



# Tempo, Clima e Recursos Hídricos

Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá

Secretário Especial de Desenvolvimento Econômico do Estado do Amapá - SEDE  
*Antonio Carlos da Silva Farias*

Secretário de Estado de Ciência e Tecnologia – SETEC  
*Aristóteles Viana Fernandes*

Diretor do Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá – IEPA  
*Benedito Vitor Rabelo*

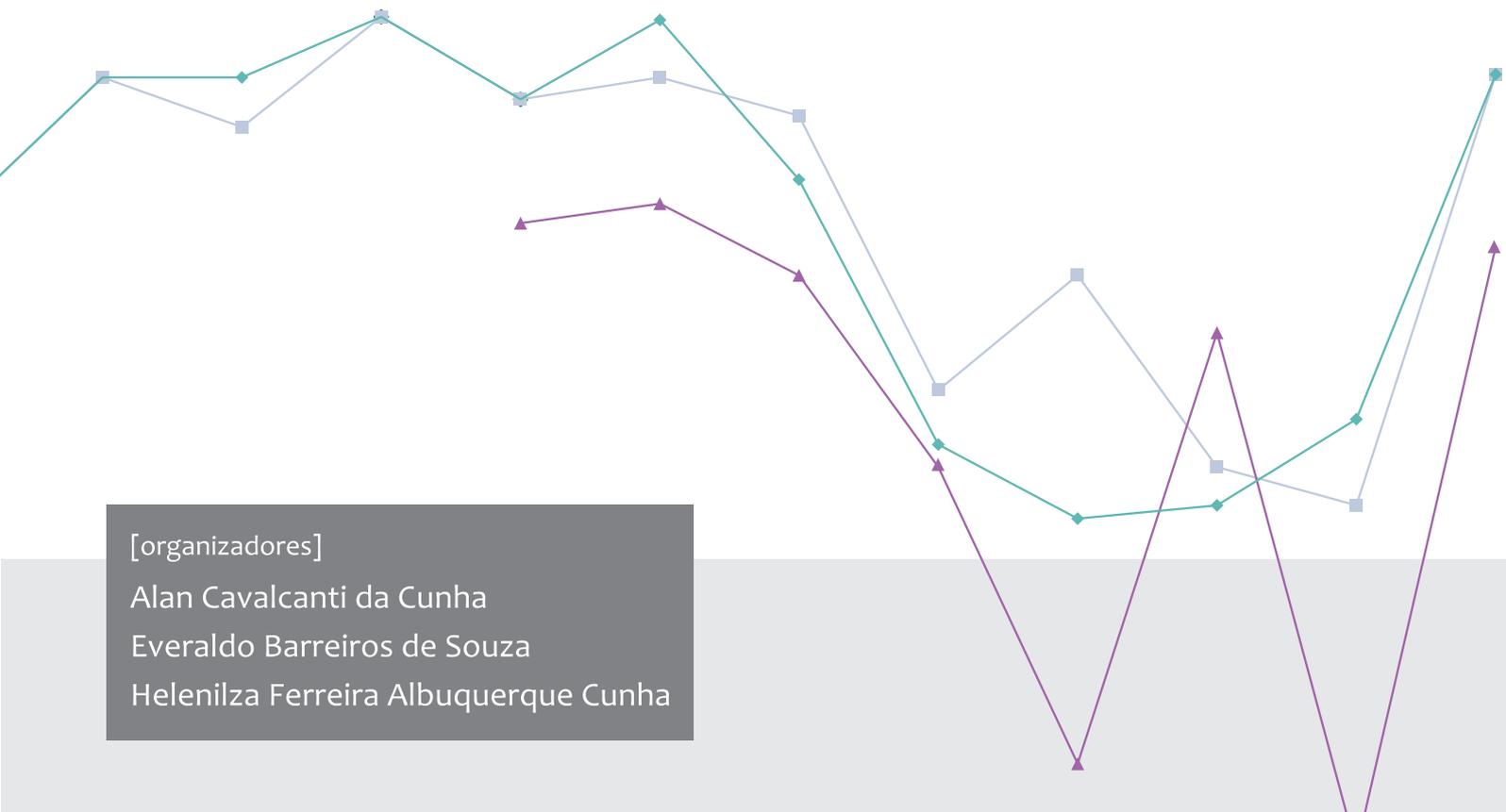
Coordenador do Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis – NHMET  
*Edmir dos Santos Jesus*

Coordenador do Projeto REMETAP  
*Alan Cavalcanti da Cunha*

# Tempo, Clima e Recursos Hídricos

Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá

Macapá • IEPA • 2010



[organizadores]

Alan Cavalcanti da Cunha

Everaldo Barreiros de Souza

Helenilza Ferreira Albuquerque Cunha

Depósito legal junto à Biblioteca Nacional, conforme Lei n.º 10.994 de 14 de dezembro de 2004.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Index Consultoria em Informação e Serviços Ltda.  
Curitiba - PR

T 288 Tempo, clima e recursos hídricos: resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá / Alan Cavalcanti da Cunha, Everaldo Barreiros de Souza, Helenilza Ferreira Albuquerque Cunha coordenadores.— Macapá : IEPA, 2010.  
216 p. : il.

ISBN 978-85-87794-15-4

1. Hidrometeorologia — Amapá. 2. Tempo (Meteorologia) — Amapá. 3. Mudanças climáticas — Amapá. 4. Recursos hídricos — Amapá. 5. Projeto REMETAP. I. Cunha, Alan Cavalcanti da. II. Souza, Everaldo Barreiros de. III. Cunha, Helenilza Ferreira Albuquerque. IV. Título.

CDD (20.ed.) 551.5

CDU (2.ed.) 551.5

IMPRESSO NO BRASIL / PRINTED IN BRAZIL

TRAMAS ECODESIGN

*Liliane Robacher*

Coordenação do Projeto

*Priscilla Fogiato*

Edição e revisão de textos

*Caroline Saut Schroeder*

Projeto Gráfico

*Ivonete Chula dos Santos*

Produção Editorial

## APRESENTAÇÃO

Ao tempo em que os eventos climáticos passam a fazer parte da informação cotidiana da população, tem-se uma ampliação do destino do conhecimento especializado para colocá-lo na condição de instrumento essencial à sociedade. Neste contexto, a nosso ver, se enquadra a experiência do Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis (NHMET) do Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA) quando, por intermédio de seus abnegados pesquisadores, consegue reunir num livro onze capítulos tratando dos mais diversos assuntos atinentes ao tempo, clima e recursos hídricos do Estado do Amapá.

Aos que acompanham e avaliam de perto como tudo isso se processou e o quanto representa para o desenvolvimento científico e tecnológico do Estado, é possível comentar que se trata de um sonho se transformando em realidade. De fato, até recentemente, produzir e tomar conhecimento de eventos gerais e de particularidades do tempo, do clima e de recursos hídricos no Estado do Amapá restringia-se às oportunidades privilegiadas, dificilmente disponibilizadas ao público. Muito era reclamado pela sociedade da necessidade de maiores esclarecimentos sobre os fenômenos hidrometeorológicos no contexto regional. Certamente, tratavam-se de conhecimentos especializados, envoltos em linguagem técnica, pois não poderia ser diferente. Todavia, o que há de mais significativo neste processo é a preocupação institucional em disponibilizá-los ao público e colocá-los ao alcance de todos, de modo a promover o processo de divulgação científica tão necessário para o desenvolvimento do conhecimento local.

Não se pode esquecer que, no Estado do Amapá, eventos como pequenos “tornados”, enchentes dos rios e estiagens prolongadas necessitam ser compreendidos em sua essência para melhor amparar tomadas de decisão pública e prevenir a sociedade de “desastres naturais”. Disponibilizar ao público os resultados de pesquisas reside em uma grata satisfação institucional, democratizando os benefícios do conhecimento científico. A edição do livro **Tempo, Clima e Recursos Hídricos: Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá** configura-se numa dessas oportunidades, na qual pessoal técnico envolvido, instituições responsáveis e Governo do Estado estão todos de parabéns, pois a partir de suas contribuições possibilitaram o início de um novo tempo na história da pesquisa hidrometeorológica do Estado do Amapá.

