes, 2001

MARTINS , M.C. *et al.* Influence of socioeconomic conditions on air pollution adverse health effects in elderly people: an analysis of six regions in São Paulo, Brazil. *Journal of Epidemiology and Community Health*, v. 58, n. 1, p. 41-46, 2004.

MCMICHAEL, A. J. *et al.* Global Climate Change. In: EZZATI, M. *Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease due to Selected Major Risk Factors*. Geneva: World Health Organization, 2004. v. 2, p. 1543-1650.

MCMICHAEL, A.J. From hazard to habitat: rethinking environment and health. *Epidemiology*, v. 10, n. 4, p. 460-464, 1999.

MCMICHAEL, A.J.; WOODRUFF, R.E.; HALES, S. *Climate change and human health: present and future risks*. Lancet, 367: 859–69; 2006.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and Human well-being: synthesis*. Washington DC: Island Press; 2005. Disponível em <<http://www.millenniumassessment.org/en/products.aspx>> Acessado em 14.04.2014

MORIN, E. *Ciência com consciência*. Tradução de M. D. ALEXANDRE e M. A. S. DÓRIA. Rio de Janeiro: Bertrand, 2010.

NICOLESCU, B. *The relationship between complex thinking and transdisciplinarity*. In: Symposium on Complex Systems Modeling and Complexity Thinking, Fondation Maison des Sciences de l'Homme, Maison Suger, Paris, junho, 2009

O'MEARA, M. *Reinventing Cities for People and the Planet*, vol. 147. Washington: Worldwatch, 1999.

PACHECO, R.C.S; TOSTA, K.C.B.T.; FREIRE, P.S. *Interdisciplinaridade vista como um processo de construção do conhecimento: uma análise do Programa de Pós-Graduação EGC/UFSC*. RBPG, Brasília, v. 7, n. 12, p. 136 - 159, julho de 2010.

PENA-VEGA, A. *O despertar ecológico. Edgar Morin e a ecologia complexa*. Rio de Janeiro: Garamond, 2005.

PHILIPPI JR. A. A Interdisciplinaridade como atributo da C & T. In: PHILIPPI JR. A.; TUCCI, C.E.M.; HOGAN, D.J.; NAVEGANTES, R. (Eds.) *Interdisciplinaridade em Ciências Ambientais*. São Paulo: Signus Editora, 2000.

POTERE, D.; SCHNEIDER, A. A critical look at representations of urban areas in global maps. *Geojournal*. vol. 69, 55–80, 2007.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO [PNUD]. *Relatório do Desenvolvimento Humano*. 2002. *Aprofundar a democracia num mundo fragmentado*. 2002.

ROCHA, P.E.D. *Interdisciplinaridade e meio ambiente em cursos de pós-graduação no Brasil*. 2001, 432 p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento, Agricultura e Sociedade) - Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

STONE, D. *Capturing the Political Imagination: Think Tanks and the Policy Process*, London: Frank Cass & Co, 1996.

SVIREJEVA-HOPKINS A.; SCHELLNHUBER H. J.; POMAZ V. L. Urbanised territories as a specific component of the global carbon cycle. *Ecological Modelling* 173 295–312, 2004.

UNITED NATIONS. *World Charter for Nature*. 1982. Disponível em <http://www.un.org/documents/ga/res/37/a37r007.htm>> Acessado em 14.04.2014

WORLD HEALTH ORGANIZATION e WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. [WHO/WMO] - *Atlas of Health and Climate*. Geneva, Switzerland, 2012.

WORLD RESOURCES INSTITUTE *et al.* *World Resources 2002/2004. Decisions for the Earth: Balance, voice, and power*, julho 2003. Disponível em < <http://www.wri.org/publication/world-resources-2002-2004>. Acessado em 14.04.2014

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

B3. ANÁLISE DOS EFEITOS DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA POPULAÇÃO GERIÁTRICA DA CIDADE DE SÃO PAULO

FÁBIO LUIZ TEIXEIRA GONÇALVES¹, WILSON JACOB FILHO², MARCIA PEINADO ALUCCI³, DENISE HELENA SILVA DUARTE³, LEONARDO MARQUES MONTEIRO³, BEATRIZ MARIA TREZZA², ARLINDO TRIBESS⁴, TERCIO AMBRIZZI¹, RAFAEL JONAS RIGHI BATISTA¹, CAROLINA ABRAHÃO ALVES³

Este é um estudo multidisciplinar que visa avaliar o impacto na população geriátrica, i. e., em adultos acima de 65 anos, de variáveis meteorológicas associadas ao conforto térmico humano, à climatologia atual e às mudanças climáticas na região metropolitana da cidade de São Paulo (RSMP), iniciado em 2011. Esta temática está no âmbito de estudos biometeorológicos, na subdivisão humana, baseada na ISB (*International Society of Biometeorology*). A poluição atmosférica será considerada de forma indireta, onde os poluentes atmosféricos serão avaliados comparando os resultados dos testes durante a estação seca (com alta concentração de poluentes) e úmida (com baixa concentração). De acordo com a referida sociedade, os efeitos ambientais são considerados meteorotrópicos, onde uma ou mais variáveis ambientais afetam um ou mais indivíduos de uma população. O foco do estudo está sendo, portanto, avaliar o desempenho cognitivo e físico da população geriátrica de um grupo pré-selecionado de idosos considerados aptos (saudáveis). Este desempenho é afetado por condições ambientais, das quais o conforto térmico humano (onde as variáveis meteorológicas atuam em conjunto) e a poluição do ar são os fatores meteorotrópicos. Conseqüentemente, um dos objetivos do estudo é estabelecer um índice de conforto térmico humano para as populações geriátricas. Premissas arquitetônicas (de desempenho térmico e ergonomia) serão igualmente desenvolvidas. Neste sentido, uma câmara climatizada está sendo usada para simular os extremos do clima de São Paulo, no que tange às mudanças climáticas. Ambientes externos e internos (à câmara)

1. Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, IAG/USP.

2. Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, FMUSP.

3. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, FAU/USP.

4. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, POLI - USP.

estão sendo utilizados para avaliar os impactos de poluição, exercícios físicos e condições meteorológicas na população selecionada. Finalmente, indicadores de mudanças climáticas estão baseados em modelos globais GCMs (*Global Climate Models*), que possibilitam o prognóstico de índices de conforto térmico e posterior avaliação, do desempenho cognitivo, físico e dos protocolos arquitetônicos com base nas projeções climáticas. O resumo dos objetivos vem a seguir:

1. Projetar a climatologia da região metropolitana de São Paulo para verificar situações de extremos de variáveis meteorológicas em questão (temperatura, umidade relativa, vento e radiação solar);
2. Definir o que pode-se considerar um idoso apto (saudável); e investigar as condições das habitações e localização do grupo em questão. Este item subdivide-se em: Avaliar o impacto da variação da temperatura (ou estresse térmico) sobre a funcionalidade de indivíduos idosos, particularmente seu efeito na função cognitiva, equilíbrio e força muscular. Aferir parâmetros utilizados como medida de estresse (cortisol, catecolaminas e indiretamente a variabilidade da frequência cardíaca) e correlacioná-los com a variação da temperatura;
3. Propor um índice de conforto térmico humano a ser desenvolvido durante este estudo para idosos aptos com os dados climáticos atuais (testes de desempenho mais questionário de conforto térmico) aplicados em câmara climatizada (ambiente interno);
4. Propor critérios de desempenho térmico para estudo arquitetônico habitacional, compatível com os itens 2 e 3;
5. Avaliar o comportamento dos objetivos 1, 3 e 4 utilizando-se de dados de cenários futuros produzidos pelos GCMs que projetam climas futuros considerando os prognósticos de emissões de gases de efeito estufa do IPCC (Painel Inter-governamental de Mudanças Climáticas);
6. Efetuar testes com os indivíduos idosos em dias mais poluídos (mais presentes no inverno) e menos poluídos (mais presentes no verão).

A justificativa deste estudo se deve à importância que as alterações ambientais possuem em uma população mais sensível, como a geriátrica. A principal alteração ambiental com que o homem se depara no começo do século XXI se refere às mudanças climáticas. Hoje não existem mais dúvidas de que ela vem ocorrendo, podendo alterar drasticamente o clima da Terra, mesmo em localidades próximas aos trópicos, como na RMSP, local deste estudo. De fato, medições de estação meteorológica tem registrado um aumento gradual na temperatura média da RMSP nas últimas décadas, ocasionado

em partes pelo fenômeno de ilha de calor urbana, que também pode contribuir para uma alteração no padrão de garoas para chuvas pesadas. Segundo pesquisas mais recentes, o inverno pode passar a ser ainda mais seco no futuro, o que tende a agravar problemas relacionados à poluição atmosférica.

Grandes centros urbanos como a RMSP funcionam como um amplificador destas mudanças, por gerarem ambientes ainda mais hostis. A ilha de calor urbana serve como exemplo. Este fenômeno atinge principalmente noites de inverno na RMSP, fazendo com que a temperatura possa ser até 10°C mais quente que seus arredores (Lombardo, 1988), o que pode ser bastante prejudicial em casos de dias quentes e secos neste período do ano. No entanto, com a mudança climática, noites quentes de verão podem também se tornar ainda mais quentes e abafadas, gerando uma sobrecarga em sistemas biológicos, particularmente, em idosos.

Outro fator vinculado aos centros urbanos é a poluição atmosférica. Estudos têm mostrado (Gonçalves *et al.*, 2007) que mesmo baixas concentrações de PM10 e SO₂, combinadas com fatores meteorológicos, geram morbidade em diferentes tipos de doenças. Demais fatores, como poluição sonora e má qualidade de alimentos e água utilizadas pelas populações carentes podem agravar ainda mais o problema.

O impacto direto na saúde do idoso pode ser avaliado sob a ótica de que estes são mais suscetíveis às sobrecargas que o clima/tempo impõe por motivos fisiológicos e comportamentais, os quais regulam a temperatura corporal. Este balanço térmico entre o ambiente e o corpo humano serve de base para os cálculos de índices de conforto para a população em geral. No entanto, indivíduos com 60 anos ou mais apresentam declínio na capacidade termorregulatória, mesmo quando saudáveis. A sudorese em resposta ao aquecimento passivo que costuma ocorrer em temperaturas mais altas é diminuída, bem como a resposta vascular ao aquecimento e resfriamento e o tremor como forma de produzir calor. Nos idosos, os impulsos termorregulatórios dos nervos simpáticos para a pele estão reduzidos em aproximadamente 60% e o metabolismo basal é menor, ocasionando má termorregulação (Auerbach, 2007). Por estas circunstâncias, acredita-se que mudanças climáticas possam afetar primeiramente a saúde da população geriátrica.

Os efeitos da poluição do ar, por sua vez, sobre a morbidade e mortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias têm sido observados no mundo todo, incluindo regiões onde os níveis de poluição estão dentro dos padrões adotados como seguros. Vários estudos nas últimas décadas têm mostrado que idosos e crianças sofrem, preferencialmente, os efeitos danosos da poluição (Gonçalves *et al.*, 2005 e 2007). Os principais poluentes que mais afetam a saúde humana são, segundo a EPA (Environmental Protection

Agency): o ozônio (O₃), dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂), material particulado inalável e fino (diâmetros < 10µm e < 2,5µm) e monóxido de carbono (CO).

Já a influência do calor nas pessoas idosas é demonstrada pelos inúmeros estudos que apontam o aumento da mortalidade durante fenômenos conhecidos como “ondas de calor”. Há indícios de que as mortes ocorrem principalmente entre idosos que possuem doenças cardiovasculares e pulmonares (Basu; Samet 2002).

Como já citado, diversas afecções podem manifestar-se no idoso como alterações funcionais. Este raciocínio fundamenta a hipótese de que o estresse térmico ambiental interfere na funcionalidade de indivíduos idosos. Foram escolhidas as áreas da cognição e equilíbrio pelos seguintes motivos: 1- por estarem envolvidas em praticamente todas as atividades do dia a dia de uma pessoa com vida independente, podendo as alterações nestas áreas ter impacto direto na qualidade de vida; 2- porque pequenas mudanças na cognição e no equilíbrio podem ser mensuráveis objetivamente através de testes. Por último, cabe salientar que o envelhecimento normal, ou a senescência, determina alterações na função cognitiva e no equilíbrio, levando a perda de reserva funcional e maior susceptibilidade às agressões, de modo que um estímulo pouco danoso para um jovem pode acarretar prejuízos significativos a indivíduos idosos.

METODOLOGIA

A metodologia deste estudo é composta pelos seguintes tópicos: 1- Caracterização da RMSP e sua climatologia atual referente ao conforto térmico humano e a influência dos poluentes; 2- Definição do público alvo: a população geriátrica; 3- Uso da câmara climática e do termovisor; 4- Consideração das mudanças climáticas.

1. A CARACTERIZAÇÃO DA RMSP E A CLIMATOLOGIA ATUAL REFERENTE AO CONFORTO TÉRMICO HUMANO:

A RMSP se encontra em uma bacia sedimentar, compartimento rebaixado do Planalto Atlântico, possuindo extensão de 8.000 km², cortado pelo trópico de capricórnio, cercada por colinas que variam de 650 a 1.200 metros de altura, com altitude aproximada de 860 metros acima no nível do mar. Localiza-se geograficamente a 23°32'52" de latitude sul e 46°38'07" de longitude oeste (Instituto Geográfico e Cartográfico – IGC). Todas essas complexidades topográficas, associadas à proximidade do oceano e à intensa urbanização da área, influenciam o padrão da circulação atmosférica. Além disso, no município de São Paulo encontra-se um dos maiores conglomerados

humanos do mundo, com uma população de 10.434.252 milhões de pessoas, segundo o censo realizado no ano 2.000 (www.ibge.gov.br). Considerando a RMSP, essa população sobe para cerca de 19 milhões de habitantes. Esta região possui um grande parque industrial, com uma enorme frota de veículos. O clima de São Paulo é considerado subtropical, ou do tipo *Cwa*, de acordo com a classificação de *Köppen*, atualizada em Peel, Finlayson e McMahon (2007), com temperatura média anual de 19,3°C, apresentando invernos suaves e verões com temperaturas moderadamente altas.

1.1 OS POLUENTES ATMOSFÉRICOS DA RMSP

Neste trabalho serão analisadas (reduzidos a um valor diário) as concentrações médias horárias dos gases SO₂, NO₂, O₃, CO, bem como do material particulado inalável e fino PM10 (diâmetro aerodinâmico menor que 10 µm) e PM2.5 (diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 µm), coletadas pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), nas estações de qualidade do ar espalhadas pela RMSP, mais próximas do local de estudo. Serão verificadas as concentrações destes poluentes nos três dias que antecedem os testes de desempenho (Gonçalves *et al.*, 2007). Coletores individuais em cascata de 0,1 até 0,5 µm também estão sendo usados para coleta de material particulado.

1.2 O CONFORTO TÉRMICO HUMANO

Para se avaliar a situação térmica ambiental conseqüente das atuais configurações climáticas, ou de configurações climáticas futuras, utilizam-se índices de conforto térmico. Um índice é um padrão indicador que estabelece relação entre valores de qualquer medida ou de gradação. No caso dos índices de conforto térmico, fornece-se relação entre duas, ou comumente mais, variáveis entre as descritas a seguir: variáveis ambientais (temperatura, umidade e velocidade do ar e radiação atmosférica), variáveis individuais (vestimentas e atividade física) e variáveis subjetivas (percepção ou preferência de sensações térmicas).

Existem diversos trabalhos recentes focados em índices de conforto térmico. Em específico, estão sendo considerados um desenvolvido especificamente para ambientes internos, seguindo padrões normativos internacionais (ASHRAE 55, 2004); e outro para ambientes externos, desenvolvido especificamente para a região metropolitana de São Paulo (Monteiro, 2008), com base em modelo adaptativo e em temperatura equivalente. Ambos serão utilizados como referência neste estudo e devidamente apresentados em tópico posterior, acerca da proposição de índice de conforto térmico para população geriátrica.

2. A POPULAÇÃO GERIÁTRICA

Primeiramente as hipóteses a serem testadas são: mudanças na temperatura ambiente podem afetar a cognição e o equilíbrio de indivíduos idosos e essas alterações podem ser detectadas tanto por meio de testes de função cognitiva quanto de equilíbrio; mudanças na temperatura ambiente podem afetar a força muscular voluntária de indivíduos idosos e essa alteração pode ser detectada por meio de um dinamômetro manual (*handgrip*); o estresse causado pela variação da temperatura ambiente pode ser demonstrado objetivamente pela medida dos níveis séricos de cortisol e catecolaminas e indiretamente pela variabilidade da frequência cardíaca e; as mudanças na função cognitiva e/ou no equilíbrio podem correlacionar-se com as medidas de estresse.