Benedito Vitor Rabelo  
Diretor-Presidente do Instituto de Pesquisas Científicas  
e Tecnológicas do Estado do Amapá



## APRESENTAÇÃO

Ao apresentar este livro, gostaria de inicialmente informar o que é o Projeto REMETAP. A REMETAP pode ser definida como a Rede de Meteorologia para a Previsão do Tempo, Clima e Recursos Hídricos do Estado do Amapá. Seus principais objetivos podem ser resumidos pela contínua busca da modernização do sistema de pesquisa e operação hidrometeorológica no Estado do Amapá, cujo foco é o usuário que demanda serviços de todos os setores da sociedade, parceiros regionais e nacionais. Tais atividades, atualmente, se concentram no Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis (NHMET) do Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA).

É importante registrar que os avanços científicos e tecnológicos representados pelos saltos qualitativos do NHMET/IEPA puderam, em parte, ser atribuídos ao REMETAP, registrados neste livro. Mas ainda há muito a ser feito. Na verdade, o NHMET está em sua infância e estamos apenas alicerçando as bases de conhecimento, tão necessário para responder aos grandes desafios futuros relacionados, por exemplo, às mudanças climáticas e suas consequências regionais e locais. Estes, notoriamente traduzidos pelas enchentes e ameaças causadas por eventos extremos, dos quais a sociedade tem o direito de se prevenir.

Contudo, devido aos enormes benefícios econômicos, sociais e ambientais advindos mesmo da mais modesta previsão de eventos do tempo, do clima e dos recursos hídricos (no curto prazo e nas análises sazonais), exige considerável esforço de pesquisa e substancial suporte financeiro para torná-los possível. Nestes termos, os autores têm muito a agradecer o apoio e suporte financeiro resultantes do Edital 13/MCT-FINEP/CNPq/2006 e instituições locais parceiras da rede neste grande empreendimento técnico-científico realizado no Estado do Amapá.

Quanto aos principais resultados do Projeto REMETAP, não seria capaz de enumerá-los, pois muitas das principais consequências virão provavelmente com o decorrer do tempo. Mas há de se mencionar sobre quatro principais: a) atenção à rede de observação de superfície (estações meteorológicas em todo o Estado do Amapá), b) capacidade de operar modelos numéricos de previsão instalados localmente (BRAMS, ETA e WRF, RegCM3), c) capacitação de recursos humanos em diversos níveis, desde iniciação científica até mestrandos e doutorandos, e d) melhoria da infraestrutura e de equipamentos para suportar a pesquisa e a operação básica e prestar serviços técnico-científico aos usuários. É dessa evolução que este livro trata ao longo dos onze capítulos apresentados.

Alan Cavalcanti da Cunha  
Coordenador do Projeto REMETAP



## SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO .....	5
<i>Esp. Benedito Vitor Rabelo</i>	
APRESENTAÇÃO .....	7
<i>Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha</i>	
PREFÁCIO.....	11
<i>Dr.ª Darly Henriques da Silva</i>	
1 Rede de Meteorologia e Recursos Hídricos do Estado do Amapá (REMETAP): Principais Resultados.....	15
<i>Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha</i>	
<i>Dr.ª Helenilza Ferreira Albuquerque Cunha</i>	
2 Manutenção e Expansão da Rede de Estações Hidrometeorológicas Automáticas (PCDs) no Amapá .....	29
<i>Msc. Met. Edmir dos Santos Jesus</i>	
<i>Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha</i>	
<i>Dr. Eng. Alaan Ubaiera Brito</i>	
<i>Bal. Físico, Derivan Dutra Marques</i>	
<i>Msc. Met. Naurinete Jesus da Costa Barreto</i>	
<i>Dr. Antônio Carlos Lola da Costa</i>	
3 Análise Comparativa do Desempenho dos Modelos WRF e ETA na Previsão de Chuva para o Município de Macapá (AP).....	43
<i>Lic. Jonathan Castro Amanajás</i>	
<i>Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha</i>	
4 Previsão Numérica Operacional no Estado do Amapá Utilizando o BRAMS .....	61
<i>Dr. Paulo Afonso Fischer Kuhn</i>	
<i>Dr. Eng. Alan Alan Cavalcanti da Cunha</i>	
<i>Grad. Mauro de Jesus Pereira</i>	
<i>Dr.ª Jaci Maria Bilhalva Saraiva</i>	
5 Características Hidroclimáticas da Bacia do Rio Araguari (AP).....	83
<i>Msc. Met. Leidiane Leão de Oliveira</i>	
<i>Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha</i>	
<i>Msc. Met. Edmir dos Santos Jesus</i>	
<i>Msc. Met. Naurinete Jesus da Costa Barreto</i>	

6	Aplicação do Sistema Hidrológico IPHS1 no Estudo de Chuva-Vazão em Aproveitamentos Hidrelétricos na Bacia Hidrográfica do Alto e Médio Araguari.....	97
	<i>Lic. Fis. Leandro Rodrigues de Souza</i>	
	<i>Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha</i>	
	<i>Msc. Met. Naurinete de Jesus da Costa Barreto</i>	
	<i>Msc. Dálmio Chaves Brito</i>	
7	Variabilidade Hidrológica da Bacia do Rio Jari (AP): Estudo de Caso do Ano de 2000.....	119
	<i>Msc. Met. Edmundo Wallace Monteiro Lucas</i>	
	<i>Msc. Met. Naurinete Jesus da Costa Barreto</i>	
	<i>Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha</i>	
8	Análise de Cenário da Qualidade da Água no Rio Araguari (AP) com Uso do Sistema de Modelagem QUAL2Kw: Impactos de Hidrelétricas e Urbanização.....	135
	<i>Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha</i>	
	<i>Msc. Dálmio Chaves Brito</i>	
	<i>Dr.ª Helenilza Ferreira Albuquerque Cunha</i>	
9	Modelagem e Simulação da Hidrodinâmica Superficial e Dispersão de Poluentes no Rio Araguari (AP) Aplicados a Estudos Ambientais de Aproveitamento Hidrelétrico (AHE) .....	155
	<i>Grad. Lic. Física Luís Aramis dos Reis Pinheiro</i>	
	<i>Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha</i>	
10	Climatologia de Precipitação no Amapá e Mecanismos Climáticos de Grande Escala.....	177
	<i>Dr. Everaldo Barreiros de Souza</i>	
	<i>Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha</i>	
11	Impactos Socioeconômicos Associados às Enchentes de 2000 e 2006 no Município de Laranjal do Jari (AP) .....	197
	<i>Grad. Ciências Sociais Alzira Marques Oliveira</i>	
	<i>Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha</i>	
	GLOSSÁRIO .....	213

Planejar e executar são etapas importantes de um projeto de interesse público realizado com recursos da sociedade. Avaliar e divulgar os seus resultados para os usuários e os beneficiados representa cumprir metas e atingir objetivos. Relatórios técnicos de projetos são instrumentos tradicionais de prestação de contas, mas este livro pretende ir além. Ele aponta para resultados qualitativos de um esforço coletivo e bem sucedido do Estado do Amapá.

Esta obra, idealizada pelo Prof. Alan Cunha, reúne trabalhos de uma equipe multidisciplinar de pesquisa relacionada à meteorologia, hidrologia e energia. Ela demonstra o que se conhece na teoria, ou seja, que trabalho em cooperação com objetivos claros e definidos geram consequências benéficas para todos: seja para o Estado do Amapá, seja regionalmente, para a Amazônia brasileira. Os ganhos desses projetos se estendem simultaneamente nacional e internacionalmente, cobrindo o Brasil e os países transfronteiriços amazônicos.

É neste contexto de parceria que se situa este livro. Ele apresenta um rápido histórico de uma parceria bem sucedida entre o Governo Federal e o Estado do Amapá em áreas estratégicas para o Brasil e sua população, e presta contas à sociedade quanto aos recursos usados nos projetos que compõem o conjunto da obra que reflete a seriedade dos participantes.

Os projetos são fruto da cooperação entre instituições de ensino e pesquisa como a Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), a Universidade Federal do Pará (UFPA), a Universidade Federal da Paraíba (UFPB), a Universidade de Brasília (UnB), junto ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), ao Ministério das Ciências e Tecnologia (MCT), ao Instituto Nacional de Meteorologia – Ministério da Agricultura e Pecuária (INMET/MAPA), ao Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM), às Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. (Eletronorte), enfim, todos os parceiros que se uniram para levar os subprojetos da rede amapaense a bom termo.

Apesar de uma colaboração entre Governo Federal e Estado que se desenha há anos no sentido de reforçar as atividades relacionadas ao tempo, ao clima e ao eventos extremos no Amapá, os resultados alcançados agora são muito simbólicos. Rompem com idiosincrasias de alguns que não acreditavam na capacidade local de superar desafios de um Estado Amazônico, com mais da metade do seu território acima do Equador, com ampla costa no Atlântico, fronteiras internacionais, enfim, com muitas riquezas naturais e muitos problemas a enfrentar.

Se instituições são importantes na medida em que se perpetuam no tempo e organizam esforços variados, pioneiros criam instituições e as fortalecem para terem vida longa e sadia. E este é o caso do Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis do Estado do Amapá. O grupo cresceu abrigado

inicialmente pelo LABHIDRO do Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA), até sua consolidação como Núcleo Estadual de Meteorologia e Recursos Hídricos do IEPA, em 2009.

Desde o início, a equipe de pesquisadores reconheceu e respeitou a vocação local do Estado, focada em hidrologia e energia hidrelétrica e renovável, pontos fundamentais para o sucesso de um projeto de futuro. Investiu ao longo dos últimos anos em pessoal qualificado, formando recursos humanos em vários níveis e utilizando tecnologia moderna para dar um salto qualitativo.

O Edital 13/2006 foi fruto do esforço de várias pessoas e instituições. Nasceu de uma demanda dos Centros Estaduais de Meteorologia e Hidrologia levada ao Ministério da Ciência e Tecnologia no final de 2005. Contou com a participação decisiva do fundo setorial CT – Hidro na elaboração da proposta inicial do edital e na alocação dos recursos financeiros.

Os grandes incentivadores e pessoas-chave do Edital 13/2006 foram o Dr. Almir Cirilo, Presidente do Comitê Gestor do CT – Hidro, com o apoio fundamental do Ministro da Ciência e Tecnologia, Dr. Sérgio Rezende, e do Secretário de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento do MCT, Dr. Luiz Antonio Barreto de Castro, que finalmente viabilizaram os Editais 13/2006 e 14/2006.

A ideia era organizar e fortalecer as redes de observação e coleta de dados de tempo e clima nos Estados da Federação (Edital 13/2006) e dar suporte também para estudos e pesquisas em eventos meteorológicos, hidrológicos e climatológicos extremos (Edital 14/2006).

Esses editais realmente quebraram o perfil de uma trajetória inicial de apoio do MCT aos Centros Estaduais de Meteorologia e Hidrologia via convênios com cada Estado. Exigiram a formação de redes estaduais e regionais, forçando parceiros locais a trabalharem em conjunto em projetos comuns, com a cooperação de instituições federais.

O Edital 13/2006, destinado exclusivamente aos Centros Estaduais e lançado como chamada pública da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP/MCT), aberto a todos os Estados da Federação, dispôs de apenas R\$ 5.627.568,33 para 15 propostas aprovadas. Ele foi um teste para os Estados mostrarem sua competência e motivação em trabalhar em parceria, ou seja, com a participação efetiva de todos os atores estaduais e federais. A resposta à chamada pública foi bastante satisfatória.

Entretanto, o Edital 13/2006 foi o primeiro destinado especificamente ao fortalecimento das redes estaduais de meteorologia. A continuação de aporte financeiro nos próximos anos garantirá a prosperidade do Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis do Estado do Amapá (NHMET/IEPA), irrigado pela pesquisa e desenvolvimento de produtos, serviços e processos de interesse de todo o sistema estadual de meteorologia e hidrologia do Amapá e do Brasil.

Esses editais, em especial o 13/2006, representam um marco na história da meteorologia e hidrologia do Estado do Amapá, pois serviram para a institucionalização do NHMET/IEPA. Estes recursos favoreceram a evolução das condições do núcleo de precárias para um centro emergente, passando a fornecer produtos e serviços para a sociedade e tomadores de decisão do Estado, como o 1.º Boletim de Previsão de Tempo publicado por um Núcleo Estadual de Meteorologia e Hidrologia da Amazônia, em 2006.

A Rede de Meteorologia e Recursos Hídricos do Estado do Amapá conseguiu se modernizar com os Editais 13/2006 e 14/2006 e com o Edital AERBOM/FINEP/MCT relacionado a energias renováveis. É um encontro muito auspicioso da meteorologia e da hidrologia com o setor de energias renováveis em prol do Estado do Amapá e do Brasil.

Desejo que este livro inspire outros centros estaduais e os pesquisadores de tempo, clima, hidrologia e energias renováveis nos Estados e contribua para o avanço do conhecimento sobre as questões relacionadas a essas áreas, pois o modelo escolhido pelo Amapá mostrou ser muito bem sucedido, conforme os leitores desta obra terão oportunidade de constatar.

*Darly Henriques da Silva*  
Coordenadora Geral de Meteorologia, Climatologia e Hidrologia  
Ministério da Ciência e Tecnologia



## Rede de Meteorologia e Recursos Hídricos do Estado do Amapá (REMETAP): Principais Resultados

**Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha**

alancunha@unifap.br, alan.cunha@iepa.ap.gov.br

Ex-coordenador do NHMET/IEPA, coordenador do Projeto REMETAP, Prof. Dr. do Curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e Prof. dos Cursos de Pós-Graduação PPGBio/PPGDAPP-UNIFAP.

**Dr.ª Helenilza Ferreira Albuquerque Cunha**

helenilzacunha@unifap.br

Curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e PPGBio/PPGDAPP-UNIFAP.

**Resumo.** *O objetivo principal do presente texto é descrever as principais etapas da evolução do Projeto REMETAP ao longo de dois anos e meio de vigência, desde sua aprovação no Edital 13/2006 da FINEP até a atualidade. O intuito da Rede tem sido desenvolver, integrar e articular ações do setor de meteorologia e recursos hídricos com os diversos atores e instituições locais, regionais e nacionais que demandam serviços e produtos regionalizados. Trata-se de um projeto que integra várias instituições de pesquisa, ensino e extensão com o objetivo de atender diversos usuários da sociedade relacionados ao uso de informações sobre tempo, clima e recursos hídricos em todo o Estado do Amapá. O método de pesquisa utilizado foi a descrição das principais etapas e ações prioritárias realizadas durante o período de vigência do projeto, divididas em quatro principais: 1) inicial ou de pré-implantação, partindo do antigo Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hídricos (PMTCRH); 2) evolução, a partir da criação de uma identidade de pesquisa e operação meteorológica e de recursos hídricos no Estado do Amapá – LabHidro no IEPA; 3) consolidação, com a aprovação de projetos importantes e de impacto científico no setor; e 4) finalização, marcada pela inauguração do NHMET/IEPA, elaboração deste livro e aprovação de novos projetos estruturantes do setor. Além da descrição das quatro etapas, foram analisadas as grandes metas do Projeto no período entre março de 2007 e setembro de 2009, tais como: a) implantação da estrutura física dotada de equipamentos de suporte à operação e pesquisa no Núcleo Estadual de Hidrometeorologia e Energias Renováveis do Estado do Amapá (NHMET/IEPA); b) expansão, manutenção e modernização das Plataformas Automáticas de Coleta de Dados – (PCDs); c) instalação e operacionalização de modelos numéricos de previsão de tempo, clima e recursos hídricos; d) melhoria do sistema de informação computacional e divulgação de serviços e produtos científicos e tecnológicos na página do NHMET/IEPA. Como resultado, evidenciou-se que o Projeto REMETAP foi o principal condutor do desenvolvimento do setor de meteorologia e recursos hídricos no Estado do Amapá, cujos reflexos foram brevemente analisados, mormente aqueles concernentes ao atendimento de crescentes demandas da sociedade por serviços e produtos meteorológicos. Dentre os mais importantes, a real necessidade de sistematizar a operação e a pesquisa de previsão de tempo, clima e recursos hídricos em todo o Estado. Neste aspecto, os resultados do Projeto REMETAP têm sido inovadores e estruturantes, rompendo definitivamente com sua condição de fragilidade e isolamento institucional. A título de conclusão, foi demonstrado que o investimento aplicado no setor gerou frutos científicos e tecnológicos significativos, como a operação de previsão de tempo e clima mediante uso de modelos numéricos consagrados como o BRAMS e RegCM3. Assim, o Projeto REMETAP tornou-se o principal promotor, articulador e integrador de atividades de pesquisa e operação no setor de meteorologia e de recursos hídricos no Estado, integrando-se definitivamente aos principais centros nacionais e contribuindo com o aumento da sua participação na geração integrada de conhecimento no setor, no curto, médio e longo prazos.*