3. OS ESTUDOS COM A CÂMARA CLIMATIZADA E O TERMOVISOR

Os estudos serão realizados na câmara climatizada do Laboratório de Conforto Térmico do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP (EPUSP), cuja planta baixa é apresentada na Figura B3.1.

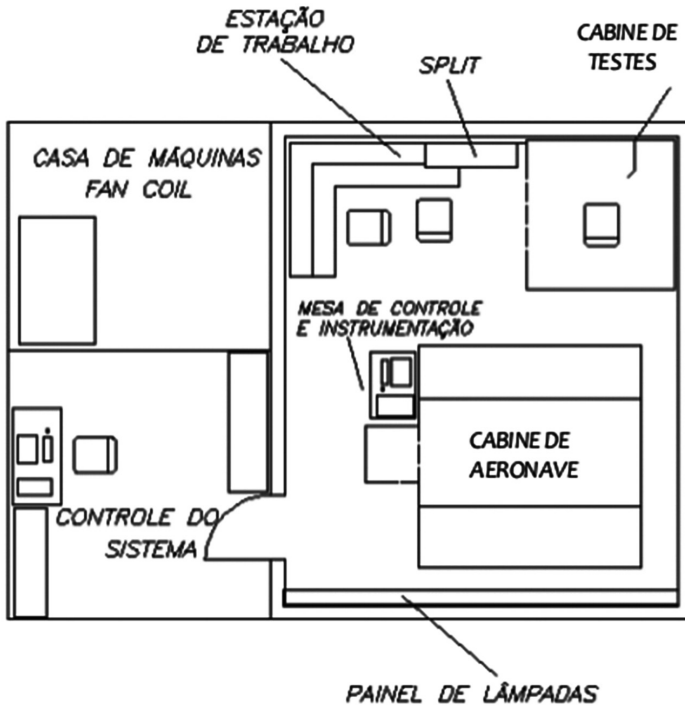


Figura B3.1: Planta baixa do Laboratório de Conforto Térmico da EPUSP

O laboratório, mostrado esquematicamente na Figura B3.1, é constituído pelos seguintes componentes básicos: Câmara de testes, com possibilidade de distribuição de ar pelo piso e pelo teto; Unidade de condicionamento do ar; Sistema de automação e controle; Sistema de aquisição de dados no ambiente.

Inicialmente, o Laboratório foi concebido para a realização de atividades de avaliação de conforto térmico em ambientes de escritório com insuflamento de ar frio pelo piso. Mais recentemente, foram realizadas adaptações no laboratório e no sistema de distribuição de ar (Moura, 2009), que possibilitam realização também de avaliação de conforto térmico em aeronaves, resultando na configuração atual da câmara de testes apresentada na Figura B3.1.

3.1 CARACTERÍSTICAS DA CÂMARA CLIMATIZADA

A câmara climatizada possui área total de 34,8 m², cujas paredes, piso e teto são isoladas termicamente do ambiente externo por meio da utilização de poliuretano revestido com chapas de material melamínico. O isolamento térmico da câmara de testes, juntamente com o sistema de condicionamento de ar, permite que um mesmo ensaio possa ser repetido inúmeras vezes e em qualquer época do ano, o que é de fundamental importância em relação aos ensaios que se pretende realizar no presente trabalho. Conforme apresentado na Figura B3.1, além da estação de trabalho para duas pessoas, a câmara de testes possui também uma sala de apoio, onde serão realizados os testes de equilíbrio em uma plataforma de força.

3.2 O SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR

O sistema de condicionamento de ar foi projetado para operar em condições que propiciem conforto térmico no verão, insuflando ar frio no ambiente (pelo piso ou pelo teto). Assim, na concepção atual do sistema de climatização é possível atingir-se temperaturas ambientes de 12 a 36°C, com umidade relativa em torno de 50%. Contudo, no presente trabalho pretende-se analisar efeitos na população geriátrica de condições fora da zona de conforto, considerando temperaturas ambientes de 16°C no inverno e de 32°C no verão.

3.3 O AMBIENTE DA CÂMARA CLIMATIZADA

Para a realização de ensaios de conforto térmico há a necessidade de adaptação do ambiente interno da câmara climatizada para simular um ambiente de moradia típica. Para tal há a necessidade de prover mobiliário

adequado e realizar alterações arquitetônicas no espaço para a melhor ambientação. A Figura B3.2 apresenta a plataforma de força.

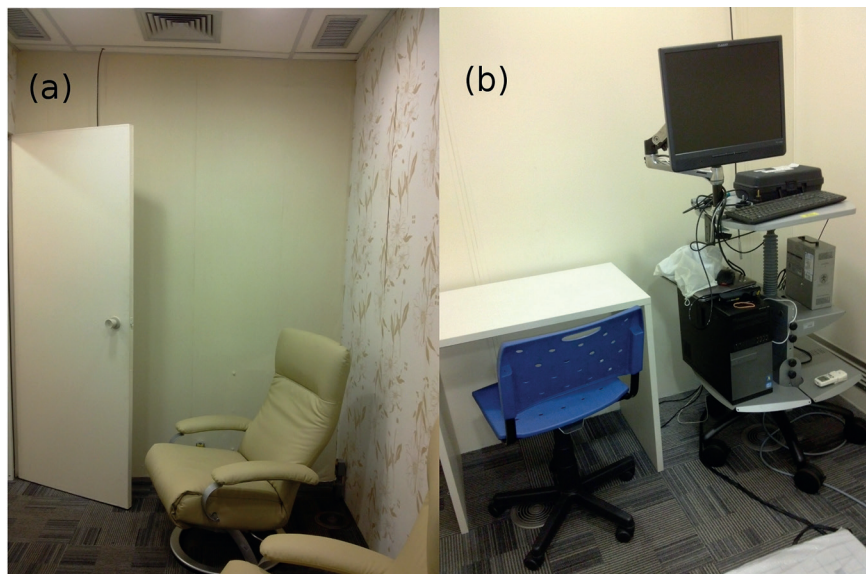


Figura B3.2: (a) Sala de testes com população geriátrica (a ser ambientada como sala de estar de uma casa) e (b) vista parcial da sala de testes (mostrando a plataforma de força) e a sala de apoio com o sistema de análise da plataforma de força.

3.4 O TERMOVISOR

Com o intuito de se observar a temperatura da superfície do corpo em detalhes é utilizado o termovisor da marca FLIR, que permite avaliar o balanço de radiação de cada indivíduo, antes e depois dos testes na câmara climática. Os idosos possuem uma termorregulação com menor eficiência o que se refletiria nas observações do termovisor. Um teste do aparelho foi realizado na câmara climática do projeto INAIRA (Instituto Nacional de Análise Integrada do Risco Ambiental), onde aferiu-se a temperatura do idoso antes e depois do teste de calor a 32°C. A Figura B3.3 ilustra o aquecimento sofrido por um idoso ao ser exposto à câmara com temperatura de 32°C, evidenciando uma elevação aproximada de 2°C na pele.

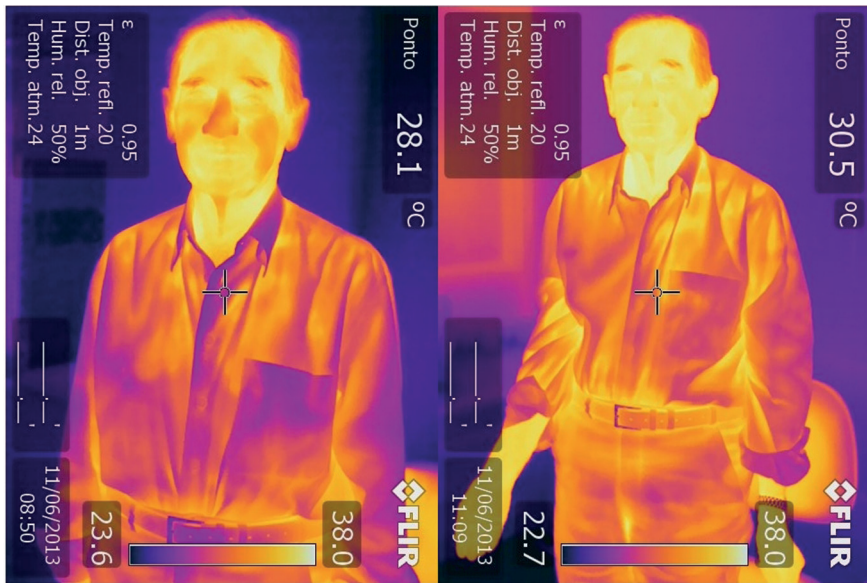


Figura B3.3: Imagens do termovisor de um voluntário antes (temperatura superficial média de 28,1°C) e depois do teste com calor (temperatura superficial média de 30,5°C).

4. MUDANÇAS CLIMÁTICAS: ESTUDOS DE CASOS CONSIDERANDO CENÁRIOS FUTUROS DO CLIMA

Embora a capacidade computacional tenha crescido muito nos últimos anos os GCMs utilizados no relatório do IPCC (IPCC, 2007) possuíam baixa resolução horizontal. É conhecido que com tais resoluções muitos componentes do clima não podem ser adequadamente representados. Muitos esforços foram aplicados nos últimos anos para aumentar a complexidade dos GCMs através de incorporação de parametrizações mais complexas (química, radiação, precipitação, interação solo-atmosfera, etc), mas pouco se melhorou na resolução horizontal. Uma alternativa acessível a um número maior de pesquisadores é a utilização de modelos climáticos regionais (MCRs) com maior resolução espacial do que os GCMs (GIORGI; MEARN, 1999). Neste procedimento os MCRs são integrados com alta resolução horizontal (20 a 80 km) sobre áreas de interesse utilizando como fronteiras laterais as previsões/projeções dos GCMs. Isto reduz tanto a necessidade de grande processamento como de armazenamento. É esperado que esta técnica de regionalização (*downscaling*) não elimine totalmente os erros dos GCMs, mas melhore substancialmente a representação regional do clima.

Muitos estudos utilizaram MCRs aninhados em reanálises para estudar a climatologia destes modelos no verão (Fernandez *et al.*, 2006 ; Misra *et*

al., 2003), a variabilidade inter-anual associada a eventos ENOS (Seth e Rojas, 2003; Fernandez *et al.*, 2006; Druyan *et al.*, 2002; Misra *et al.*, 2003), a resolução horizontal mais adequada para representar o clima na região (Rauscher *et al.*, 2006) e também o início e fim da estação chuvosa, bem como a frequência e duração de períodos secos (Rauscher *et al.*, 2007).

É importante ressaltar que toda a técnica de regionalização contém erros derivados do modelo global que força o modelo regional, desta forma os cenários de mudanças climáticas regionais, apesar de proverem um bom guia de tendência do clima, continuam a apresentar as incertezas provenientes do modelo global.

RESULTADOS PARCIAIS

CONFORTO TÉRMICO E A MUDANÇA CLIMÁTICA

Os primeiros resultados apresentados visam avaliar o conforto térmico da RMSP com base na separação das variáveis meteorológicas e índices de conforto em intervalos, definidos pelo método dos quantis. Assim, é possível avaliar as mudanças esperadas para o clima futuro de forma quantitativa.

A Figura B3.4 apresenta uma caracterização das condições climáticas vivenciadas pelos habitantes da RMSP, através da distribuição mensal do índice Temperatura Aparente (Steadman, 1994). Este índice foi calculado com base nas *médias diárias da temperatura do ar*, umidade relativa e velocidade do vento registradas na estação meteorológica do IAG. O cálculo da Temperatura Aparente é feito de acordo com a seguinte equação,

$$TA = T_a + 3.3P_a - 0.7v_{10} - 4.00$$

onde TA é a Temperatura Aparente, a temperatura do ar (°C), é a *pressão de vapor d'água (kPa)* e é a *velocidade do vento à 10 metros de altura (m/s)*. A *pressão de vapor* foi obtida a partir da temperatura e da umidade relativa usando a equação publicada pelo Serviço de Meteorologia da Austrália,

$$P_a = UR/100 \times 6.105 \times \exp(17.27 \times T_a / (237.7 + T_a))$$

onde UR é a umidade relativa do ar (%).

Após obtenção do índice TA, a série de dados que vai de janeiro de 1960 a dezembro de 1990 foi separada em 10 intervalos (denominados decis).

Desta forma, os intervalos inferiores compreendem os menores valores de TA, ou seja, os dias mais frios. Em contrapartida, os intervalos superiores contêm os dias mais quentes, no qual os valores de TA são mais altos. Na Figura B3.4 é possível observar que durante o verão há predominância de TA nos intervalos maiores, enquanto que durante o inverno há predominância de TA nos intervalos menores. Em outras palavras, entre 1960 e 1990 é possível notar claramente um padrão climático caracterizado por verões quentes e invernos frios.

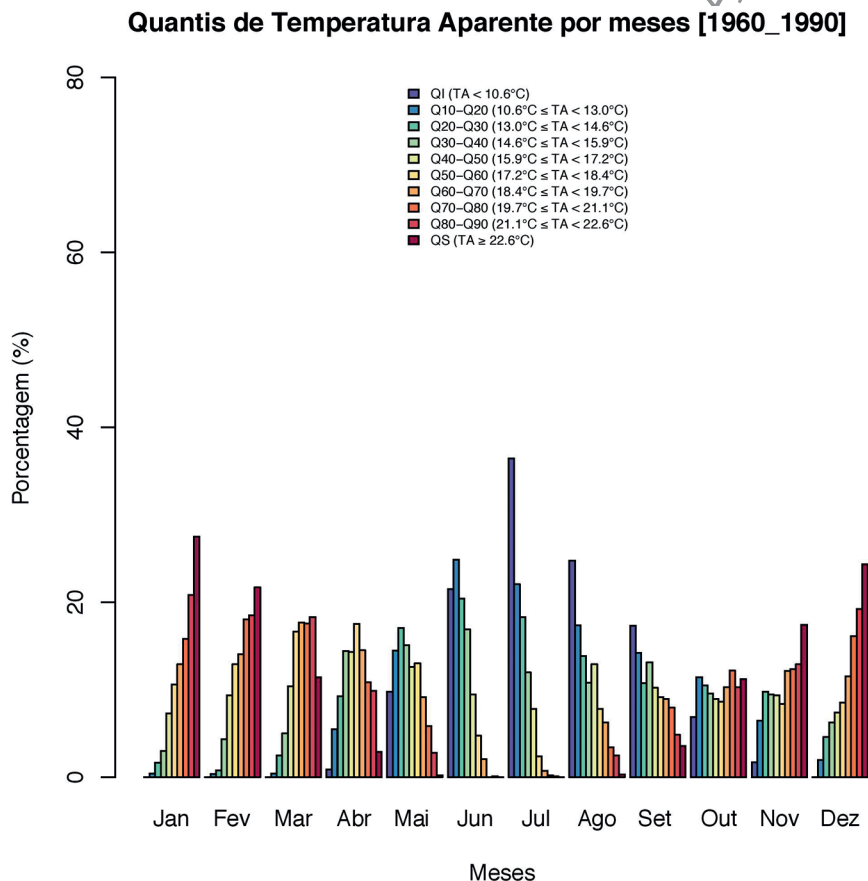


Figura B3.4: Distribuição mensal dos intervalos de Temperatura Aparente para o período de 1960-1990, evidenciando as diferenças entre verão e inverno na RMSF.

Pressupondo que o interesse é verificar o comportamento de extremos referentes à variáveis meteorológicas (dado que estes podem ocasionar um maior impacto na população idosa) maior atenção é dada para os intervalos inferiores (referidos na legenda da figura como Q1) e superiores (referidos como Q10), pois estes são representativos dos extremos meteorológicos. A

definição detalhada a respeito dos valores que limitam os intervalos de TA é dada a seguir:

- QI (intervalo inferior) - nesse intervalo estão compreendidos os dias em que TA foi menor que 10.6°C;
- Q10-Q20 (intervalo intermediário) - neste intervalo estão contidos os dias em que o TA médio diário foi maior ou igual à 10.6°C e menor que 13.0°C;
- Q20-Q30 (intervalo intermediário) - neste intervalo estão contidos os dias em que o TA médio diário foi maior ou igual à 13.0°C e menor que 14.6°C;
- Q30-Q40 (intervalo intermediário) - neste intervalo estão contidos os dias em que o TA médio diário foi maior ou igual à 14.6°C e menor que 15.9°C;
- Q40-Q50 (intervalo intermediário) - neste intervalo estão contidos os dias em que o TA médio diário foi maior ou igual à 15.9°C e menor que 17.2°C;
- Q50-Q60 (intervalo intermediário) - neste intervalo estão contidos os dias em que o TA médio diário foi maior ou igual à 17.2°C e menor que 18.4°C;
- Q60-Q70 (intervalo intermediário) - neste intervalo estão contidos os dias em que o TA médio diário foi maior ou igual à 18.4°C e menor que 19.7°C;
- Q70-Q80 (intervalo intermediário) - neste intervalo estão contidos os dias em que o TA médio diário foi maior ou igual à 19.7°C e menor que 21.1°C;
- Q80-Q90 (intervalo intermediário) - neste intervalo estão contidos os dias em que o TA médio diário foi maior ou igual à 21.1°C e menor que 22.6°C;
- QS - nesse intervalo estão compreendidos os dias em que TA foi maior ou igual à 22.6°C.