**Palavras-chaves:** Rede Estadual de Meteorologia, Remetap, tempo, clima, recursos hídricos, Amapá, resultados.

## 1. INTRODUÇÃO

É inestimável a importância da atuação dos Núcleos Estaduais de Meteorologia e Recursos Hídricos na Região Amazônica. Contudo, de acordo com Nobre (2005), Cunha (2005) e Cunha (2007), há muitas barreiras a serem superadas. Na década de 1980, por exemplo, havia muitas limitações ao desenvolvimento dos núcleos estaduais. Essa limitação induziu o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) a elaborar um programa nacional que descentralizasse as atividades de monitoramento, previsão e estudos do tempo, clima e recursos hídricos. Tal papel seria designado aos Estados da Federação, com ganhos significativos na regionalização de produtos e serviços do setor, além de contribuir de forma mais efetiva para os centros nacionais de previsão, como é o caso do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/ Instituto de Pesquisas Espaciais-SP (CPTEC/INPE-SP) e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Posteriormente, esse programa seria implementado em nível nacional, em parceria com os Estados da Federação, e receberia o nome de Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hídricos (PMTCRH). A essência do PMTCRH, que preconizava a criação de Centros Estaduais de Meteorologia e Recursos Hídricos (CEMRH), hoje também denominados de Núcleos Estaduais, foi motivada pela experiência exitosa de parcerias entre o INPE e centros estaduais de outras regiões do país. No referido período, o modelo de Centros Estaduais deveria contar com equipamentos e recursos humanos com titulação de mestre em Meteorologia, Recursos Hídricos e Informática em cada Estado contemplado. Mas na prática isso não ocorreu de forma homogênea e simultânea em todas as regiões do Brasil. Houve uma defasagem enorme, principalmente dos Estados periféricos da Amazônia, como é o caso do Amapá. A razão principal era que o programa exigia a efetivação de convênios, e nem todos os Estados respondiam de forma efetiva a esta exigência, por diversos motivos. Outra razão era porque havia Estados que nem sequer tinham profissionais com a titulação e o perfil exigido para implantar e operar um Núcleo ou Centro Estadual (CUNHA, 2007).

A parceria do PMTCRH (MCT) com os Estados disponibilizou uma série de benefícios como equipamentos de computação e coleta de dados, bolsas do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para a fixação de recursos humanos nas áreas de concentração do Programa (Meteorologia, Recursos Hídricos e Informática), além de cursos de treinamentos específicos nas áreas fim. O objetivo era atender as necessidades de aperfeiçoamento e atualização.

A contrapartida dos Estados consistia em **prover a infraestrutura, a contratação de mestres, doutores e profissionais** inicialmente remunerados por intermédio de bolsas do CNPq, além de aporte de recursos financeiros necessários à criação e funcionamento dos CEMRHs. Estes foram implementados nas estruturas das Secretarias de Estado de Ciência e Tecnologia, Recursos Hídricos ou Agricultura de cada Estado (NOBRE, 2005).

De acordo com Nobre (2005), então coordenador do PMTCRH, os avanços do Programa nos Estados foram variados, pois as realidades encontradas entre os Núcleos devido aos reflexos das disparidades

econômicas e sociais prevalentes no Brasil eram diversas. Além disso, também houve desencontro de ações que levaram ao sucateamento de equipamentos e desmantelamento parcial de equipes desses centros, especialmente pela incapacidade de fixar competência técnica nos Núcleos.

Algumas razões foram apontadas como causadoras destes problemas. Inadequação dos sistemas de telecomunicações disponível à época, ausência de uma política agressiva de investimento em recursos humanos em vários Estados etc. Até 2005, havia 21 Estados conveniados no PMTCRH, mais o Distrito Federal, incluindo-se o Estado do Amapá (CUNHA, 2007). Até aquele momento, o Amapá não tinha sido atendido por nenhum dos benefícios acima descritos. Tal fato só ocorreu no final daquele ano, com a chegada de três computadores, duas estações automáticas (PCDs Agrometeorológicas) e com a realização de alguns cursos e treinamentos básicos no CPTEC/INPE, os quais foram decisivos na capacitação inicial de recursos humanos nos centros estaduais.

Em face deste contexto podemos imaginar quão significativo foi o **processo de implantação** do NHMET/IEPA por intermédio da aprovação do Projeto REMETAP/FINEP (Modernização da Rede Amapaense de Meteorologia para a Previsão de Clima, Tempo e Recursos Hídricos) no Edital 13/2006, especialmente elaborado pelo MCT para a modernização e descentralização dos Núcleos Estaduais de Meteorologia e Recursos Hídricos.

No contexto histórico daquela época, a situação do NHMET passou de precária para a de um centro emergente. O salto qualitativo foi formidável, pois promoveu uma marcante presença deste setor em várias áreas do conhecimento na sociedade civil do Estado do Amapá, tanto em termos de capacidade de gerar novos produtos e serviços científicos meteorológicos e de recursos hídricos quanto pela capacidade operacional de gerar respostas de previsão do tempo e clima. Neste sentido, a REMETAP foi decisiva em consolidar o NHMET/IEPA como um importante centro de pesquisa e operação emergente na Amazônia.

Para descrever como ocorreu essa evolução no Estado do Amapá, o presente capítulo pretende detalhar alguns dos principais passos históricos e seus principais momentos, além da importância da REMETAP na consolidação do NHMET/IEPA como um novo núcleo de pesquisa e operação hidrometeorológica.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS: DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS ETAPAS DE EVOLUÇÃO DO PROJETO REMETAP E SUA RELAÇÃO COM O DESENVOLVIMENTO DO NHMET/IEPA

A metodologia apresentada se resumiu na descrição cronológica das principais etapas históricas da evolução do NHMET/IEPA, desde 2003, quando iniciou, até a atualidade. O período de estudo foi dividido em quatro fases principais que, de acordo com Cunha (2007), foram consideradas mais adequadas e expressivas para a exposição da evolução do NHMET/IEPA:

- i) **Período Inicial** (implantação básica 2003 – 2005) – As principais etapas eram concernentes à criação de uma coordenação local do PMTCRH. Participação de recursos humanos em cursos de capacitação em instalação de PCDs. Duas PCDs Agrometeorológicas foram instaladas no Amapá em novembro de 2005. A primeira, em Macapá (no 14.º BIS - Batalhão de Infantaria e Selva) e a segunda no Distrito de Pacuí (Escola Agrícola do Pacuí), distante cerca de 90 km de Macapá. Foram feitos os primeiros contatos técnicos e ações operacionais de instalação e manutenção de PCDs com o MCT e o CPTEC.
- ii) **Período de Evolução** (2006 – 2007) – Publicação do primeiro Boletim de Previsão de Tempo por um Núcleo Estadual de Meteorologia e Recursos Hídricos da Amazônia. Até esta etapa de desenvolvimento, não havia recursos específicos para a meteorologia.
- iii) **Período de Consolidação** (2008 – início de 2009) – Aprovação de novos projetos: Modernização da Rede Estadual de Meteorologia e Recursos Hídricos – REMETAP e REMAM (Editais 13 e 14/2006 da Finep/CNPq). Etapa de expansão e modernização: aprovação de mais um projeto estruturante a partir de Editais Nacionais (Edital FINEP Inovação Tecnológica no Setor de Energias Renováveis /2006 – AERBOM). Estes três projetos foram considerados como os principais na criação do NHMET/IEPA.
- iv) **Período de Finalização – Ramificações** (a partir de junho de 2009): inauguração oficial do NHMET/IEPA em 09 de setembro de 2009; instalação e operação de um *cluster* computacional de alto desempenho paralelo; finalização da instalação das estações automáticas de Itauba do Pírim e Ilha do Parazinho – Bailique; publicação do presente livro, aprovação de novos projetos estratégicos do setor, com ênfase ao Projeto Sudam/NHMET-IEPA/UNIFAP, voltado para os estudos hidroclimáticos e ambientais na bacia do rio Jari (AP), iniciado em setembro de 2009; e REMAM II, recentemente aprovado e financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), voltados aos estudos de eventos hidrometeorológicos extremos na Amazônia, coordenado pelo Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM-PA); e participação da Universidade Federal do Pará (UFPA) e outras instituições de ensino e pesquisa da Amazônia, como a UNIFAP e UFPA.

### 3. RESULTADOS

A implantação da REMETAP influenciou significativamente a evolução e o desenvolvimento do NHMET/IEPA, pois pode ser considerada como estratégica para o aprimoramento das redes de monitoramento de clima, tempo, recursos hídricos (e condições do mar), os quais podem apresentar reflexos em todo o sistema brasileiro. Sua principal vantagem é que o Núcleo está focado em problemas e temas regionais e aos interesses de usuários locais, gerando respostas imediatas aos usuários locais.

Numa breve análise, observando as informações históricas mostrada pela **Tabela 1**, foram registrados alguns dos principais reflexos positivos que a REMETAP proporcionou ao NHMET/IEPA.

Um aspecto importante é que a REMETAP tem incrementado o nível qualitativo e quantitativo das informações geradas pelo NHMET/IEPA, além de fazer parte de diversas outras redes de meteorologia e recursos hídricos da Amazônia: Rede de Eventos Extremos da Amazônia (REMAM I e II), coordenada pelo SIPAM-AM/PA, na qual a REMETAP está integrada juntamente com a Rede de Pesquisa de Clima e Recursos Hídricos (RPCH) do Pará. Desta forma, as redes estaduais mantêm um vínculo local sem perder a visão regional/nacional do setor, com o fortalecimento institucional de ambos. Em consequência, as informações geradas pelas redes locais e regionais apresentaram, nos últimos anos, um salto imenso de conteúdo e qualidade científico-tecnológica, com forte impacto nas áreas de pesquisa científica básica e aplicada, bem como na sistemática de operação de previsão (CUNHA, 2007).

Assim, torna-se aparente a importância do Estado como articulador e mantenedor do diálogo e cooperação entre outras instituições do país, apresentando um papel preponderante na busca da cooperação em rede, otimização das operações de coleta de dados, processamento e divulgação de informações.

Por estas razões, é muito importante que a estratégia de formação das redes de pesquisa e operação na Amazônia se consolide rapidamente se as condições favoráveis de estímulo técnico, científico e econômico se mantiverem por um período prolongado, de sorte que os Núcleos possam se consolidar definitivamente e se tornarem sustentáveis financeiramente. Neste aspecto, as principais etapas de evolução do NHMET/IEPA foram esquematicamente detalhadas na **Tabela 1**.

De acordo com a **Tabela 1** é possível observar uma notável evolução do Núcleo do Estado do Amapá. Observam-se os principais impactos científicos e tecnológicos gerados em função de seu desenvolvimento como um todo. Na primeira coluna da **Tabela 1** são especificadas as principais etapas da evolução do NHMET/IEPA. Na segunda coluna são descritas as principais características institucionais à época de sua implantação ou evolução. Na terceira coluna são descritos os principais serviços e produtos gerados e o papel da REMETAP e outros projetos de importância. Na quarta coluna são indicados os principais impactos detalhados no âmbito científico, tecnológico, social, econômico etc.

**Tabela 1.** Principais etapas evolutivas do NHMET/IEPA segundo a ótica do Projeto REMETAP.

continua

Etapa	Características institucionais	Principais serviços e produtos	Impactos científicos, tecnológicos e socioeconômicos no Estado do Amapá
<p><b>Período Inicial (2001-2004)</b></p>	<p>Criação da Coordenação Local, indicada pelo MCT (PMTCRH e SETEC-AP), cujo responsável seria um pesquisador efetivo do IEPA. Sua função seria planejar, executar e implementar localmente o Centro ou o Núcleo Estadual de Meteorologia e Recursos Hídricos (CETEA). A coordenação local estava vinculada ao Centro de Pesquisas Aquáticas (CPAQ/IEPA). Não havia pesquisadores além do coordenador. O Ofício 842/GAB/ SETEC, de 27 de setembro de 2001, foi enviado ao MCT. A partir deste documento, iniciou-se todo o processo de evolução.</p>	<p>Geração de um Dossiê Técnico, versão 26, jan, 91 p, 2004/2005. Relatório Técnico sobre a Implantação do Centro Tecnológico de Hidrometeorologia do Estado do Amapá CTHEA/CPAQ/ IEPA (CUNHA, 2005).</p> <p>Publicações esparsas e relatórios técnicos.</p> <p>Início do processo de implementação de instalação de Plataforma Automáticas de Coleta de Dados (PCDs) no Estado do Amapá.</p>	<p>Participação do coordenador em reuniões nacionais: São Paulo (CPTEC/INPE) e Brasília (MCT) – entendimento da política de descentralização dos Núcleos Estaduais. Neste período ocorreram os primeiros contatos com coordenadores de outros Núcleos dos Estados brasileiros.</p> <p>Início do processo de difusão e socialização de informações sobre a importância dos Núcleos Estaduais para os usuários locais. Treinamentos básicos e visitas de campo às estações meteorológicas em outros Estados. Início das primeiras atividades de manutenção de PCDs no Amapá com participação de técnicos locais.</p> <p>Difusão de informação sobre a importância estratégica do Núcleo - AP, seu funcionamento e as estações de observação (PCDs) para geração e transmissão de dados hidrometeorológicos locais em sistemas de redes.</p> <p>Submissão de pequenos projetos a editais da SETEC-AP/ PIBIC. Foram admitidos dois bolsistas graduandos (Geografia e Matemática) para atuarem nas áreas de fundamentos em climatologia e recursos hídricos. Um dos primeiros resultados foi o início da inserção de informações climáticas em projetos de pesquisa, em especial da área Ambiental e Biodiversidade Tropical, além de atender demandas de usuários em estudos de exploração e uso de recursos naturais no Estado (um exemplo é o Zoneamento Ecológico e Econômico do Estado - ZEE).</p>

**Tabela 1.** Principais etapas evolutivas do NHMET/IEPA segundo a ótica do Projeto REMETAP.

continuação

Etapa	Características institucionais	Principais serviços e produtos	Impactos científicos, tecnológicos e socioeconômicos no Estado do Amapá
<p><b>Período de Evolução (2005-2006)</b></p>	<p>Implantação informal do Laboratório de Hidrometeorologia (LABHIDRO), ainda vinculado ao CPAQ/IEPA.</p>	<p>Contratação, por meio de cargo técnico, do primeiro Mestre meteorologista do NHMET/IEPA, cuja prioridade era a operação de previsão em todo o Estado do Amapá.</p>	<p>Emissões semanais dos Boletins de Previsão de Tempo. Os boletins semanais eram divulgados em duas etapas: terças-feiras, com previsão até sexta, e sextas-feiras, com previsões até as segundas, fechando o ciclo semanal.</p>
		<p>Disponibilização dos primeiros boletins, produtos e serviços na página do IEPA: <a href="http://www.iepa.ap.gov.br/meteorologia">www.iepa.ap.gov.br/meteorologia</a>.</p>	<p>Melhoria da operação informática. Em dezembro de 2005 houve a admissão do primeiro bolsista na área em nível de graduação / especialista (DTI – MCT/CNPq).</p>
		<p>Início da fixação de pesquisadores em nível de graduação, especialização, mestrado e doutorado (bolsas DTI, DCR do CNPq).</p>	<p>Implantação da sub-área Energias Renováveis. No início de 2006 houve a admissão de mais dois novos bolsistas em nível de graduação: bolsas para Matemática e Física SETEC/CNPq (Áreas de Meteorologia e Recursos Hídricos e Energias Renováveis – fotovoltaicas e hidrocínética). Aquisição de dois novos doutores. No início de 2006 houve a admissão de dois novos bolsistas: bolsas DCR/CNPq (Áreas de Meteorologia e Engenharia - Energias Renováveis).</p>
		<p>Apoio à gestão do Estado na área de pesquisa e ensino em geral, (educação, infraestrutura, agricultura, pecuária, saneamento, navegação, energia, turismo etc).</p>	<p>Participação de doutores do NHMETE/IEPA nos cursos de mestrado/doutorado em Biodiversidade Tropical (PPGBio – UNIFAP / IEPA /EMBRAPA-AP e IC) e Direito Ambiental e Políticas Públicas (PPGDAPP – UNIFAP, UFAC e IEPA), em que alguns projetos de dissertação/doutorado estavam vinculados total ou parcialmente às principais temáticas do LABHIDRO. Essa nova conjuntura impactou positivamente a aprovação de novos projetos de pesquisa nas áreas de Meteorologia, Recursos Hídricos e Energias Renováveis no ano seguinte.</p>
		<p>Inserção temática da meteorologia e recursos hídricos em diversos estudos e pesquisas realizadas no Estado.</p>	<p>Início de uma série de publicações tecno-científicas em eventos locais, regionais, nacionais e internacionais (CBMET, ECOLAB, ENCIT etc.).</p>
<p>Em 04 de maio de 2006 foi lançado o primeiro boletim de previsão do tempo realizada no Estado do Amapá – com uso do Modelo ETA (Regional com grade 15km x 15km).</p>	<p>Impacto em cursos e treinamento, capacitação e auxílio à formação de diversos alunos de graduação em diversas áreas existentes no Estado: Matemática, Física, Biologia, Sociologia, Geografia, Informática, Direito etc.</p>		