Após caracterização do clima atual da RMSP através da TA, é interessante fazer a comparação dos intervalos inferiores e superiores da temperatura do ar observada e modelada, ou seja, entre dados da estação meteorológica e do modelo climático. A Figura B3.5 apresenta as distribuições de temperaturas médias registradas pela estação meteorológica nos intervalos inferior e superior de 1960 a 1990. Basicamente, a Figura B3.5a demonstra

que 30,8% das temperaturas médias diárias registradas pela estação do IAG em julho ficaram abaixo de 14,1°C, caracterizando-o como o mês de maior estresse térmico por frio na RMSP. Respectivamente, junho e agosto tiveram 26,1% e 22,7% de temperaturas médias inferiores a 14,1°C. Já na Figura B3.5b temos a distribuição das temperaturas médias diárias no intervalo superior, ou seja, temperaturas acima de 22,9°C. No período em questão, fevereiro apresentou 30,4% das temperaturas médias diárias no QS, o que o caracteriza como o mês mais desconfortável devido ao calor. Janeiro e dezembro também apresentam quantidade significativa de dias enquadrados neste intervalo.

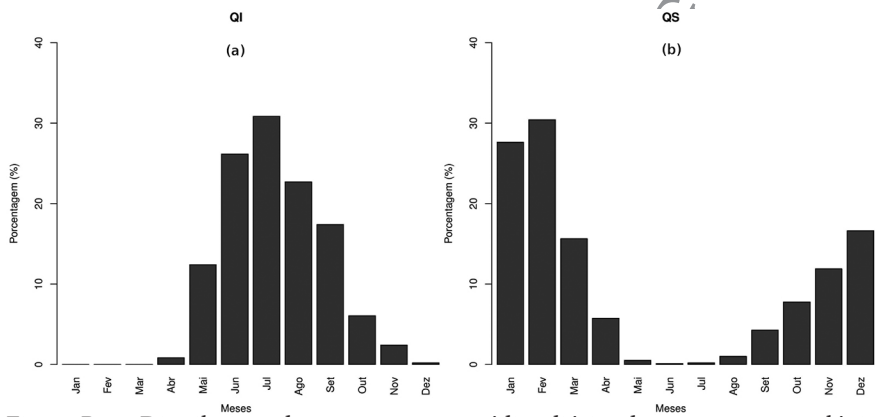


Figura B3.5: Distribuição das temperaturas médias diárias da estação meteorológica do IAG de 1960 a 1990 nos intervalos inferior (a) e superior (b).

A metodologia usada na Figura B3.5 é novamente aplicada nas Figuras B3.6a, b, c, d para se obter a distribuição das temperaturas médias diárias para os dados do modelo climático regional RegCM3 (Pal *et al.*, 2007), tanto para o período de 1960 a 1990 (comparação entre as séries de tempo medida e simulada), quanto para 2070 a 2100 (simulada apenas). No presente trabalho, as condições iniciais e de fronteiras aplicadas no modelo regional são obtidas do modelo global ECHAM5, que é baseado no modelo de previsão do tempo do *European Center for Medium Range Weather Forecasts* (ECMWF). O modelo considera o cenário A1B do IPCC. Uma descrição detalhada sobre o ECHAM5 pode ser encontrada em Roeckner *et al.* (2003). A Figura B3.6a e b apresenta a distribuição das temperaturas médias diárias de 1960 a 1990 através do modelo climático, para o inverno e verão, respectivamente. Observa-se de imediato que o formato da distribuição, tanto para o inverno quanto para o verão, é semelhante ao da Figura B3.5, embora as diferenças entre os intervalos apareçam de forma suavizada e mais modestas. Esta suavização é associada ao fato do modelo climático não simular com perfeição a amplitude diária das variáveis meteorológicas.

Já a Figura B3.6 *c* e *d* mostra a mesma distribuição para os anos de 2070 a 2100. Nota-se uma tendência de aquecimento com o passar do tempo para esta região, uma vez que se verifica uma redução na porcentagem do intervalo inferior no inverno e um aumento na porcentagem do intervalo superior no verão. Na Figura B3.6*d*, projeta-se que mais de 80% das temperaturas médias diárias dos meses de janeiro serão acima de 21,1°C. De forma contrária, apenas aproximadamente 8% das temperaturas ficarão abaixo de 12,3°C nos meses de julho para o mesmo período, uma diferença significativa se considerarmos os 40% simulados em 1960-1990.

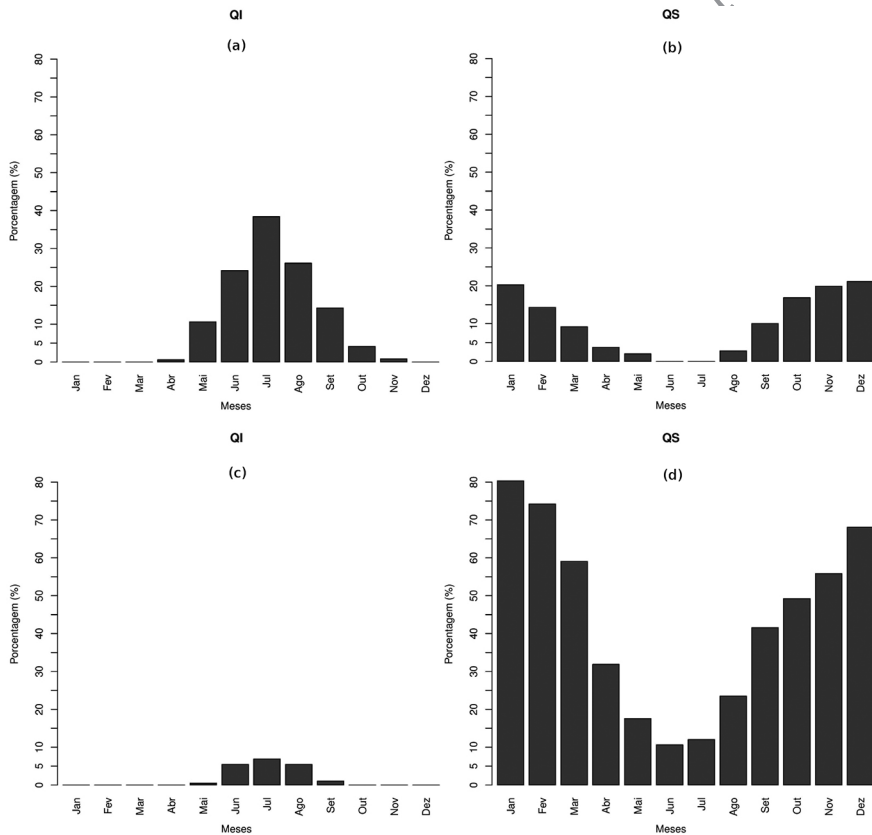


Figura B3.6: Distribuição das temperaturas médias diárias das simulações do modelo RegCM3 no intervalo inferior (a) e superior (b) para os períodos de 1960-1990 e no intervalo inferior (c) e superior (d) para 2070-2100.

Outra forma de verificação das alterações climáticas se dá através do uso de calendários climáticos e índices de conforto térmico, conforme vista em Batista (2012), para os mesmos períodos de 1960-1990 e 2070-2100. As Figuras B3.7*a* e *b*, representam os calendários climáticos contendo as médias diárias do Índice de Desconforto (ID) proposto por Thom (1959), obtido a partir de

$$ID = T_a - 0,55 \cdot (1 - 0,01 \cdot UR) \cdot (T_a - 14,5)$$

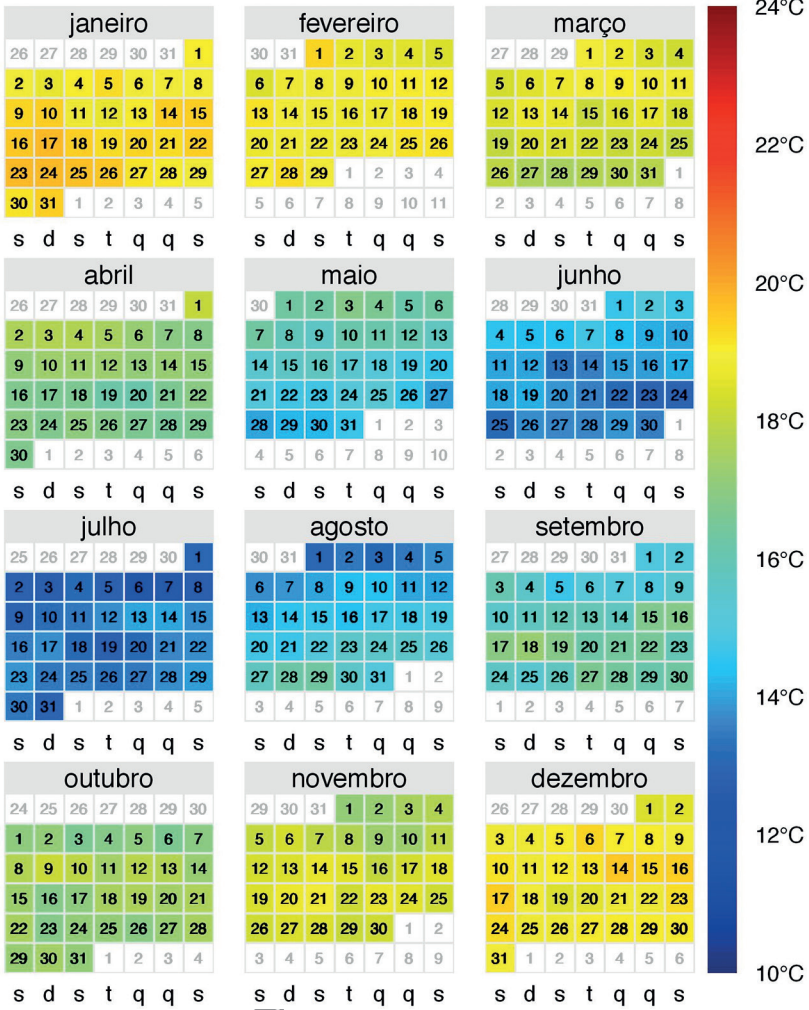
onde ID é o Índice de Desconforto, T_a é a temperatura do ar (°C) e UR a umidade relativa (%).

Observando as duas figuras, notamos a tendência de que os verões sejam mais quentes e os invernos menos frios na RMSP, corroborando a previsão obtida através da técnica dos quantis (Figuras B3.5 e B3.6). Em janeiro e fevereiro de 2070-2100, por exemplo, é possível ver médias diárias climatológicas de ID próximas de 24°C, indicando que o período diurno e noturno apresentarão valores altos deste índice. Conseqüentemente, na RMSP a população estará mais sujeita a um estresse térmico ocasionado pelo calor. Em contrapartida, os invernos tendem a ser amenos, corroborando novamente em a previsão dos quantis.

É importante salientar que a tendência de aquecimento verificada para a RMSP está ligada exclusivamente ao cenário de emissões de gases de efeito estufa utilizado e não considera o crescimento da malha urbana da cidade, pois o RegCM3 não possui um esquema de simulação do espaço e crescimento urbano ao longo do tempo. Os resultados obtidos representam valores médios para períodos de 30 anos, de tal modo a não considerar efeitos locais que podem provocar alterações pontuais em variáveis meteorológicas, como por exemplo, a interação entre brisa marítima e a “ilha de calor urbano” que interagem na formação de chuvas convectivas na RMSP (Silva Dias e Machado, 1997).

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

(a)



ARQUIVO

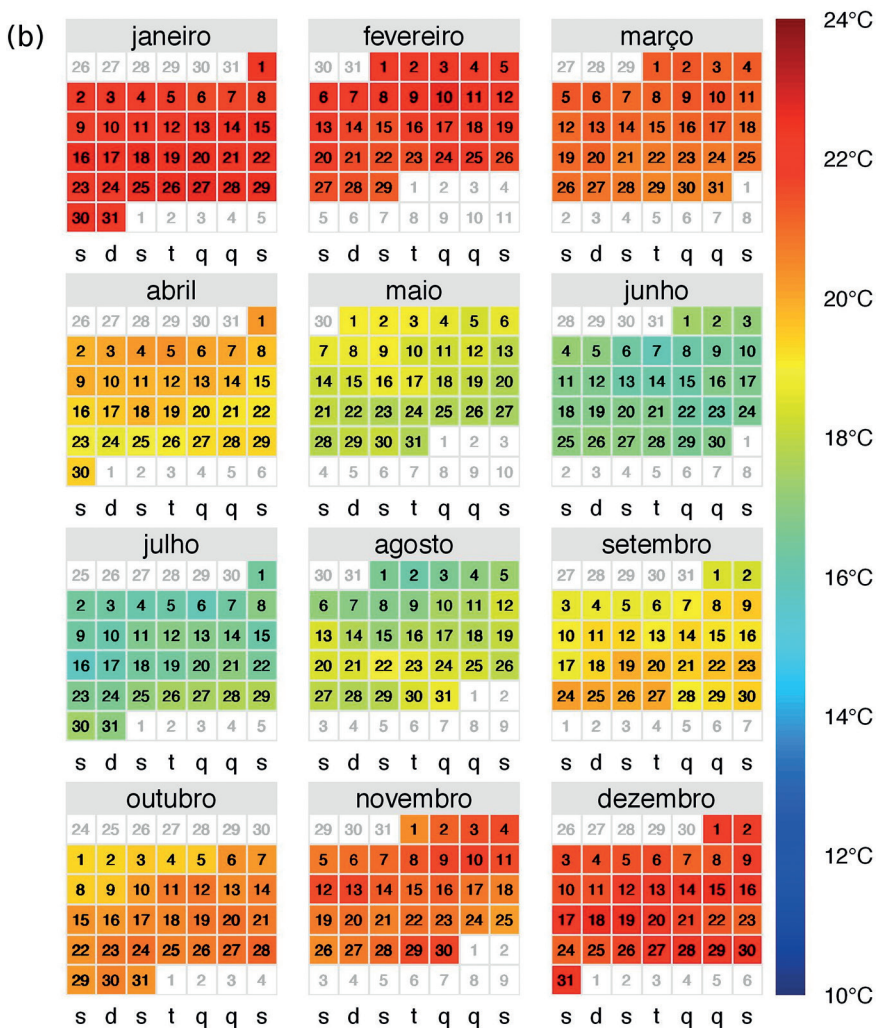


Figura B3.7: Calendário climático de ID para os períodos de (a) 1960-1990 e (b) 2070-2100.

FECHAMENTO

Este é um projeto em andamento que possui o intuito de verificar o impacto que o clima atual e as mudanças do clima teriam na população geriátrica da RMSP, com respeito ao seu ambiente domiciliar e suas habilidades físicas e cognitivas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE 55. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, ASHRAE, 2004.

AUERBACH, P. S. Thermoregulation - Important modifications of thermoregulatory responses. *Wilderness Medicine*, 2007.

BASU, R.; SAMET, J. M. *Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence*. *Epidemiol Rev.*, v. 24(2), p. 190-202, 2002.

BATISTA, R. J. R. *Climatologia e previsão climatológica, via modelo RegCM3, de índices de conforto térmico para a região metropolitana de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 112 p., 2012.

DRUYAN, L. M.; FULAKEZA, M.; LONERGAN, L. Dynamic Downscaling of Seasonal Climate Predictions over Brazil. *J. Climate*, v. 15 (23), p. 3411-3426, 2002.

FERNANDEZ, J. P. R.; FRANCHITO, S. H.; RAO, V. B. Simulation of the summer circulation over South America by two regional climate models. *Part I: Mean Climatology*. *Theor. Appl. Climatol.*, v. 86, p. 247-260, 2006.

GIORGI, F.; MEARNS, L. O. Introduction to special sections: Regional climate modeling revisited. *J. Geophys. Res.*, v. 104, p. 6335-6352, 1999.

GONÇALVES, F. L. T.; BRAUN, S.; SILVA DIAS, P. L.; SHAROVSKY, R. Influences of the weather and air pollutants on cardiovascular disease in the metropolitan area of São Paulo. *Environmental Research*, v. 104, p. 275-281, 2007.

GONÇALVES, F. L. T.; CARVALHO, L. M. V.; CONDE, F. C.; LATORRE, M. R. D. O.; SALDIVA, P. H. N.; BRAGA, A. L. F. The effects of air pollution and meteorological parameters on respiratory morbidity during the summer in São Paulo City. *Environment International*, v. 31, p. 343-349, 2005.

IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p., 2007.

LOMBARDO, M. A. Ilha de calor de São Paulo. *Ambiente: revista CETESB de tecnologia*, v. 2 (1), p. 8-14, 1988.

MISRA, V.; DIRMEYER, P. A.; KIRTMAN, B. P. Dynamic Downscaling of Seasonal Simulations over South America. *J. Climate*, v. 16 (1), p. 103-117, 2003.

MONTEIRO, L. M. *Modelos preditivos de conforto térmico: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos*. Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 378 p., 2008.

MOURA, D. *Condições do escoamento e de conforto térmico em cabine de aeronave*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo, 74 p., 2009.

PAL, J.; SOLMON, F.; RAUSCHER, S.; ZAKEY, A.; ELGUINDI, N.; BI, X.; GIORGI, F.; NAGARAJAN, B. *RegCM Version 3.1 User's Guide*. International Centre for Theoretical Physics, Trieste Italy, 2007.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 11, p. 1633–1644, 2007.

RAUSCHER, S. A.; SETH, A.; LIEBMANN, B.; J-H, QIAN, J. H.; CAMARGO, S. J. Regional climate model-simulated timing and character of seasonal rain in South America. *Mon. Weather Rev.*, v. 135, p. 2642–2657, 2007.

RAUSCHER, S. A.; SETH, A.; QIAN, J. H.; CAMARGO, S. J. Domain choice in an experimental nested modeling prediction system for South America. *Theor. Appl. Climatol.*, v. 86, p. 229–246, 2006.

ROECKNER, E.; BAUML, G.; BONAVENTURA, L.; BROKOPE, R.; ESCH, M.; GIORGETTA, M.; HAGEMANN, S.; KIRCHNER, I.; KORNBLUEH, L.; MANZINI, E.; RHODIN, A.; SCHLESE, U.; SCHULZWEIDA, U.; TOMPKINS, A. The atmospheric general circulation model ECHAM5. *Part I: Model description*. *Max Planck Institute for Meteorology Rep.* v. 349, 127 pp, 2003.

SETH, A.; ROJAS, M. Simulation and Sensitivity in a Nested Modeling System for South America. *Part I: Reanalysis Boundary Forcing*. *J. Climate*, v. 16 (15), p. 2437–2453, 2003.

SILVA DIAS, M. A. F.; MACHADO, A. J. The role of local circulations in summertime convective development and nocturnal fog in São Paulo, Brazil. *Boundary-Layer Meteorology* v. 82, p. 135–157, 1997.

STEADMAN, R. G. Norms of apparent temperature in Australia. *Australian Meteorological Magazine*, v. 43, p. 1–16, 1994.

THOM, E. The discomfort index. *Weatherwise*, v. 12, p. 57–60, 1959.

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

B4. ECONOMIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS: A EXPERIÊNCIA BRASILEIRA COM A UTILIZAÇÃO DE MODELOS INTEGRADOS PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE MCG

EDUARDO AMARAL HADDAD¹, ELIANE TEIXEIRA DOS SANTOS¹

1. INTRODUÇÃO

O principal objetivo das atividades do subprojeto “Economia das Mudanças Climáticas” no âmbito do INCLINE é desenvolver metodologias integradas para simular os impactos potenciais das mudanças climáticas globais (MCG) na economia brasileira, considerando seus diversos setores e dimensões espaciais. Busca-se a integração de projeções de modelos climáticos com modelos socioeconômicos, de forma que uma análise integrada dos impactos econômicos desses fenômenos possa ser efetuada. A partir daí, políticas de adaptação e mitigação no Brasil também podem ser simuladas. O núcleo central da modelagem econômica são modelos de equilíbrio geral computável (EGC), capazes de lidar de maneira consistente com a integração com outros modelos.

A execução deste subprojeto requer a participação de pesquisadores especialistas nacionais e internacionais em áreas afins, liderados pela FEA-USP. A articulação necessária para o desenvolvimento desta área tem-se beneficiado das atividades do INCLINE, bem como da formação de outras redes de colaboração como a Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede CLIMA) e o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC).

No que se segue, apresentaremos resultados de dois estudos sobre impactos econômicos de MCG. Os trabalhos relatados neste capítulo tiveram como objetivo abordar a questão do impacto de mudanças climáticas globais (MCG) ou seus desdobramentos sobre variáveis de relevância econômica. Estes trabalhos empíricos realizados para o Brasil ilustram o esforço recente de quantificação destes efeitos. O conjunto de

1. Departamento de Economia da FEAUSP e Núcleo de Economia Regional e Urbana da USP (NEREUS)

atividades econômicas e regiões afetadas por MCG tende a ser amplo, uma vez que os impactos desse fenômeno repercutem tanto diretamente nas atividades econômicas como indiretamente. Efeitos econômicos sistêmicos merecem especial atenção na avaliação dos impactos de MCG. Não apenas os setores tendem a ser afetados de forma heterogênea, direta e indiretamente, como também regiões tendem a apresentar impactos diferenciados.

Apesar da longa estrada ainda a se percorrer, o desenvolvimento recente de modelos climáticos que permitem maior desagregação setorial e regional dos impactos físicos tem permitido aumentar o conhecimento técnico sobre o problema da mudança do clima na economia brasileira, possibilitando o desenvolvimento de estudos setoriais cada vez mais detalhados. Simulações referentes à avaliação *ex ante* dos impactos potenciais de MCG sobre a economia tendem a se basear em projeções de média das temperaturas e precipitações para intervalos de períodos raramente inferiores a uma década. A utilização da média reduz as incertezas associadas às projeções dos modelos climatológicos. Se por um lado a utilização das médias das variáveis climáticas para longos intervalos de tempo reduz as incertezas relativas às projeções climáticas, por outro esta escolha impõe limitações analíticas. Em particular, o uso de médias para períodos longos não permite que os modelos econômicos sejam aplicados à análise de eventos climáticos extremos de ocorrência irregular e pontual, tais como períodos atípicos de seca prolongada ou excesso de chuvas em determinados anos (Margulis *et al.*, 2011). Não obstante o grau de incerteza dos modelos climatológicos atuais, análises dos impactos de eventos extremos sobre a atividade econômica são realizadas *ex post*, no intuito de se aferir o custo econômico de desastres naturais e o grau de vulnerabilidade econômica das sociedades afetadas.

Os estudos aqui selecionados retratam estas duas dimensões das avaliações de impactos econômicos de MCG. O primeiro deles apresenta uma síntese dos resultados de uma avaliação *ex ante* dos impactos econômicos das MCG no Estado de Minas Gerais. Em termos metodológicos, articula as projeções de alterações climáticas a modelos socioeconômicos, de forma que uma análise integrada dos impactos econômicos desses fenômenos possa ser efetuada. O segundo estudo faz uma avaliação *ex post* dos custos econômicos dos alagamentos ocorridos na cidade de São Paulo em 2008. Adota uma estratégia de modelagem que integra informações climáticas e econômicas georreferenciadas a um modelo espacial EGC.

2. AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A ECONOMIA MINEIRA²

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar os impactos causados por MCG, manifestadas em mudanças de temperatura e pluviosidade, sobre a economia do Estado de Minas Gerais. O estudo identificou os prováveis impactos de diferentes cenários da mudança do clima em Minas Gerais, avaliando suas prováveis repercussões econômicas e regionais no Estado até o ano de 2050.

O resultado é um quadro geral do futuro da economia mineira consistente com as premissas utilizadas pelo IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change* –, detalhado para setores e regiões. Foram gerados cenários de referência, ou tendenciais, elaborados sem MCG (SMCG), e cenários com MCG (CMCG) incorporando os efeitos das MCG nos setores agricultura, pecuária e energia, para a avaliação comparativa dos impactos.

É importante enfatizar que os cenários delineados partiram das mesmas premissas adotadas no Estudo Econômico das Mudanças Climáticas do Brasil (EMCB) (Margulis *et al.*, 2011). As trajetórias climáticas do IPCC baseiam-se, dentre outras, em hipóteses sobre o comportamento futuro da economia global. Este estudo simulou o comportamento futuro da economia mineira em compatibilidade, na medida do possível, com as mesmas hipóteses do IPCC para a economia global.

Foram gerados dois cenários: A2-BR, alinhado com o cenário climático A2 do IPCC, e B2-BR, alinhado com o cenário climático B2 do IPCC. Em ambos, foram feitas simulações inicialmente sem mudança do clima e posteriormente com mudança do clima. Tais cenários representam trajetórias futuras da economia brasileira e da economia mineira caso o mundo se desenvolva globalmente segundo as premissas (econômicas) dos respectivos cenários do IPCC. Em termos muito simplificados, o cenário A2 prevê pouca preocupação com as mudanças climáticas, podendo ser caracterizado como um cenário tendencial “business as usual”; já o cenário B2 introduz uma preocupação maior das sociedades com os problemas climáticos, com as consequentes mudanças de atitudes e comportamentos com respeito ao problema.

2. FIPE/FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2011: Avaliação de Impactos de Mudanças Climáticas sobre a Economia Mineira, Belo Horizonte.

2.1. MENSURAÇÃO DOS CUSTOS

Este estudo apresentou uma síntese econômica sistêmica inédita em termos de impactos espacializados de MCG em trajetórias temporais explícitas para a economia mineira. Utilizando-se uma integração sequencial (em alguns casos semi-iterativas) com outros modelos, garante-se a consistência intertemporal dos resultados em seus vários níveis de agregação. O núcleo central da modelagem utilizada é um modelo econômico capaz de lidar de maneira consistente com a integração com outros modelos, notadamente modelos de demanda e oferta de energia, de uso da terra e de produtividade agrícola, que por sua vez são integrados a modelos climáticos.

Os impactos de MCG sobre a economia mineira podem ser avaliados a partir dos resultados das simulações para se projetar o fluxo marginal de geração de riquezas na economia, no período 2008-2050. Trazendo a valor presente todas as diferenças de PIB até 2050, tem-se uma noção dos custos das MCG sob um enfoque de perdas na produção. Calcula-se então o valor presente (VP) dos fluxos marginais do PIB real, ao longo do período 2008-2050, sob um leque de taxas de desconto, de modo que os valores utilizados se refiram aos efeitos das simulações de MCG, em R\$ milhões de 2008 (Fig. B4.1).

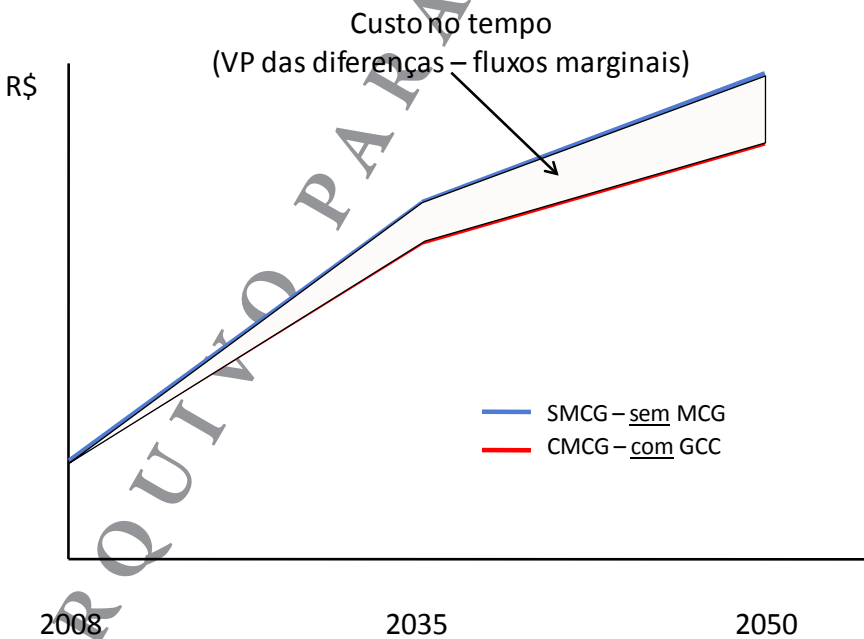


Figura B4.1: Custo cumulativo de MCG

2.2. RESULTADOS

O principal resultado projetado é a ameaça maior das MCG às regiões mais pobres do Estado. Sob a ótica espacial, pode-se concluir que as MCG são concentradoras e intensificam as disparidades regionais em Minas Gerais. Os custos em termos de PIB regional são maiores, em termos proporcionais, nas regiões mais pobres e se intensificam com o tempo.

Se os custos de MCG até 2050 fossem antecipados para hoje, a uma taxa de desconto intertemporal de 1,0% a.a., o custo em termos de PIB para Minas Gerais seria de aproximadamente entre R\$ 155 bilhões (cenário A2-BR) a R\$ 446 bilhões (cenário B2-BR), o que representaria de 55% a 158% do PIB estadual de 2008. A decomposição destes valores, reportada na Tab. B4.1, revela a geografia dos custos de mudanças climáticas no Estado de Minas Gerais.

Destacam-se os custos relativos mais elevados nas microrregiões localizadas no Norte de Minas e no Jequitinhonha/Mucuri. Além disso, microrregiões localizadas no Noroeste de Minas, Triângulo Mineiro, Zona da Mata e Sul de Minas também apresentariam participação nos custos superiores a suas participações no PIB do Estado.

As perdas apontadas representam, para parte significativa do Estado, o equivalente a mais de dois anos de crescimento, ou seja, é como se os efeitos de MCG paralisassem, na margem, o crescimento econômico em algumas regiões por mais de dois anos nos próximos 40 anos. Estas perdas variam, no cenário B2-BR, de aproximadamente um a três PIBs regionais de 2008.

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

Tabela B4.1: Valor presente dos fluxos marginais de PIB associados a MCG (em R\$ bilhões de 2008 e em proporção do PIB regional de 2008)

	RS, bilhões de 2008		Proporção do PIB Regional		PIB Regional		RS, bilhões de 2008		Proporção do PIB Regional		PIB Regional				
	B2-BR	A2-BR	B2-BR	A2-BR	(R\$ bilhões de 2008)	(R\$ bilhões de 2008)	B2-BR	A2-BR	B2-BR	A2-BR	(R\$ bilhões de 2008)	(R\$ bilhões de 2008)			
Unai	-119	-354	-0,72	-2,12	1,67	0,08	-0,08	-0,32	-0,96	0,08	-0,22	-0,58	-1,38	0,16	
Paracatu	-062	-299	-0,45	-2,19	1,36	0,59	-0,33	-0,57	-1,56	0,59	-0,60	-1,57	-0,66	-1,70	0,92
Jamua	-042	-064	-1,27	-1,95	0,33	-107,27	-316,79	-0,53	-1,57	20,52	-0,30	-0,76	-1,38	0,55	0,55
Jaraguá	-025	-061	-0,76	-1,89	0,32	-2,79	-7,58	-0,37	-1,01	7,53	-0,14	-0,39	-0,45	-1,26	0,31
Silvas	-020	-056	-0,66	-1,85	0,30	-0,05	-0,14	-0,43	-1,25	0,11	-0,18	-0,56	-0,38	-1,18	0,48
Pratoni	-025	-1,16	-0,39	-1,78	0,65	-0,25	-0,60	-0,47	-1,16	0,52	-0,19	-0,54	-0,50	-1,46	0,37
Mendes Chros	-1,15	-3,07	-0,85	-2,27	1,35	-0,73	-1,96	-0,48	-1,29	1,52	-0,50	-1,14	-0,61	-1,37	0,83
Grão Mogol	-002	-0,06	-0,51	-1,54	0,04	-0,06	-0,13	-0,49	-1,00	0,13	-0,22	-0,52	-0,57	-1,37	0,38
Bocaina	-018	-0,49	-0,71	-1,95	0,25	-0,04	-0,12	-0,35	-1,04	0,12	-0,35	-0,83	-0,70	-1,68	0,49
Dominiana	-004	-0,09	-0,73	-1,78	0,05	-0,42	-1,02	-0,67	-1,64	0,02	-0,69	-1,88	-0,65	-1,76	1,06
Capelinha	-017	-0,34	-0,92	-1,90	0,18	-0,04	-0,10	-0,42	-1,13	0,09	-2,46	-6,32	-0,69	-1,78	3,55
Araucari	-007	-0,16	-0,81	-1,77	0,09	-5,94	-15,50	-0,52	-1,35	11,50	-0,44	-1,17	-0,56	-1,50	0,78
Pedra Azul	-004	-0,13	-0,37	-1,12	0,12	-0,22	-0,53	-0,59	-1,42	0,37	-1,81	-6,53	-0,60	-2,15	3,03
Altenara	-010	-0,29	-0,59	-1,68	0,17	-0,14	-0,46	-0,36	-1,20	0,38	-2,46	-6,59	-0,76	-2,03	3,25
Teófilo Otoni	-019	-0,47	-0,80	-1,96	0,24	-0,16	-0,45	-0,35	-1,24	0,45	-6,85	-17,86	-0,52	-1,35	13,22
Namape	-032	-1,07	-0,88	-2,97	0,36	-2,09	-4,86	-0,78	-1,80	2,70	-4,84	-12,19	-0,65	-1,66	7,48
Itaúba	-086	-2,26	-0,90	-2,39	0,95	-0,26	-0,74	-0,36	-1,01	0,73	-8,29	-21,51	-0,65	-1,65	13,17
Uberlândia	-031	-15,90	-0,73	-1,83	8,69	-0,17	-0,45	-0,51	-1,32	0,33	-9,90	-27,55	-0,70	-1,96	14,04
Patrocínio	-068	-1,82	-0,51	-1,37	1,33	-0,22	-0,54	-0,61	-1,51	0,36	-2,68	-8,12	-0,45	-1,37	5,94
Patos de Minas	-053	-1,73	-0,39	-1,26	1,37	-0,45	-1,32	-0,51	-1,49	0,89	-3,13	-7,97	-0,61	-1,55	5,15
Fruita	-1,18	-4,98	-0,60	-2,52	1,97	-0,79	-2,06	-0,68	-1,79	1,15	-0,89	-2,46	-0,77	-2,12	1,16
Uberaba	-155	-4,42	-0,64	-1,82	2,43	-0,78	-2,15	-0,50	-1,39	1,55	-114,21	-335,39	-0,53	-1,55	216,74
Araxá	-1,47	-4,57	-0,45	-1,41	3,25	-1,76	-4,21	-0,65	-1,58	2,71	-155,07	-446,37	-0,55	-1,58	283,17
Tres Minas	-015	-0,70	-0,30	-1,38	0,50	-1,60	-4,27	-0,66	-1,72	2,44	-0,90	-2,32	-0,72	-1,85	1,26
Curvelo	-014	-0,42	-0,45	-1,33	0,32	-0,90	-2,32	-0,72	-1,85	1,26	-0,52	-1,45	-0,65	-1,51	0,79
Bom Despacho	-024	-0,85	-0,40	-1,44	0,59	-0,32	-0,83	-0,53	-1,45	0,66	-0,49	-1,18	-0,65	-1,57	0,75
Sete Lagoas	-212	-5,16	-0,66	-1,60	3,22	-0,49	-1,18	-0,66	-1,57	0,75	-72,78	-161,09	-0,25	-1,25	289,72

Obs. Taxa de desconto – 1% a.a.