Tabela 1. Principais etapas evolutivas do NHMET/IEPA segundo a ótica do Projeto REMETAP.

continuação

Etapa	Características institucionais	Principais serviços e produtos	Impactos científicos, tecnológicos e socioeconômicos no Estado do Amapá
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Período de Consolidação (2007 a 2008)</p>	<p>Implantação Oficial do NHMET na Estrutura Organizacional do IEPA a partir da LEI 1975 de 02 de janeiro de 2008 (DOE, 2008).</p> <p>A <b>Lei 1975 de 2008 (DOE)</b> encerra definitivamente o ciclo de implantação do NHMET/IEPA. O LABHIDRO evolui da condição de Laboratório do CPAQ para Núcleo (Centro de Pesquisa) e consolida a Meteorologia e as Energias Renováveis como as mais novas áreas de pesquisa do IEPA.</p>	<p>Reconhecimento governamental dos serviços e produtos científicos e tecnológicos do NHMET prestados à sociedade.</p> <p>Aumento da demandas por serviços e produtos pelo Governo do Estado. O Núcleo passa a condição de setor imprescindível à gestão de desenvolvimento socioeconômico, ambiental e científico (DOE, 2008).</p> <p>Implantação do Projeto Nacional "Pilotinho", em que o MCT/CNPq e a UFRJ apoiam os Estados na implantação do Modelo WRF (Weather Research and Forecasting) para previsão de tempo <i>online</i> - até sete dias – em fase de teste regional. Apesar das críticas à forma de interação com os Estados, foi um passo a frente no aprendizado com as ferramentas de previsão do tempo.</p> <p>Início da implantação do Modelo Regional BRAMS para estudos científicos do tempo e previsão de eventos futuros de impactos adversos sobre o Estado do Amapá. Início dos treinamentos no sistema BRAMS de equipes locais no CPTEC/INPE.</p> <p>Início dos estudos sobre a climatologia urbana. Aprovação de Projeto em Edital CNPq Universal, categoria C, com o tema Clima Urbano – Ilhas de Calor (coordenação da UFPA e coexecução IEPA e outras instituições da Amazônia).</p> <p>Hidrologia Rural. Aprovação de Projeto P&amp;D em Edital MME / Eletronorte - UnB/IEPA. Sistema de Geração de Energia Hidrocinética aplicadas às comunidades rurais remotas. (Início: março de 2008).</p>	<p>Aprovação de Projeto <b>REMETAP</b> na <b>FINEP, Edital 13</b> (Centros Estaduais – Projeto REMETAP, coordenado pelo NHMET/IEPA). A REMETAP foi o principal projeto da área em execução no Estado que apoiou a elaboração de serviços e produtos meteorológicos, bem como a geração de dados e informações estratégicas da área. Modernizou toda a estrutura e lógica operacional e de pesquisa do IEPA.</p> <p>Aprovação de <b>Projeto FINEP, Edital 14</b> (Centros Regionais Amazônia – Projeto REMAM, coordenado pelo SIPAM (AM) e NHMET/IEPA como coexecutor). Integração com a REMETAP.</p> <p>Aprovação de Projeto <b>FINEP, Edital Energias Renováveis – Inovação</b> (Projeto AERBOM) coordenado pelo NHMET/IEPA. Integração com a REMETAP (aquisição de uma PCD para monitorar vento – energia eólica). A PCD atualmente encontra-se instalada no município de Itauba do Piririm.</p> <p>Previsões do tempo semanais, com expansão de dados observados e inserção dos níveis de marés, modelagem hidrológica, qualidade da água e hidrodinâmica em bacias hidrográficas e reservatórios de hidrelétricas.</p> <p>Início das <b>Reuniões Climáticas Trimestrais</b> (agosto de 2007). <b>Figuras (1 e 2)</b>. Início das <b>Reuniões Climáticas Mensais</b> (novembro de 2007). REMETAP/NHMET-IEPA realizou a <b>XXIII edição da Reunião Climática do Estado do Amapá (Figura 2)</b>.</p> <p>Atualmente o NHMET/IEPA, por intermédio de duas disciplinas dos cursos de mestrado PPGBio (Modelagem de Sistemas Ecológicos) e PPGDAPP (Desenvolvimento Sustentável), está orientando alunos de mestrado/ doutorado, cinco bolsistas em nível DTI, além de três alunos de graduação de Ciências Ambientais nas áreas de Climatologia e Cenários Ambientais, Qualidade da Água, Hidrodinâmica e Estatística. Além dessas áreas, os temas mais abordados são Eventos Extremos, Hidrometeorologia Superficial e Subterrânea, Bioclimatologia, Ecologia, Modelagem da Qualidade da Água, Análise de Contingente para avaliar eficácia de previsão do modelo operacional, Valoração, Sistemas de Gestão Ambiental etc.</p> <p>Um notável avanço foi o desenvolvimento de simulação numérica hidrodinâmica aplicada a rios com influência de marés, como cita Pinheiro <i>et al.</i> (2008) (<b>Figura 3</b>). Na análise foram observadas as influências das marés e das ilhas nos escoamentos turbulentos em ambientes aquáticos do estuário do rio Amazonas próximo de Macapá e Santana.</p> <p>Participação em diversos programas e eventos científicos atuais e bianuais: ECOLAB, PPBio, LBA, Encit, CBENS, e LBA (Modelagem de Sistemas Ecológicos), PROCAD (CAPES-ME), entre outros.</p> <p>Manutenção e crescimento das publicações tecnocientíficas em eventos locais, regionais, nacionais e internacionais (ECOLAB, ENCIT, CBMET, SETEC - Governo do Amapá etc.), além de vários periódicos como SBMET, BASA, ABES etc. Início de elaboração de novos artigos para publicação em revistas <i>qualis</i> e capítulos de livros (Programa Primeiros Projetos SETEC/IEPA).</p> <p>Subsídios efetivos a diversos Estudos de Impactos Ambientais no Setor Hidrelétrico, Mineral e Térmico.</p>

**Tabela 1.** Principais etapas evolutivas do NHMET/IEPA segundo a ótica do Projeto REMETAP.

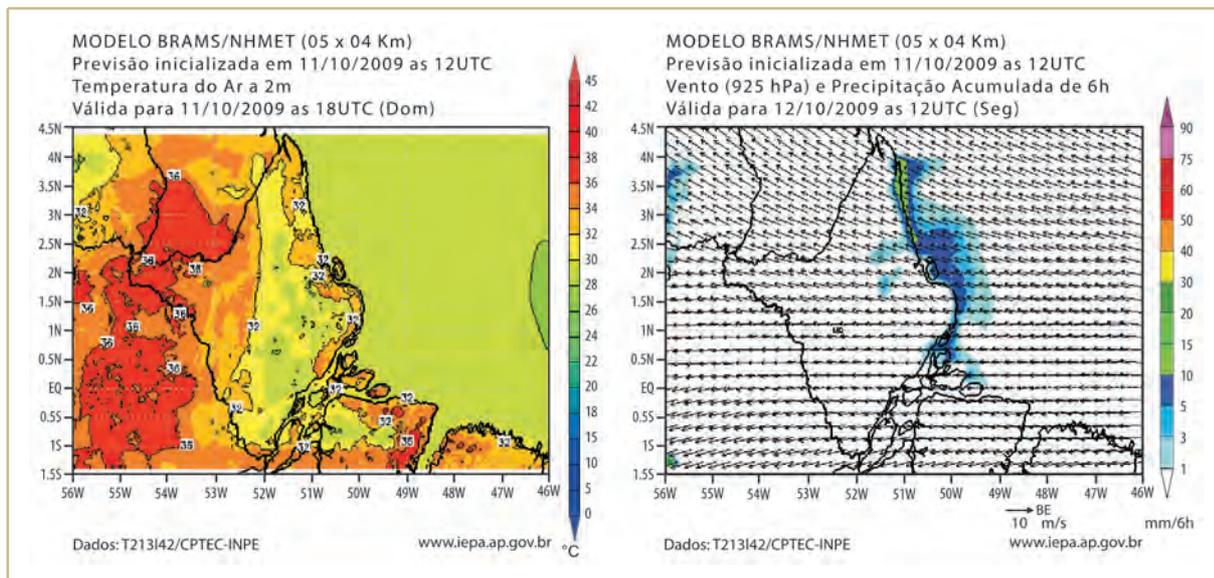
conclusão

Etapa	Características institucionais	Principais serviços e produtos	Impactos científicos, tecnológicos e socioeconômicos no Estado do Amapá
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Período de Finalização (Maio de 2009 - atual)</p>	<p>Implantação do Sistema Oficial de Previsão de Tempo BRAMS no NHMET/IEPA em agosto de 2009.</p>	<p>Descrição e operacionalização do BRAMS-AP</p>	<p>Para cobrir a totalidade espacial de previsão do tempo da região estão sendo usadas, no momento, duas rotinas operacionais assimilando dados disponibilizados pelo CPTEC. A área de abrangência do modelo compreende o retângulo com origem em 1,5S - 56W até 4,5N - 46W, correspondendo a 250 pontos de longitude e 160 de latitude com espaçamento em 5km x 4km, respectivamente, com 32 níveis verticais, destes, sete são em profundidades no solo. Os parâmetros de superfície, como tipo de solo, vegetação, NDVI, temperatura da superfície do mar (TSM ou SST- Sea Surface Temperature) etc. são aqueles recomendados e disponibilizados pelo seu sítio de Internet. O motivo de uso desta grade é fruto da relação custo computacional <i>versus</i> resolução espaço-temporal, considerando que o aumento das resoluções causa um acréscimo significativo no tempo de processamento, o que não pode comprometer a geração e disponibilização dos resultados (<b>Figura 1</b>).</p>
	<p>Implantação do RegCM3 Operacional para Estudos Climáticos Regionais no NHMET/IEPA em setembro de 2009.</p>	<p>Descrição do RegCM3-AP</p>	<p>Para as pesquisas climáticas no Estado do Amapá, a dimensão da grade do RegCM3 configurada para a região do Estado do Amapá tem sido de 30 x 15 pontos em latitude x longitude, com resolução horizontal de 1° x 1° (~ 111 Km), centrado em 1.5°N/52.0°W com 18 níveis na vertical (sendo sete níveis abaixo de 800 hPa) e usando projeção mercator normal. São realizadas simulações sazonais usando os esquemas de convecção de Grell e MIT - Emanuel para distintos períodos sazonais (especialmente o período chuvoso da Amazônia oriental). As simulações sazonais têm sido iniciadas no início de períodos do ano, por exemplo, em 01 de janeiro e finalizadas em 30 de junho, considerando o tempo de <i>spin-up</i> o primeiro mês da integração. As rodadas são realizadas e atualizadas (<i>updated</i>) a cada seis horas com as condições iniciais e de contorno da reanálise NCEP/NCAR e usando os dados mensais observados de TSM.</p>
	<p>Inauguração oficial do NHMET/IEPA em 09 de setembro de 2009.</p>	<p>Aprovação do Projeto Sudam – Estudo da bacia do rio Jari.</p>	<p>Um dos maiores desafios do NHMET/IEPA tem sido a consolidação definitiva do seu quadro técnico. O Governo do Estado do Amapá comprometeu-se desde 2006 a realizar concurso para contratação de quadros permanentes para a continuação das atividades operacionais e de pesquisa. A manutenção de bolsistas nos Núcleos Estaduais emergentes é uma ótima opção para iniciar seus procedimentos operacionais. Contudo, tornam-se insustentáveis para se manter no longo prazo. Além disso, a alta rotatividade de pesquisadores acarreta descontinuidades e a formação de lacunas de atividades nos Núcleos, principalmente porque são normalmente de curto prazo. E, no momento em que estão mais capacitados, retiram-se para ocupar cargos mais elevados ou simplesmente para seguir carreira (mestrado ou doutorado em outros Estados mais desenvolvidos).</p>
	<p>Início do Projeto SUDAM na bacia do rio Jari (AP)</p>	<p>Discussão sobre a sustentabilidade técnico-financeira do NHMET/IEPA no futuro – O papel do Comitê Gestor da REMETAP.</p>	<p>A despeito de todo o desenvolvimento alcançado na implantação do Núcleo, acreditamos que a ausência de quadros efetivos, discutida com veemência na última reunião climática (Versão XXIII no final de outubro de 2009), tem sido recorrentemente apontada como o principal entrave ao desenvolvimento e manutenção do NHMET/IEPA no futuro. Torna-se urgente e estratégico que esses quadros sejam contratados por concurso e consolidados. As principais razões desta urgência são: a) continuidade das atividades, b) capacitação continuada das equipes técnicas e administrativas, c) aperfeiçoamento das realizações técnicas na área de instrumentação, informática, meteorologia, recursos hídricos, engenharia e oceanografia, no curto, médio e longo prazos.</p>
	<p>XXIII Reunião Climática do Estado do Amapá (última reunião na versão REMETAP)</p>	<p>Discussão sobre a sustentabilidade técnico-financeira do NHMET/IEPA no futuro – O papel do Comitê Gestor da REMETAP.</p>	<p>A despeito de todo o desenvolvimento alcançado na implantação do Núcleo, acreditamos que a ausência de quadros efetivos, discutida com veemência na última reunião climática (Versão XXIII no final de outubro de 2009), tem sido recorrentemente apontada como o principal entrave ao desenvolvimento e manutenção do NHMET/IEPA no futuro. Torna-se urgente e estratégico que esses quadros sejam contratados por concurso e consolidados. As principais razões desta urgência são: a) continuidade das atividades, b) capacitação continuada das equipes técnicas e administrativas, c) aperfeiçoamento das realizações técnicas na área de instrumentação, informática, meteorologia, recursos hídricos, engenharia e oceanografia, no curto, médio e longo prazos.</p>

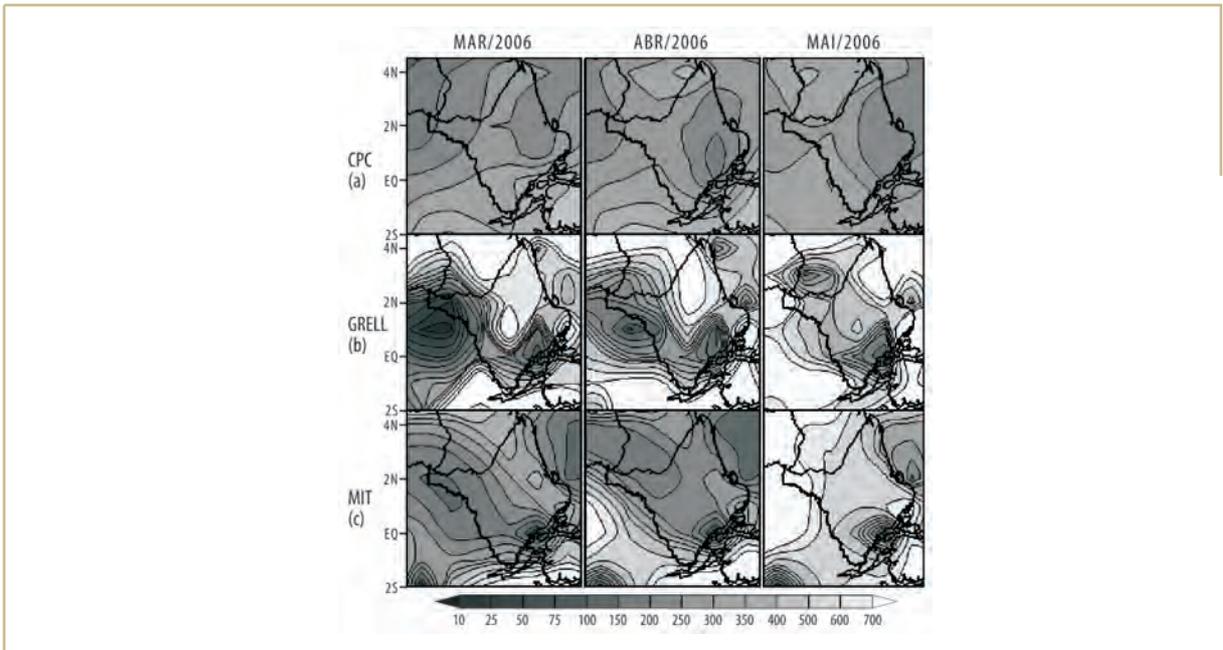
Fonte: Adaptado de Cunha (2007).