AÇÃO

2.3. ÍNDICE DE VULNERABILIDADE ECONÔMICA A MCG

O Índice de Vulnerabilidade Econômica a MCG relaciona a participação da microrregião nas perdas com MCG no Estado e sua participação no PIB. Indicadores superiores a “1” indicam um impacto mais do que proporcional à sua participação no PIB, sinalizando uma estrutura produtiva mais suscetível aos impactos das MCG. Esse mesmo indicador, quando inferior a “1”, sinaliza uma microrregião menos suscetível aos impactos das MCG. Em ambos os cenários, notam-se, na região central do Estado, as regiões menos vulneráveis a MCG, e, na porção Norte do Estado, as regiões mais vulneráveis (Fig. B4.2 e Fig. B4.3).

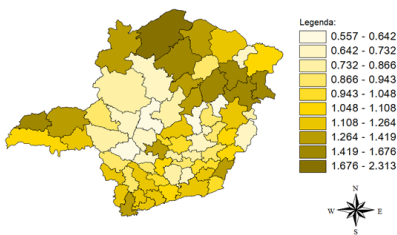


Figura B4.2: Índice de Vulnerabilidade Econômica a MCG – Cenário A2-BR

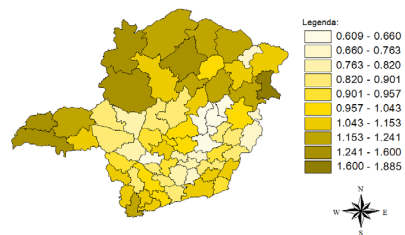


Figura B4.3: Índice de Vulnerabilidade Econômica a MCG – Cenário B2-BR

A Fig. B4.4 resume estes indicadores por Regiões de Planejamento, indicando que a região central tende a ser menos impactada e vulnerável às MCG, e as três regiões ao Norte as mais suscetíveis a esse fenômeno.

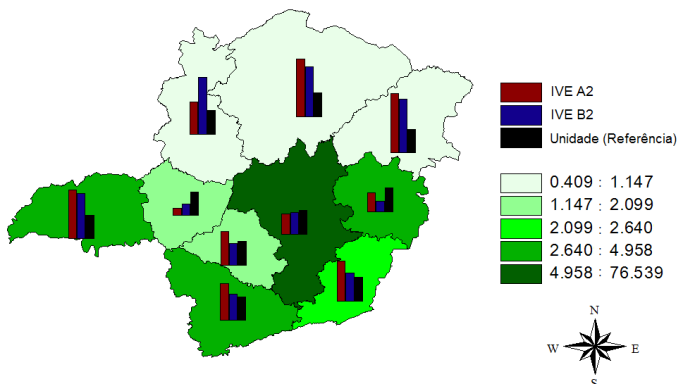


Figura B4.4: Participação regional no PIB Estadual e Índice de Vulnerabilidade Econômica a MCG (IVE) – Cenários A2-BR e B2-BR

OBS. As barras pretas servem como referência para os valores das barras vermelhas (IVE no cenário A2-BR) e azuis (IVE no cenário B2-BR). Valores “acima” da barra preta indicam maior vulnerabilidade relativa.

3. IMPACTOS ECONÔMICOS DE DESASTRES NATURAIS EM MEGACIDADES: O CASO DOS ALAGAMENTOS EM SÃO PAULO³

Esse trabalho teve como objetivo analisar os efeitos econômicos mais amplos dos alagamentos ocorridos na cidade de São Paulo em 2008 e estimar qual teria sido o crescimento das economias municipal, estadual e nacional se os alagamentos não tivessem ocorrido naquele ano. Ao fazer isso foi possível derivar as estimativas de custos econômicos dos alagamentos em relação à interrupção das cadeias de valor associadas ao fechamento temporário das empresas durante o evento. Ao não levar em conta nem os efeitos da interrupção nos serviços de infraestrutura nem os fluxos financeiros associados com a recuperação dos desastres naturais, isolaram-se os efeitos econômicos associados aos alagamentos e sua propagação espacial, proporcionando uma aproximação das consequências regionais e uma perspectiva de cadeia de valor.

A quantificação das perdas econômicas é necessária para auferir a vulnerabilidade dos indivíduos e das comunidades atingidas, avaliar os custos da mitigação dos riscos, determinar o nível apropriado de assistência ao desastre, melhorar as decisões de recuperação, informar seguradoras de suas potenciais obrigações e esclarecer as pessoas interessadas (Rose, 2004). Desastres naturais podem provocar destruição física de capacidade instalada. Contudo, a cidade de São Paulo adaptou-se ao tipo de alagamento que vivencia. Apesar dos transtornos causados, como a interrupção o fluxo de pessoas e mercadorias pela falta de drenagem urbana, as perdas de máquinas e equipamentos são menos relevantes. As principais perdas provocadas no maior centro econômico e financeiro do País são provenientes da paralisação da produção nos locais afetados. Enquanto as perdas diretas são avaliadas por meio da interrupção das atividades econômicas, as perdas indiretas podem ser calculadas considerando as interrupções na cadeia de valor. Tais estimativas de perdas indiretas demandam um modelo econômico capaz de capturar o fluxo de mercadorias entre os agentes econômicos, o que suscita um enorme desafio, dada a unicidade de cada desastre (Okuyama, 2007).

3.1. IMPACTOS DIRETOS DOS ALAGAMENTOS

Usando informações georreferenciadas detalhadas dos pontos de alagamento e dos perfis de trabalhadores das firmas, e pressupondo-se que a produção seja um contínuo em dias úteis, as perdas potenciais podem

3. Ver HADDAD, E. A., and TEIXEIRA, E. (2015). Economic Impacts of Natural Disasters in Megacities: The Case of Floods in São Paulo, Brazil. *Habitat International*, v. 45, p. 106113.

ser indiretamente aproximadas pela medida de salários pagos e perdidos durante a interrupção da produção das firmas afetadas pelos alagamentos.

A informação de alagamentos em São Paulo é fornecida pelo Centro de Gerenciamento de Emergências (CGE) da Prefeitura de São Paulo. A base de dados do CGE informa, para cada ponto de alagamento, sua exata localização, dia de ocorrência, horário de início e duração, bem como uma medida qualitativa de intensidade do evento. Com o georreferenciamento da base de alagamentos de 2008, e integrando esses dados com a localização das firmas por meio de técnicas de sistemas de informação geográfica, é possível identificar todas as empresas afetadas pelos alagamentos em um pré-determinado raio de impacto.

A informação dos pagamentos feitos aos trabalhadores nas firmas afetadas é essencial para capturar as perdas diretas provocadas pelos alagamentos. Esses dados foram obtidos de uma base de dados georreferenciada sobre a situação dos trabalhadores das firmas – a Relação Anual de Informações Sociais (RAIS), disponibilizada pelo Ministério do Trabalho e Emprego. A base de dados da RAIS informa, para cada empresa, sua localização, total de salários pagos aos trabalhadores, e a classificação setorial de sua atividade principal. Esse levantamento estatístico abrange 97% do mercado formal de trabalho, que representa 57% do total da população ocupada no país, fornecendo uma medida da representatividade dessa amostra.

A combinação dessas duas bases de dados nos permite identificar as empresas potencialmente afetadas pelos alagamentos. Para calibrar a área de influência dos pontos de alagamento nas simulações, foram realizadas 25 entrevistas com firmas localizadas na vizinhança de dois pontos de alagamento específicos da base de dados.⁴ As principais conclusões dessa pesquisa de campo foram que: (i) a uma distância de até 100 metros do ponto de alagamento (aproximadamente um quarteirão), as firmas são certamente afetadas – dependendo do horário do evento, os trabalhadores não conseguem chegar ao trabalho, ou deixam o local de trabalho mais cedo; (ii) as empresas mais distantes do ponto de alagamento (por exemplo, a 200 metros) são afetadas apenas nas ocorrências mais severas; e (iii) nas raras ocasiões nas quais a água invade as instalações, medidas de adaptação preventiva são prontamente realizadas para o próximo evento. Assim, o cenário mais factível é aquele que define um raio de impacto de 100 metros e não considera danos em estoque de capital. Além disso, para calibrar as simulações, foi adotada uma hipótese *ad hoc* adicional de que a extensão da perda potencial de produto vai depender do horário do dia em que ocorreu o alagamento: para eventos que ocorreram antes do meio dia (e após 6 horas da manhã) assume-se que toda a produção diária é “perdida”,

4. Regiões da Lapa e CEAGESP.

enquanto apenas a metade dessa produção será considerada “perdida” se o alagamento ocorreu na parte da tarde, durante o horário de trabalho. Assim, depois de identificadas as empresas diretamente afetadas pelos alagamentos sob essas hipóteses de trabalho, é possível estimar as perdas potenciais nos períodos de interrupção da produção. Essa informação é utilizada para preparar o vetor de choque que alimenta o modelo espacial EGC, para que seja possível avaliar os impactos econômicos totais dos alagamentos em São Paulo.

As estimativas de impactos diretos estão altamente concentradas no setor terciário (aproximadamente 90%), principalmente serviços, comércio e transporte. No cenário mais factível, de 100 metros de raio de impacto, quase 20.000 firmas podem ter sido diretamente afetadas pelos alagamentos de 2008, com uma perda de salários de aproximadamente 17 milhões de reais. Em termos de perda de produto potencial, isso representa aproximadamente 80 milhões de reais.

3.2. IMPACTOS SISTÊMICOS DOS ALAGAMENTOS

E se os alagamentos não tivessem ocorrido na cidade de São Paulo em 2008? Qual teria sido a diferença em termos de valor adicionado para a cidade e para outras regiões do País? Para se estimar os impactos totais dos alagamentos em São Paulo foi utilizado um modelo espacial EGC. Trata-se de um modelo baseado em otimizações simultâneas do comportamento dos agentes econômicos, sujeitos a restrições de recursos. Quando estendido para uma estrutura multi-regional, o modelo é capaz de fornecer a distribuição espacial dos impactos (Haddad, 2009).

A análise que se segue será concentrada no cenário mais factível de 100 metros de raio de impacto. Os resultados para os demais cenários são qualitativamente similares. Os resultados macroeconômicos das simulações do modelo espacial EGC indicam que os alagamentos na cidade de São Paulo teriam diminuído o Produto Regional Bruto (PRB) em 0,0263%; e o PIB nacional em 0,0071%. Apesar da ocorrência local dos alagamentos, dentro dos limites da cidade, a redução do crescimento do produto ultrapassa seu território. Os alagamentos também teriam contribuído para reduzir o bem-estar dos residentes da cidade (menor consumo real das famílias), diminuir as receitas fiscais do Governo, e reduzir a competitividade doméstica e internacional da cidade, com agravamento da balança comercial inter-regional e internacional. Os efeitos sobre o País seguem na mesma direção, com redução do bem estar dos residentes e dos gastos do governo, e diminuição da competitividade do País nos mercados internacionais.

Em termos monetários, o impacto total sobre o valor adicionado da economia brasileira foi estimado em R\$ 218,19 milhões (para o cenário de

100 metros de raio de impacto), com um dano direto de R\$ 43,54 milhões e uma taxa de dano associada de 5,0. Considerando apenas o impacto dentro do município de São Paulo, a taxa de dano é equivalente a 2,2. Dada a fragmentação espacial existente no Brasil, e a estrutura de dependência espacial observada nos dados, a hierarquia dos impactos mostra o restante do Brasil como a segunda região mais afetada, com perdas potenciais de PRB similares em magnitude àquelas projetadas para a cidade de São Paulo. O restante do Estado de São Paulo, beneficiado pelo recente processo de esvaziamento da RMSP, apresenta perdas potenciais de PRB maiores do que a totalidade dos outros municípios da RMSP. Assim, o impacto sobre o PIB em todos os cenários seria distribuído espacialmente como segue: a cidade de São Paulo e o restante do País (exceto o Estado de São Paulo) com participações similares nas perdas totais, de aproximadamente 44%; o restante do Estado de São Paulo (fora a RMSP) com 9%, e os restantes 4% associados aos demais municípios que compõem a RMSP.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos aqui reportados ilustram, parcialmente, os esforços recentes que envolvem diretamente pesquisadores da USP ligados ao INCLINE. Como sinalizado no primeiro relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, os esforços mais amplos já realizados na identificação dos efeitos de MCG trouxeram importantes insights iniciais para o caso brasileiro. Ao mesmo tempo, criaram uma base para que novas iniciativas sejam empreendidas, no sentido de promover melhorias nas estratégias de avaliação. Esforços têm sido realizados na construção de uma forma mais ampla de avaliação dos efeitos de mudanças climáticas que integra diversos fatores, incluindo, dentre outros, o econômico, aspectos relacionados ao uso da terra, produção e consumo de energia, recursos hídricos, característica dos solos, vegetação etc. Grande parte destes esforços alinha-se com a proposta da construção de um Modelo Climático Brasileiro, cuja ampla capacidade de avaliação dependerá, em grande medida, da ligação dos modelos e das informações específicas fornecidas por cada equipe envolvida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, M. T. L. *The impact of urban sprawl on flood risk areas*. In: MOGLÉN, Glenn E. *Managing watersheds for human and natural impacts: engineering, ecological, and economic challenges*. Williamsburg, VA: American Society of Civil Engineers, 2005.

FIPE/FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Avaliação de Impactos de Mudanças Climáticas sobre a Economia Mineira*. Belo Horizonte, 2011.

HADDAD, E. A. *Regional inequality and structural changes: lessons from the Brazilian economy*. Aldershot: Ashgate, 1999.

HADDAD, E. A. Interregional Computable General Equilibrium Models. In: M. SONIS; G. J. D. HEWINGS. (Org.). *Tool Kits in Regional Science: Theory, Models and Estimation*. Berlin: Springer, 2009, pp. 119-154.

HADDAD, E. A., e TEIXEIRA, E. Economic Impacts of Natural Disasters in Megacities: The Case of Floods in São Paulo, Brazil. *Habitat International*, v. 45, p. 106113. 2015.

HEWINGS, G. J. D.; MAHIDHARA, Ramamohan. *Economic impacts: lost income, ripple effects and recovery*. In: CHANGNON, Stanley (Org.). *The great flood of 1993: causes, impacts and responses*. Boulder: Westview Press, 1996.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: a special report of working groups I and II*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

MARGULIS, S.; C.B.S. DUBEUX; J. MARCOVITCH, (Org.). *Economia da Mudança do Clima no Brasil*. Rio de Janeiro: Synergia. 2011

MARGULIS, S.; C.B.S. DUBEUX; J. MARCOVITCH (Coord.). *The Economics of Climate Change in Brazil: Costs and Opportunities*, São Paulo: FEA/USP. 2011.

NOBRE, C. *Vulnerability of Brazilian megacities to climate change: The São Paulo Metropolitan Region (RMSP)*. In: MOTTA, Ronaldo S. *et al*. *Climate change in Brazil: economic, social and regulatory aspects*. Brasília: IPEA, 2011.

OKUYAMA, Yasuhide. Economic Modeling for Disaster Impact Analysis: Past, Present, and Future. *Economic Systems Research*, v. 19, n. 2, p. 115-124. 2007.

ROSE, A. Economic principles, issues, and research priorities in hazard loss estimation. In: OKUYAMA, Yasuhide; CHANG, Stephanie E. *Modeling spatial and economic impacts of disasters*. New York: Springer, 2004.

B5. GOVERNANÇA AMBIENTAL

PEDRO ROBERTO JACOBI¹, ANA PAULA FRACALANZA², VANESSA EMPINOTTI³,
ALEXANDRE DO NASCIMENTO SOUZA⁴

Um dos temas de maior atualidade na temática ambiental é o da governança, na qual a gestão integrada que transcende o caráter setorial torna-se fundamental, na medida em que o ambiente é modificado pelas atividades humanas, sendo portanto socialmente construído. Em outros termos, é resultado da ação de múltiplos atores, dentre os quais o Estado que, sem dúvida, é o mais importante, mas nem sempre o mais incisivo.

A governança ambiental tem uma história recente, e ganha impulso a partir de meados da década de 1980, e se refere a formas de governar os recursos naturais envolvendo diferentes atores – governo, empresariado e o espectro ampliado da sociedade civil. Ao enfatizar o conceito de Governança Ambiental se abre um estimulante espaço para repensar as formas inovadoras de gestão, na medida em que fazem parte do sistema de governança: o elemento político, que consiste em balancear os vários

1. Professor Titular da Faculdade de Educação e do Programa de Pós Graduação em Ciência Ambiental (PROCAM/IEE) da Universidade de São Paulo. Coordenador de Grupo Temático Governança Ambiental do INCLINE. Coordenador de GovAmb/USP - Grupo de Acompanhamento e Estudos em Governança Ambiental/Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. Pesquisador 1A CNPq. Editor de Ambiente e Sociedade

2. Professora Doutora da Escola de Artes, Ciências e Humanidades, do Programa de Pós Graduação em Ciência Ambiental (PROCAM/IEE) e do Programa de Pós Graduação em Mudança Social e Participação Política (PROMUSPP) da Universidade de São Paulo. Pesquisadora do Grupo Temático Governança Ambiental do INCLINE. Pesquisadora do GovAmb/USP - Grupo de Acompanhamento e Estudos em Governança Ambiental/Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

3. Professora Doutora da Universidade Federal do ABC - Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas. Pesquisadora do Centro de Energia Nuclear da Agricultura (CENA/Esalq) da Universidade de São Paulo. Pesquisadora do Grupo Temático Governança Ambiental do INCLINE. Pesquisadora do GovAmb/USP - Grupo de Acompanhamento e Estudos em Governança Ambiental/Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

4. Doutor em Ciência Ambiental pelo PROCAM/USP. Pesquisador do Grupo Temático Governança Ambiental do INCLINE. Pesquisador do GovAmb/USP - Grupo de Acompanhamento e Estudos em Governança Ambiental/Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

interesses e realidades políticas; o fator credibilidade, instrumentos que apoiem as políticas, que faça com que as pessoas identifiquem nas ações e decisões políticas a solução dos seus problemas e a dimensão ambiental. O processo de governança envolve múltiplas categorias de atores, instituições, inter-relações e temas, cada um dos quais, suscetível a expressar arranjos específicos entre interesses em jogo e possibilidades de negociação, expressando aspectos de interesse de coletividades, com ênfase na prevalência do bem comum (Jacobi, 2012).

A literatura sobre o tema enfatiza a governança, como a realizada por meio da participação, envolvimento e negociação de multi-atores (*multi-stakeholders*), da descentralização (transferindo poder para o governo local - *empowerment*), da unidade de gestão por bacia hidrográfica, por exemplo, e de mecanismos para resolução dos conflitos (Solanes e Jouralev, 2006; Castro, 2007). Implicando estabelecimento de um sistema de regras, normas e condutas que reflitam os valores e visões de mundo daqueles indivíduos sujeitos a esse marco normativo. A construção desse sistema é um processo participativo, e acima de tudo, de aprendizagem.

Neste capítulo o tema da governança ambiental será aprofundado e discutido dentro do contexto brasileiro. Iniciamos o texto apresentando os princípios e características do conceito de governança, que é seguido pela discussão sobre como a governança ambiental é praticada nos processos decisórios referentes às questões ambientais brasileiras, não só como princípio de políticas públicas, mas também no processo de elaboração e discussão de novas legislações. Os casos dos recursos hídricos, resíduos sólidos e clima são apresentados e analisados a partir de tal perspectiva. Por fim, o capítulo apresenta como os processos de governança ambiental podem proporcionar a oportunidade da aprendizagem social e conclui o texto discutindo as novas perspectivas e desafios para as práticas de governança como a transparência, responsabilidade e efetividade.

GOVERNANÇA: PRINCÍPIOS E CARACTERÍSTICAS

O conceito de governança não pode ser entendido, apenas, como uma construção ideológica, mas como exercício deliberado e contínuo de desenvolvimento de práticas cujo foco analítico está na noção de poder social que media as relações entre estado, sociedade civil e agentes econômicos e que podem ampliar os mecanismos de democracia participativa na medida em que as práticas oriundas das mediações poderão provocar e promover espaços antes inexistentes de participação social. Aqui se adota uma visão que identifica todos os esforços relacionados com a construção cultural para articular teorias, agendas, sujeitos e potencialidades, construção de alianças e cooperação, além de acumular energia para romper com as

abordagens verticais e estanques das atividades humanas e transcender aquelas que se baseiam na supremacia do mercado (Jacobi, 2012). Isto configura um processo no qual se torna implícita a disseminação de alguns dos poderes centrais para instâncias do setor público mais próximas da escala local decisória, menos hierarquizadas, o que determina a inclusão de novos agentes, instituições e estruturas no processo decisório. Portanto, criam-se as condições para uma participação concertada entre vários representantes da sociedade civil na condução política e tomada decisória, em oposição à tradicional perspectiva *top-down* da administração centralizada.

O tema “governança” insere-se nas novas tendências da administração pública e de gestão de políticas públicas, principalmente quando se considera a possibilidade de incluir novos atores sociais no processo decisório no intuito de promover melhoria na gestão e avançar na democratização desses processos decisórios. Ao utilizar o conceito de governança, associa-se à implementação socialmente aceitável de políticas públicas, novos atores sociais na construção de agendas participativas, de modo que a gestão passa a considerar novas relações entre sociedade, estado, agentes econômicos, direito, instituições, políticas e ações governamentais. Fazem parte do sistema de governança: um elemento político, que consiste em balancear os vários interesses e realidades políticas; o fator credibilidade; e a existência de instrumentos que apoiem as políticas, que façam com que as pessoas acreditem nelas (Jacobi, 2009).

A abordagem da governança representa um repensar das formas inovadoras de gestão, articulando o elemento político, que consiste em balancear os vários interesses e realidades; o fator credibilidade, por meio de instrumentos que apoiem as políticas, e faça com que as pessoas se reconheçam na formulação e implementação de ações voltadas à resolução concreta dos problemas socioambientais e nas múltiplas dimensões envolvidas. O processo de governança envolve múltiplas categorias de atores, instituições, inter-relações e temas, cada um dos quais suscetíveis a expressar arranjos específicos entre interesses em jogo e possibilidades de negociação, expressando aspectos de interesse de coletividades, com ênfase na prevalência do interesse comum. Configura a construção, muitas vezes de forma controversa, das condições para a definição de novos espaços institucionais, para as relações entre peritos e leigos, técnicos e usuários, e entre os setores público e privado (Jacobi, 2004).

No Brasil, as diferentes engenharias institucionais e transformações em curso nos organismos colegiados mostram que a implantação efetiva dos diversos instrumentos de participação pode mudar os padrões de governança, estabelecendo novas mediações entre estado e organizações da sociedade civil, baseadas no aprimoramento de suas relações democráticas. Poderão representar uma possibilidade efetiva de transformação da lógica

de gestão da administração pública, abrindo um espaço de interlocução muito mais complexo que amplia o grau de responsabilidade de segmentos que sempre tiveram participação assimétrica na gestão pública. Um dos principais desafios é promover a participação, envolvimento e negociação de multi-atores (*multi-stakeholders*), e isto implica no estabelecimento de um sistema de regras, normas e condutas que reflitam os valores e visões de mundo daqueles indivíduos sujeitos a esse marco normativo (Jacobi, 2009).

Cabe observar que ao falarmos de governança assumimos uma visão na qual se articulam tanto a dimensão gerencial pautada pela eficiência e efetividade governamental quanto a visão democrática-participativa. O grande desafio está no fortalecimento de canais de participação e parcerias, que contribuem para a criação de condições de governabilidade e para a garantia de uma governança participativa como referência de redefinição e rearticulação das relações entre Estado e sociedade, com a abertura de canais de participação para representantes institucionais e profissionais, fomentando dinâmicas inovadoras informais e flexíveis e ambiente favorável à constituição de parcerias e de espaços públicos de negociação e participação da cidadania na gestão local, ou redes sócio-governamentais (Frey, 2007).

O enfraquecimento do Estado no sentido de ter a capacidade de dar respostas eficazes aos problemas de ordem social e ambiental, principalmente, é uma das causas da necessidade de envolver os outros setores na elaboração e implementação de políticas públicas, como forma de legitimar as decisões tomadas e, ainda, que a maioria da literatura sobre o tema considera a nova e/ou melhor governança, a realizada através da participação, envolvimento e negociação de multi-atores (*multi-stakeholders*), da descentralização (transferindo poder para o governo local (*empowerment*), da unidade de gestão por bacia hidrográfica e de mecanismos para resolução dos conflitos (Solanes e Jouvralev, 2006; Warner, 2007).

Esta noção transcende, portanto, uma abordagem de caráter técnico-institucional e insere-se no plano das relações de poder e do fortalecimento de práticas de controle social e constituição de públicos participativos (Castro, 2007; Warner, 2005, 2007). Situações de conflito e de assimetrias de poder são frequentes nos mecanismos mais relevantes para assuntos ambientais no Brasil: os conselhos de meio ambiente (Federal, Estaduais e Municipais); relatórios de impacto ambiental e audiências públicas; comitês de bacias hidrográficas e mesmo na implementação de novas políticas ambientais e de gestão urbana como a política de resíduos sólidos. Nessas situações, cabe considerar as assimetrias de poder e informação dos diferentes atores participantes do processo participativo.

Pode-se, portanto, entender governança como um processo que envolve tomadores de decisão e não tomadores de decisão, com objetivo comum: o problema a ser enfrentado e o desenho da gestão ambiental, onde a participação descentralizada e co-responsável sejam a tônica do processo. Pressupõe atuação em rede, atuação integrada e o ganho de poder dos atores envolvidos na gestão, interagindo com os tomadores de decisões. O fortalecimento da governança ambiental pode ter muitas estratégias (institucionais ou não), como as arenas de negociação, as práticas educativas e a participação da sociedade civil, ferramentas para contribuir para o processo de construção de tomada de decisão compartilhada (Jacobi, 2012).

GOVERNANÇA AMBIENTAL NO BRASIL

A governança ambiental no Brasil tem avançado na medida em que a preocupação ambiental tem se consolidado no país em um processo de disputa entre diversos atores sociais representativos do setor público, privado e do movimento social, com destaque para o movimento ambientalista.

O debate ambiental no Brasil tem início nos anos setenta, fruto dos debates oriundos da conferência de Estocolmo. No entanto, dos anos oitenta para os anos noventa é que o movimento ganha força, organização e maior visibilidade social (Jacobi, 2000). Neste contexto é que em 1981 promulga-se a Política Nacional de Meio Ambiente, um passo efetivo em direção da governança ambiental. A Lei Nacional N°6.938/81 deu o primeiro passo para a instituição de organismos de governança ambiental no país, ao instituir o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, órgão consultivo e deliberativo formado por membros da sociedade civil, empresários e representantes das três esferas de governo: federal, estadual e municipal. O colegiado é a arena político e institucional onde se formulam as principais diretrizes da política ambiental no Brasil que são posteriormente encaminhadas para processo deliberativo junto ao governo federal. A mesma lei de 1981 criou o Licenciamento Ambiental, um instrumento destinado à “compatibilização do desenvolvimento econômico-social com a preservação da qualidade do meio ambiente e do equilíbrio ecológico”.

Ao mesmo tempo, desde meados ao final dos anos 1970 inicia-se o processo de envolvimento da sociedade civil em alguns espaços participativos conquistados, um fenômeno social com desdobramentos em amplos setores da sociedade, inclusive na governança ambiental (Jacobi, 2009; Souza, 2009). Os atores sociais que emergem nos anos setenta no Brasil, criaram novos espaços e novas formas de participação e relação com o poder público, em oposição ao Estado, em um processo de democratização após a ditadura militar no país. Neste momento, a Constituição de 1988 reforça e oxigena o processo da participação social na formulação e implementação

de políticas públicas ao instituir diversos espaços de participação social (Jacobi 2009; Guivant e Jacobi, 2003; Dagnino, 2002). Cabe ressaltar que a Constituição de 1988, em seu artigo 225 considerou o Meio Ambiente um direito de todos e portanto passível de políticas estatais destinadas a preservá-lo e garanti-lo enquanto um bem coletivo (Souza, 2009).

A década de 1990 caracterizou-se por movimentos dirigidos por forças e atores sociais na busca de novos formatos e desenhos de políticas públicas. O desejo de maior participação buscou articular, de um lado, a democratização do processo de construção e tomada de decisão em torno de políticas públicas e, de outro, melhores resultados (Jacobi, 2009; Tatagiba, 2002; Dagnino, 2002).

O fortalecimento do movimento social também incidiu sobre o movimento ambientalista que ganhou impulso e força discursiva por ocasião da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, que ficou conhecida como ECO-92, evento que chamou a atenção da sociedade brasileira para o debate ambiental popularizando-o junto a setores sociais e econômicos até então alheios ao debate socioambiental (Jacobi, 2000).

A partir dos anos 1990, como consequência do fortalecimento do debate ambiental, da ampliação da força do movimento social e do amparo legal garantido pela constituição brasileira dá-se início a uma série de leis em âmbito federal e estadual que vão paulatinamente instituindo mecanismos de governança ambiental na gestão ambiental dos estados e também no plano federal. Entre elas estão a Lei das Águas (Lei Nacional N°9433/97) em 1997 que promoveu profundas transformações quando mudou de um modelo de gestão centralizada nas mãos de uma burocracia estatal para um modelo descentralizado e com foco na territorialidade da bacia hidrográfica (Fracalanza, 2009). Em relação ao Clima, em 2009 foi instituída a Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei Nacional N°12187/2009) que cria espaços de negociação entre o Estado, as organizações da sociedade civil e o setor privado para definir as regras de execução da política. Quanto aos Resíduos Sólidos, no ano de 2010, a Lei Nacional N°12305/10 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que prevê ampla participação social na construção dos Planos Estaduais, Municipais e Intermunicipal de resíduos sólidos.

O processo de implementação das políticas discutidas neste texto encontram diferentes graus de amadurecimento, assim como de adesão por parte dos diferentes atores sociais. Tais diferenças expressam o caráter híbrido da governança, uma característica associada ao fato de que esta pode assumir diferentes formatos, de um modo geral em consonância com o contexto político, social e econômico da gestão. Embora o Estado

ocupe um papel central nos processos de gestão ambiental, estes processos requerem crescente capacidade de coordenação, integração e regulação, como será discutido a seguir.

A POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) do Brasil foi promulgada em 1997, com a Lei Nacional Nº 9433/97. As diretrizes e os princípios que passaram a reger o novo sistema de gestão das águas instituído pela referida lei refletiam profundas mudanças com relação ao modelo anterior. Segundo Jacobi (2009), nesse momento crucial de inflexão, observou-se a substituição de uma gestão institucionalmente fragmentada, composta por práticas históricas de planejamento tecnocrático e autoritário, por uma gestão baseada na tríade: integração, descentralização e participação, sendo a bacia hidrográfica considerada a unidade regional de planejamento e gerenciamento das águas. Com isso, houve uma mudança significativa na forma pela qual o manejo dos recursos hídricos era feito, sendo que a nova lógica orientada pela gestão colegiada e integrada tem o objetivo de arbitrar conflitos e ajustar interesses considerando o debate e os acordos societécnicos (Fracalanza *et al.*, 2013).

A Lei das Águas (Lei Nacional Nº 9433/97) exemplifica a transição do modelo centralizado de tomada de decisão e baseado em práticas de Comando e Controle onde o estado definia e fiscalizava a implementação da gestão dos recursos naturais, para um modelo baseado na descentralização da tomada de decisão e na construção do consenso como forma de negociação. As instâncias participativas são os Comitês de Bacia Hidrográfica e os Conselhos de Recursos Hídricos estaduais e nacionais, nos quais se estabelecem processos de negociação entre os diversos agentes públicos, usuários e sociedade civil organizada (Jacobi, 2009; Ribeiro, 2009). Incluem-se além de investimentos, ações voltadas ao fortalecimento do sistema de gestão da água, implantação de sistemas de informações, de redes de monitoramento e instituições de gerenciamento.

O sistema considera a qualidade e a quantidade da água, por meio de ações que promovam o uso múltiplo dos recursos hídricos. A política participativa caracteriza-se por ser um processo decisório aberto aos diferentes atores sociais vinculados ao uso da água, dentro de um contexto mais abrangente de revisão das atribuições do Estado. Fortalece a gestão descentralizada de cada bacia hidrográfica pelas respectivas organizações (consórcios, comitês, subcomitês e agências), e institui a cobrança pelo uso do recurso como um dos principais instrumentos de atuação destes órgãos. Existem atualmente mais de 180 Comitês Estaduais, sete Comitês Federais e 42 Consórcios Intermunicipais.

Os complexos e desiguais avanços na gestão dos recursos hídricos no Brasil revelam que estas engenharias institucionais, baseadas na criação de condições efetivas para multiplicar experiências de gestão participativa ainda encontram resistência nas antigas instituições de gerenciamento. Neste sentido, cabe reforçar a necessidade de se promover a superação das assimetrias de informação buscando-se a afirmação de uma nova cultura de direitos. Nesse arranjo institucional, a negociação tem como objetivo a obtenção do consenso por meio de discussões que definem as resoluções para a implementação da política de recursos hídricos.

O processo de gestão em bacias hidrográficas, de acordo com o novo sistema, ainda é embrionário e a prioridade dos organismos de bacia é a implantação dos instrumentos necessários para a gestão. As mudanças em curso representam uma possibilidade efetiva de transformação da lógica de gestão da administração pública nos estados e municípios, abrindo uma interlocução mais complexa e ampliando o grau de responsabilidade de segmentos que sempre tiveram participação assimétrica na gestão da coisa pública (Jacobi e Fracalanza, 2005).

Portanto, a política de gestão dos recursos hídricos instituída nos anos noventa apontou novos e diferentes caminhos para as políticas ambientais envolvendo a água. Apesar de o abastecimento humano ser declarado como um dos usos prioritários dos recursos hídricos pela legislação, além de a água ser definida com bem de domínio público, na implementação da política de recursos hídricos nem sempre o foco da gestão está nas questões distributivas.

Assim, cabe ressaltar que populações excluídas de acesso à água em quantidade e qualidade adequadas para usos domésticos muitas vezes ainda têm dificuldades de obtenção deste recurso fundamental à vida. Cabe observar que a busca por gerir os conflitos pelos usos da água e definir seus usos prioritários incorpora atores da sociedade civil nas instituições criadas para gestão da água, mas a exclusão do acesso ao recurso é uma questão observada para inúmeros grupos populacionais em todo o território nacional.

É justamente nesse enfoque que se considera importante analisar a governança da água, não compreendendo somente aspectos de gestão, mas também possibilidades de uso de recursos naturais que reflitam a sustentabilidade em sua vertente social. Nesse sentido, a participação de novos atores sociais seria estendida da gestão da água para seu uso e apropriação. Ou seja, seriam considerados valores de maior igualdade no acesso ao uso da água, em detrimento de valores mercantis de consumo e do recurso hídrico (Fracalanza, 2009).

A presença crescente de uma pluralidade de atores através da ativação do seu potencial de participação cria cada vez mais condições de intervir consistentemente e sem tutela nos processos decisórios de interesse público. Isso legitima e consolida propostas de gestão baseadas na garantia do acesso à informação, e na consolidação de canais abertos para a participação que, por sua vez, são pré-condições básicas para a institucionalização do controle social.

O maior desafio com o qual se têm defrontado muitos comitês é o fato dos diversos atores envolvidos na dinâmica territorial terem visões do processo e dos objetivos divergentes. Dada a complexidade do processo, e das dificuldades de se consolidar um parâmetro de cidadania ambiental, os limites estão dados pela prevalência de lógicas de gestão que ainda centram, na maioria dos casos, uma forte prevalência do componente técnico como referencial de controle do processo, podendo inclusive levar a desarticulação e desinteresse de organizações da sociedade civil em participar dos colegiados (Empinotti, 2011).

A POLÍTICA NACIONAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA

No caso da governança do clima, foi proposto um novo arranjo institucional, definido pela lei 12187/2009, onde a definição e execução da política nacional está à cargo do Comitê Interministerial de Mudança do Clima (CIM) e seu Grupo Executivo (GEx). Por um lado o CIM é o órgão deliberativo, coordenado pela Casa Civil e composto por 17 membros⁵, todos representantes de ministérios, enquanto que o GEx é subordinado ao CIM e é responsável pela coordenação da elaboração, implementação, monitoramento e avaliação do Plano Nacional sobre Mudança do Clima e dos Planos Setoriais. Sua coordenação está a cargo do Ministério de Meio Ambiente e é formado por nove membros⁶, sendo oito representantes de ministérios e um representante do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas (FBMC). Na composição desses dois colegiados, a predominância de membros é de representantes do estado, principalmente na escala federal, enquanto que o setor privado e as organizações da sociedade civil participam por meio do FBMC, um dos membros do GEx.

5. O CIM é coordenado pela Casa Civil da Presidência da República e os seus membros são dos ministérios da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ciência e Tecnologia, Defesa, Educação, Fazenda, Integração Nacional, Saúde, Cidades, Relações Exteriores, Minas e Energia, Desenvolvimento Agrário, Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Meio Ambiente, Planejamento, Orçamento e Gestão, Transportes e pelo Núcleo de Assuntos Estratégicos da presidência da República. O FBMC participa como membro convidado do CIM (Decreto 6263/2007).

6. O GEx é formado pelo Ministério do Meio Ambiente, Casa Civil da Presidência da República, ministérios da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ciência e Tecnologia, Relações Exteriores, Minas e Energia, Desenvolvimento Agrário, Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior e o Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas (Decreto 6263/2007).

Por sua vez, o FBMC foi criado em 2000 pelo Decreto 3515, e têm como objetivo conscientizar e mobilizar a sociedade para a discussão e tomada de posição sobre os problemas decorrentes da mudança do clima e auxiliar o governo na incorporação das questões sobre mudanças climáticas nas diversas etapas das políticas públicas. Uma vez criado por decreto, este fórum é presidido pelo Presidente da República e é composto por 12 ministros de Estado, pelo diretor presidente da ANA e por representantes da sociedade civil e do setor privado que atualmente são 101 membros com predominância do setor produtivo, academia e fundações de pesquisa, fóruns estaduais de mudança do clima, movimentos sociais, sindicatos e ONGs.

Outros colegiados responsáveis por participar do arranjo institucional são o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC); organismo científico nacional na área de mudança do clima; a Rede Clima coordenada pelo INPE/MCTI e é responsável por produzir dados, informação e conhecimento sobre mudança de clima, contribuindo para formulação e acompanhamento de políticas públicas nacionais; o Comitê Gestor do Fundo Clima que orienta os investimentos realizados pelo Fundo Clima e a Comissão Interministerial para Mudança Global do Clima (CIMGC) que é a autoridade nacional designada no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (Protocolo de Quioto).

Com este arranjo institucional, a governança do clima é fortemente caracterizada pela presença e participação de redes formadas principalmente por organizações que representam os diversos setores sociais além do Estado. A coordenação em rede coloca questões associadas com a existência de relações de confiança e de um ambiente de cooperação, que possibilita criar novos canais de participação e parcerias, e assim contribuir para novas formas democráticas de interação público-privada (Jacobi, 2012; Frey, 2007).

A forte presença de representantes do Estado nos colegiados pode ser entendida como respostas as características específicas da problemática do clima e o impacto de sua mudança não só no ambiente, mas na economia e no desenvolvimento dos países. Ao entender as mudanças climáticas como consequência da emissão de grandes cargas de gás carbônico na atmosfera devido à produção industrial, a queima de combustíveis e a mudança da paisagem, combinadas aos padrões de consumo, a identificação de ações que mitiguem o impacto de tais mudanças passa necessariamente pela revisão das estratégias de desenvolvimento e crescimento de cada país. Com isso, a governança do clima se diferencia por não só ocorrer na escala nacional, mas também na internacional, onde as reuniões como a Conferência das Partes (COP) promovida pela ONU e os acordos internacionais são negociados por lideranças das nações e representantes da sociedade. A partir de tais negociações internacionais, os compromissos

e instrumentos para lidar com a mudança do clima são então discutidos no âmbito nacional, estadual e local.

Pelo fato de ser uma temática transversal, com potencial de impactar a geopolítica mundial, as ações com relação à mudança do clima assumem uma importância política e estratégica diferente de qualquer outra questão ambiental. Com isso, a agenda do clima no Brasil, esta sob o comando da Casa Civil e não do Ministério do Meio Ambiente. Além disso, o posicionamento dos outros setores da sociedade, como o Fórum Brasileiro de Mudanças climáticas foca a discussão no posicionamento do país e suas estratégias de produção e comercialização com relação ao resto do mundo. Tal dinâmica altera o objetivo e as formas de negociação, onde a cooperação e a participação dos vários setores, em um primeiro momento, trabalham unidas por um mesmo objetivo que é o de promover o desenvolvimento de baixo carbono e, ao mesmo tempo, assumir compromissos na redução da emissão de gases de efeito estufa, estimular as tecnologias limpas, novas práticas produtivas e desenvolvimento e disseminação de conhecimento.

A dinâmica entre os diferentes atores sociais na governança do clima têm um forte foco na implementação de instrumentos econômicos e de monitoramento que permitam a redução das emissões de gases e ao mesmo tempo promovam a recompensa por tais práticas e a defesa dos interesses nacionais frente a outros países dentro do contexto geopolítico internacional. Com isso, os diferentes atores reconhecem a importância estratégica do Estado nas negociações internacionais, mas ao mesmo tempo defendem seus interesses setoriais frente às pressões das organizações da sociedade civil para desenvolver práticas que levem a mitigação e à adaptação dos efeitos da mudança climática e que também reduzam a velocidade das mudanças já em curso.

A POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) do Brasil, Lei Federal 12.305/2010 (BRASIL, 2010) e sua regulamentação pelo Decreto Federal 7.404/2010 (BRASIL, 2011) constituíram um marco legal para a gestão sustentável de resíduos sólidos no país. Foi aprovada em 2010, após tramitar durante 19 anos pelo Congresso Nacional. Isto decorreu principalmente devido à resistência da indústria em assumir exclusivamente a responsabilidade pós-consumo sobre os produtos e as embalagens colocados no mercado. A PNRS estabelece um marco regulatório para o país. Os princípios norteadores da política são pautados pela lógica da gestão integrada e sustentável de resíduos, a prevenção e a precaução, baseados na não geração, redução, reutilização e reciclagem,

além da disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos⁷ em aterros sanitários (Besen, 2012).

Uma das principais mudanças na nova legislação é o estabelecimento da responsabilidade compartilhada entre cada integrante da cadeia produtiva, composto por empresas, governo e consumidores.

A política propõe a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, e o manejo dos resíduos sólidos pela minimização do volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, assim como pela redução dos impactos causados à saúde humana e à qualidade ambiental (Besen, 2012).

A PNRS fortalece os princípios da gestão integrada e sustentável de resíduos. Propõe medidas de incentivo à formação de consórcios públicos para a gestão regionalizada no intuito de ampliar a capacidade de gestão das administrações municipais, através de ganhos de escala e redução de custos em situações de compartilhamento de sistemas de coleta, tratamento e destinação de resíduos sólidos. Como inovação propõe a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa de retorno de produtos, a prevenção, precaução, redução, reutilização e reciclagem, metas de redução de disposição final de resíduos em aterros sanitários e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos em aterros sanitários (Jacobi e Besen, 2011). Cria mecanismos de inserção de organizações de catadores nos sistemas municipais de coleta seletiva e possibilita o fortalecimento das redes de organizações de catadores e a criação de centrais de estocagem e comercialização regionais.

A legislação conta com três instrumentos: coleta seletiva, logística reversa e o incentivo a criação de cooperativas de catadores de resíduos. Neste sentido responsabiliza uma ampla gama de atores sociais pela produção e destinação dos resíduos sólidos: cidadãos em geral por conta da coleta seletiva, empresas e empresários por conta da logística reversa e poder público no sentido de incentivar e apoiar a criação de cooperativas de catadores de lixo. Além destes, a Política Nacional de Resíduos Sólidos conclama a sociedade em geral a refletir sobre a elaboração dos planos locais de resíduos sólidos obrigados a contemplar em nível local os pressupostos da legislação nacional (ICLEI/MMA, 2012).

Do ponto de vista da governança ambiental a PNRS pode ser considerada um grande avanço na medida em que define a responsabilidade pela geração e coleta dos resíduos sólidos, além de pressupor ampliar a participação social na elaboração dos planos estaduais, municipais e intermunicipais de gestão dos resíduos. Entretanto sua implementação tem mostrado as

7. Rejeitos são resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (PNRS, 2010).

dificuldades de avanço nos mecanismos de participação social ampliada. De acordo com a nova legislação os entes federativos devem elaborar seus planos mediante a participação da sociedade, no entanto, tem-se observado nos primeiros anos após a aprovação da lei uma dificuldade sistêmica no sentido dos Estados e Municípios elaborarem seus planos de resíduos sólidos, em virtude da falta de capacitação dos gestores locais para a elaboração dos planos de resíduos sólidos.

A lei que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos propõe a participação social na elaboração dos planos locais de resíduos sólidos através de seus procedimentos participativos em escala local, e também define responsabilidades pela geração dos mesmos ao instituir a logística reversa⁸, um instrumento que responsabiliza as empresas pela geração do lixo, além da inclusão dos catadores de resíduos na coleta seletiva. (ICLEI/MMA, 2012).

Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2011) são geradas diariamente 183.481,50 toneladas de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Destas, 31,9% correspondem aos resíduos secos. Em âmbito nacional, estima-se que a coleta seletiva formal, desenvolvida pelos municípios de forma terceirizada ou em parceria com catadores organizados em associações ou cooperativas, tenha uma participação ainda muito pequena no total de resíduos recuperados.

O Plano Nacional (BRASIL, 2011) estima entre 400 e 600 mil, dos quais cerca de 10% encontram-se organizados. Verifica-se uma ampliação da coleta seletiva formal nos municípios brasileiros, representando atualmente quase 1000 (18% dos municípios do país), sendo que 653 deles (66%) contavam com parceria com cooperativas/associações de catadores; (IPEA, 2012). Segundo dados do IBGE, em 684 municípios brasileiros, mais de 1.175 cooperativas ou associações de catadores em 2008, reúnem mais de 30 mil catadores (IPEA, 2012). O Plano Nacional de Resíduos Sólidos, ainda não sancionado até meados de 2013, pelo governo federal propõe a meta de inclusão e fortalecimento de 600 mil catadores, e os Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos terão de definir em âmbito local ou regional a forma de inclusão de catadores de materiais recicláveis na coleta seletiva em nível local e de acordo com suas realidades.

O que se tem observado é uma dificuldade sistêmica dos municípios e de alguns estados em articular os setores sociais interessados na construção dos planos, notadamente pela fragilidade institucional de grande parcela

8. Segundo a PNRS, a logística reversa é o instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado pelo conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada.

dos municípios para a execução de um programa que pressupõe ampla e efetiva participação social.

GOVERNANÇA AMBIENTAL NO BRASIL: UM PROCESSO POLÍTICO E SOCIOAMBIENTAL

Como apresentado acima, a lógica da governança desde início dos anos oitenta tem permeado em escala crescente o processo de tomada de decisão e de formulação de novas políticas públicas no que tange ao debate ambiental. Mesmo que em alguns momentos o país tenha observado retrocessos na gestão dos recursos naturais, tanto a legislação ambiental, quanto os processos de tomada de decisão sobre temas ambientais tem se utilizado dos mecanismos de governança como instrumento de negociação das pautas ambientais.

Portanto se constitui um processo que envolve tomadores de decisão e não tomadores de decisão, com objetivo comum: o problema a ser enfrentado e o desenho da gestão ambiental, onde a participação descentralizada e co-responsável sejam a tônica do processo. Pressupõe atuação em rede, atuação integrada e o ganho de poder dos atores envolvidos na gestão, interagindo com os tomadores de decisões. O fortalecimento da governança ambiental pode ter muitas estratégias (institucionais ou não), como as arenas de negociação, as práticas educativas e a participação da sociedade civil, ferramentas para contribuir com o processo de construção de tomada de decisão compartilhada (Jacobi, 2012).

Estas políticas representam uma variedade de práticas de governança ambiental que refletem as características ambientais e políticas de cada questão. Isto mostra que o entendimento de governar torna-se um processo interativo porque nenhum ator detém sozinho o conhecimento e a capacidade de recursos para resolver problemas unilateralmente. Conforme a concepção da governança interativa (Kooiman, 2002), os gestores públicos deveriam não apenas se preocupar com a solução de problemas específicos, mas também com o desafio de governar interações. Governança, segundo Kooiman, implica a necessidade de criar condições favoráveis para que as interações dos diversos atores sociais, imprescindíveis para lidar com a diversidade, dinâmica e complexidade que caracteriza as transformações urbanas, possam ocorrer, e pontes do entendimento possam ser construídas.

As estratégias de governança abrigam diversas possibilidades, e uma delas pautada pela premissa da coordenação em rede, coloca questões associadas com a existência de relações de confiança e de um ambiente de cooperação (Jacobi, 2012). As redes podem depender principalmente da interdependência das organizações, do princípio da auto-organização, mas

também da cooperação e da solidariedade, podendo ser vistas como uma forma de criar novos canais de participação e parcerias, e assim contribuir para novas formas democráticas de interação público-privada (Frey, 2007).

GOVERNANÇA AMBIENTAL E PROCESSOS PARTICIPATIVOS – COMO DESENVOLVER APRENDIZAGEM SOCIAL

Inserido no processo de Governança da Água, o conceito de Aprendizagem Social abre um estimulante espaço para desenvolver processos de articulação de ações nos quais a estratégia de aprendizado é que todos devem conhecer o contexto de criticidade e as condições de governança para intervirem juntos em contextos de bacias hidrográficas. Essa dinâmica possibilita o aprendizado social, e o aperfeiçoamento da governança das águas.

A partir do conceito de Aprendizagem Social (*Social Learning*) visa-se responder aos desafios da sustentabilidade e integração das interfaces da gestão da água, o que pressupõe a contribuição de diferentes conhecimentos e interdisciplinaridade. Isso implica em compreender o arcabouço jurídico-institucional, a dinâmica sócio-territorial da bacia, os atores que incidem na gestão, o conteúdo do plano de bacia, entre outros. Trata-se de uma tarefa complexa; pois o conflito cognitivo é imanente (HarmoniCOP, 2003)⁹. O entendimento do problema é pressuposto para que os atores comecem a dividir sua compreensão sobre o mesmo, explorando as possibilidades de perspectivas para a intervenção. Isso resulta no desenvolvimento para a conexão de diferentes tipos de entendimento do problema, criando diálogos inter-setoriais e interdisciplinares, enquanto base de fortalecimento de lógicas de cooperação. Ao contrário de estratégias de controle; existe a necessidade de mudança flexível e adaptativa ao gerenciamento, e as arenas de articulação se tornam imprescindíveis para o desenvolvimento cooperativo das atividades propostas.

No contexto da Governança da Água, a Aprendizagem Social se compõe de um conjunto de estratégias institucionais de aprendizado em bacias hidrográficas para o fortalecimento da tomada de decisão. Esta abordagem não se centra apenas na obtenção de um conhecimento suplementar e no aperfeiçoamento da compreensão de problemas inter-relacionados complexos, como ocorre nos temas vinculados com a gestão da água; mas permite que os diferentes atores intervenientes compreendam melhor as percepções dos outros sobre os problemas que são essenciais para melhorar

9. Como exemplo utiliza-se o projeto HarmoniCOP – (*Harmonising Collaborative Planning*), um projeto de cooperação europeia que envolve diversas instituições de pesquisa para a gestão de bacias hidrográficas em diversas regiões da Europa. (www.harmonicop.info)

as relações dos participantes e proporcionam a base para uma cooperação consistente e articulada.

O arcabouço teórico da Aprendizagem Social permite verificar que o aprendizado conjunto é fundamental para as tarefas comuns e construção de um acordo para a bacia; levando em conta o processo no qual está inserida, seu contexto e seus resultados, levam ao entendimento da complexidade das questões ambientais que precisam ser decididas. Isto reforça a dimensão da participação, compartilhamento e co-responsabilização, para decidir quais cenários de sustentabilidade se deseja para a bacia hidrográfica.

Os referenciais da Aprendizagem Social se inserem nas práticas socioambientais educativas de caráter colaborativo. Têm se revelado veículo importante na construção de uma nova cultura de diálogo e participação. E abre um estimulante espaço para a construção de eixos interdisciplinares em torno dos quais se tece uma nova cultura para a formação abrangente, a partir de uma abordagem sistêmica e complexa. Isto abre caminhos para incrementar o potencial de fortalecer espaços de diálogos horizontalizados, de aprendizagem e do exercício da democracia participativa, mediando experiências de diferentes sujeitos autores/atores sociais locais na construção de projetos de intervenção coletivos (JIGGINS *et al.*, 2007; HARMONICOP, 2003).

Esse “fazer coletivo” se configura em potenciais estratégias que englobam um conjunto de atores e práticas. Podem ser um elemento inovador na construção de pactos de governança no futuro das bacias hidrográficas, fomentando a compreensão e o acolhimento de novos paradigmas, que possam informar novas escolhas do poder público e da sociedade numa perspectiva de avanço rumo à sustentabilidade socioambiental.

A Aprendizagem Social também implica que os participantes aceitem a diversidade de interesses; de argumentos, de conhecimento, e que também percebam que um problema complexo como a gestão de bacias poderá ser resolvido através de práticas coletivas, que se sustentam na disseminação de informação, conhecimento e atividades em rede (WALS, 2007).

A Aprendizagem Social nas bacias hidrográficas se refere a um conjunto de ações que estimulam as pessoas a mudarem suas práticas, gerindo processos ambientais mais sustentáveis; tanto social como economicamente. Combina também informação e conhecimentos, assim como capacitação, motivação e estímulos para a mudança de atitudes. No contexto da gestão da água também se refere às habilidades adquiridas para participar de processos de negociação e avanço para ação compartilhada e concertada. Trata-se de um processo interativo, e tanto a estrutura de governança e o meio ambiente afetam e podem ser afetados por este processo. Neste processo, o engajamento dos atores, (tais como o desenvolvimento de capital social ou novas práticas

sociais) e o desenvolvimento de conteúdos e metodologias (criação de novos conhecimentos e utilização de novas ferramentas de gestão como é o caso de modelos) são muito relevantes (PAHL-WOSTL *et al.*, 2007).

CAMINHOS DE REFLEXÃO

A incorporação de novos atores sociais com demandas diferenciadas sobre a gestão dos recursos naturais tem se tornado frequente nos mais diversos âmbitos da gestão ambiental no Brasil: água, resíduos sólidos, clima. A participação desses atores tem trazido para o ambiente da gestão ambiental uma lógica de disputa e negociação sobre os recursos naturais.

Os novos atores sociais, a partir da criação de instâncias descentralizadas de gestão, configuram mudanças nas demandas e alocação dos recursos naturais, como é o caso da água, deslocando-se de um uso prioritariamente focado no suprimento de energia para atendimento de prioridades básicas da população. Essas demandas provocam alterações nos procedimentos tradicionais de gestão dos recursos naturais, o que resulta em processos diferenciados que promovem a necessidade de se reformar a lógica de governança, incidindo sobre a própria estrutura do Estado brasileiro. Nessa direção, o Estado brasileiro tem sido frequentemente objeto de pressão para modernizar sua estrutura de gestão, tendo em vista responder à crescente participação social prevista nos mais variados âmbitos da formulação de políticas.

Os avanços em relação às diversas legislações que preveem a participação social ampliada e diversificada nos mecanismos de governança ambiental no Brasil, não mostram, contudo, que os problemas referentes ao uso equilibrado e múltiplo dos recursos naturais estejam resolvidos; muito pelo contrário, a implementação da legislação tem se mostrado um desafio a ser superado tanto em relação à Política Nacional de Recursos Hídricos de 1997, quanto à recente Lei dos Resíduos Sólidos, aprovada em 2010.

Dentre os principais desafios a serem superados, podem ser considerados: a mudança de cultura dos diversos atores sociais, no sentido de reconhecerem sistemicamente a legitimidade das demandas uns dos outros; o papel do Estado brasileiro na criação de diversos colegiados, conselhos e fóruns, nos quais sejam estabelecidas práticas capazes de diminuir assimetrias econômicas e de conhecimento; a democratização do acesso à informação, tornando os processos de tomada de decisão mais transparentes e participativos.

Por fim, o atual debate sobre governança reconhece a necessidade de ampliação do número de atores a serem envolvidos na gestão pública e impulsiona novas formas de articulação político-administrativa,

freqüentemente se aproximando da estrutura de rede como princípio básico de organização, fenômeno crescentemente assimilado pelo atual debate sobre governança.

Isto demanda aumentar o grau de interação dos diversos atores sociais, o que se faz necessário enquanto concepção de governança interativa. Assim, coloca-se a necessidade de os gestores públicos promoverem condições favoráveis para que as interações dos diversos atores sociais, imprescindíveis para lidar com a diversidade, dinâmica e complexidade, possam ocorrer. Neste sentido, é fundamental o papel dos governos junto às instituições e estruturas de participação, na definição de princípios normativos que norteiem a dimensão intencional da governança.

Portanto, coloca-se a necessidade de estimular condições de responsabilidade (*accountability*), através do envolvimento e da participação da sociedade civil organizada e dos cidadãos na formulação, implementação e no controle das políticas públicas. Esta visão de governança requer novas habilidades da gestão pública, notadamente a articulação e a cooperação com os mais variados atores políticos e sociais.

Não são poucos os desafios, e principalmente as estratégias que devem ser pautadas por uma revisão da governança que promova transparência, responsabilidade e efetividade. Neste contexto, a cooperação e inovação na negociação de conflitos entre múltiplos atores, por meio de práticas participativas e coordenação entre políticas públicas e atores sociais torna-se elemento estruturante de políticas que, a partir deste tripé, promovam controle social, público e transparente das políticas públicas e dos agentes econômicos. As dimensões em jogo são complexas e não podem ser minimizadas. Avançar na governança implica em construir relações no contexto da política, dos interesses políticos e das propostas de políticas, enfatizando três fatores: credibilidade, intersetorialidade e instrumentos adequados para viabilizar a implementação das propostas de ação.

Portanto, a governança ambiental constitui um processo que envolve tomadores e não tomadores de decisão, com um objetivo comum: o problema a ser enfrentado e o desenho da gestão ambiental, onde a participação descentralizada e co-responsável seja a tônica do processo, sendo importante a atuação em rede, de forma integrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BESEN, G.R. *A questão da coleta seletiva formal*. JARDIM, A. et al. (orgs.) Política Nacional, Gestão e Gerenciamento de Resíduos Sólidos. São Paulo: Manole, 2012. p.389-414.

BRASIL. *Plano Nacional de Resíduos Sólidos*. Versão preliminar para consulta pública. Setembro de 2011. Disponível em:

http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao_02022012041757.pdf. Acesso em: 11/07/2013.

BRASIL. *Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010*. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm. Acesso em: 11/07/2013.

CASTRO J. E. Water Governance in the 21st Century. *Ambiente e Sociedade*. vol.10, n.2, São Paulo, p 97-118, jul/dez 2007.

DAGNINO. E. Sociedade civil, espaços públicos e construção democrática no Brasil: limites e possibilidades. DAGNINO, E. (org.). *Sociedade civil e espaços públicos no Brasil*. São Paulo: Paz e Terra, 2002. p. 279-302.

EMPINOTTI, V. E se eu não quiser participar? O caso da não participação nas eleições do comitê da bacia do rio São Francisco. *Ambiente e Sociedade*, v.14, n.1, São Paulo, p.195 - 211 jan/jun 2011.

FRACALANZA, A. P. *Gestão das águas no Brasil: rumo à governança da água?* In: RIBEIRO, W. C. (org.) *Governança da água no Brasil: uma visão interdisciplinar*. São Paulo: Annablume; Fapesp; CNPq. 2009. p. 135-153.

FRACALANZA, A.P.; JACOB, A.M.; EÇA, R.F. Justiça ambiental e práticas de governança da água: (re) introduzindo questões de igualdade na agenda. *Ambiente e Sociedade*, v.16, n.1, São Paulo, pp.19-38, jan/mar 2013.

FREY, K. Governança Urbana e Participação Pública. *RAC-Eletrônica*, v. 1, n. 1, art. 9, p. 136-150, Jan./Abr., 2007 www.anpad.org.br/rac-e

GUIVANT, J.; JACOBI, P. R. Da hidrotécnica à hidropolítica: novos rumos para a regulação e gestão dos riscos ambientais no Brasil. *Cadernos de Pesquisa Interdisciplinar em Ciências Humanas, Florianópolis: UFSC*, n. 67, 2003.

HARMONICOP. *Public participation and the European Water Framework directive*. Role of Information and Communication Tools. Work Package 3 report of the HarmoniCOP project. P. Maurel, ed. 2003.

ICLEI /MINISTÉRIO do MEIO AMBIENTE . *Planos de gestão de resíduos sólidos*: manual de orientação. Brasília, 2012.

IPEA - INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. *Diagnóstico sobre Catadores de Resíduos Sólidos*. Relatório de Pesquisa. IPEA. Brasília 2012. Disponível em: [ttp://www.ipea.gov.br/portal/images/](http://www.ipea.gov.br/portal/images/)

stories/PDFs/comunicado/120425_comunicadoipea0145.pdf). Acesso em: 10/06/2013.

JACOBI, P.R. *Governança ambiental, participação social e educação para a sustentabilidade*. In: PHILIPPI, A. et al. (orgs.) *Gestão da Natureza Pública e Sustentabilidade*. São Paulo: Manole, 2012 P. 343-361.

. _____. *Governança da água no Brasil*. RIBEIRO, W. C. (org) *Governança da água no Brasil: uma visão interdisciplinar*. São Paulo: Annablume; Fapesp; CNPq, 2009. p.35-59.

_____. *A gestão participativa de bacias hidrográficas no Brasil e os desafios do fortalecimento de espaços públicos colegiados*. COELHO, V.; NOBRE, M. (orgs.) *Participação e Deliberação*. São Paulo: Editora 34, 2004 p.270-289.

_____. *Meio ambiente e redes sociais : dimensões intersetoriais e complexidade na articulação de práticas coletivas*. *Revista de Administração Pública- RAP*. Editora da FVG, v. 34/6. p- 131-158, nov/dez 2000.

JACOBI, P.R. e FRACALANZA, A.P. *Comitês de Bacias Hidrográficas no Brasil- desafios de fortalecimento da gestão compartilhada e participativa*. *Meio Ambiente e Desenvolvimento, Curitiba, UFPR*, v.11-12, 2005.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. *Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade*. *Estudos Avançados*, v.25, n.71, p. 135-158, 2011.

JIGGINS, J. et al. *Social learning in situations of competing claims on water use*. *Social Learning- towards a sustainable world*. Wageningen: Wageningen Academic Editors, 2007.

KOOIMAN, J. *Governance. A social-political perspective*. GROTE, J.R.; GBIKPI, B. (eds.). *Participatory governance. Political and societal implications*. Opladen: Springer, 2002, p. 71-96.

PAHL-WOSTL, M. *Social Learning in European River-Basin Management: Barriers and Fostering Mechanisms from 10 River Basins*. *Ecology and Society* 12 (1):19, 2007.

RIBEIRO, W. C. (org) *Governança da água no Brasil: uma visão interdisciplinar*. São Paulo: Annablume/Fapesp/CNPq, 2009.

SOLANES, M.; JOUVRALEV, A. *Water Governance for Development and Sustainability*. Série Recursos Naturales e Infraestructura, CEPAL, Santiago, Chile, junho de 2006.

SOUZA, A. N. *Licenciamento Ambiental no Brasil sob a perspectiva da Modernização Ecológica*. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, USP, 2009.

TATAGIBA, L. *Os conselhos gestores e a democratização das políticas públicas no Brasil*. DAGNINO, Evelina (org.). Sociedade civil e espaços públicos no Brasil. São Paulo: Paz e Terra, 2002. p. 47-103.

WALS, A. *Social Learning- towards a sustainable world*. Wageningen: Wageningen Academic Editors, 2007.

WARNER, J. Multi-Stakeholder Platforms: integrating society in water resource management? *Ambiente e Sociedade*, v.8/n.2, Campinas, p.9-28, jul/dez 2005.

WARNER, J. *Multi-Stakeholder Platforms for Integrated Water Management*. Aldershot: UK, 2007.

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO

ARQUIVO PARA DIVULGAÇÃO