### 3.1. A Rede REMETAP: produtos e serviços atuais

Abaixo são relacionados alguns dos principais avanços implementados pela REMETAP, em especial à consolidação do NHMET/IEPA no Estado do Amapá. O Projeto REMETAP tem proporcionado uma imensa capilaridade em dispor produtos e serviços do setor de meteorologia e recursos hídricos. Alguns destes podem ser observados nas **Figuras 1, 2 e 3**. A **Figura 1** indica dois mapas de saídas do modelo numérico BRAMS (Brazilian Regional Atmospheric Modeling System) em operação no NHMET/IEPA. A **Figura 2** mostra uma saída do Modelo Climático Regional (RegCM3) para estudos climáticos no Estado do Amapá, no qual são comparados dados observados (séries históricas das estações e outras fontes como os dados de satélites), com saídas do modelo para dois tipos de parametrização convectiva (formação de chuvas) do modelo RegCM3: Grell e MIT.

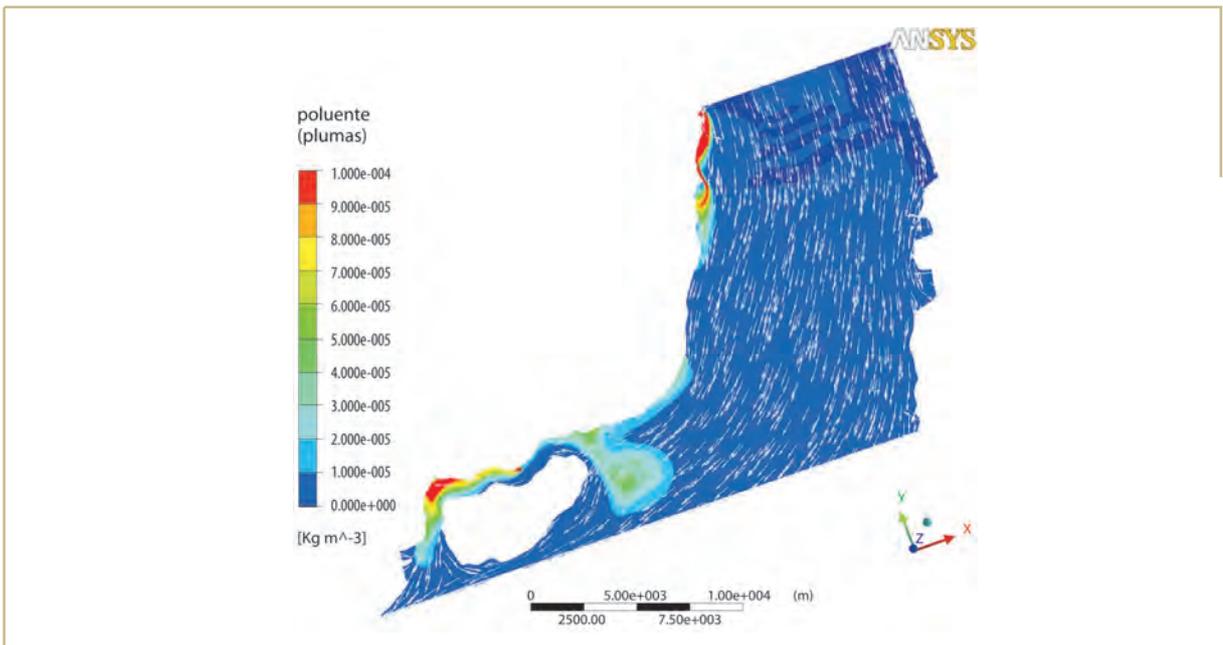


**Figura 1.** Saídas com alta resolução espacial do BRAMS-AP: temperatura do ar (esquerda) e precipitação e vento (direita): principais produtos e serviços do REMETAP no NHMET/IEPA.



**Figura 2.** Dados de precipitação observados pelo CPC e simulados com o RegCM3 utilizando o esquema de Grell e MIT sobre o Estado do Amapá para o ano de 2006: (a) março, (b) abril, (c) maio.

A **Figura 3** mostra o campo de escoamento hidrodinâmico (vetores) e o campo de um escalar (plumas dispersas de poluentes na água a partir de fontes de poluição urbana) em Macapá, Porto de Santana e Santana, ao longo da orla contígua no rio Amazonas.



**Figura 3.** Recursos hídricos e as cidades: modelagem hidrodinâmica e avaliação de dispersão de poluentes próximos à captação de água na orla de Macapá e Santana. (PINHEIRO *et al.*, 2008).

Note que a última análise está relacionada aos efeitos de marés (refluxo da água) que aumentam a complexidade dos estudos relacionados aos problemas de saneamento ambiental e captação de água de abastecimento.

#### 4. CONCLUSÕES

A principal conclusão deste capítulo é que o Projeto REMETAP permitiu a inserção do Estado do Amapá no contexto nacional dos desafios e perspectivas da meteorologia e recursos hídricos na Amazônia. Apesar do Amapá não apresentar as características que expressassem *know-how* ou tradição na área de meteorologia e recursos hídricos, muito menos recursos humanos suficientes para tamanho enfrentamento operacional, os avanços na área foram significativos.

A despeito desses grandes desafios, o que se buscou superar (na prática) com a criação dos Núcleos Estaduais no Brasil, foi proporcionar às sociedades locais as melhores ferramentas e técnicas que permitissem a implantação e o desenvolvimento de Núcleos que possibilitassem atingir metas regionais importantes, tais como:

- 1) Estender o prazo das previsões de tempo de apenas três dias para seis dias ou mais;
- 2) Melhorar a precisão das previsões e a qualidade das tomadas de decisão, de sorte que fosse possível a emissão de avisos e alertas em tempo hábil às populações afetadas por eventos extremos e, assim, evitar problemas graves decorrentes deles;
- 3) Avaliar o nível de acertos e erros das previsões de tempo e do clima, assim como avançar na compreensão sobre a lógica das influências de sistemas de grande escala (global) na inicialização ou provocação de eventos do tempo e do clima em nível regional ou local;
- 4) Dinamizar a eficácia das ferramentas de previsão na tomada de decisões (modelos numéricos, por exemplo);
- 5) Operar em meteorologia para produzir previsões que levem à redução e mitigação de desastres naturais ou causados pelo homem.

O processo de implantação do NHMET/IEPA impulsionado pela REMETAP e outros projetos correlacionados apresentou quatro etapas importantes: início, evolução, consolidação e finalização. As quatro etapas apresentaram características distintas em função da sua particular dinâmica evolutiva histórica, com maior evolução para as fases de consolidação e finalização (maior número de resultados:

serviços e produtos). Os saltos representativos, tanto em termos qualitativos quanto em termos quantitativos de serviços e produtos gerados tanto pela pesquisa quanto pela operação de previsão de tempo e estudos climáticos, caracterizam o NHMET/IEPA como um núcleo de meteorologia e recursos hídricos emergente da Amazônia. Contudo, para que se mantenham os atuais níveis de desenvolvimento, faz-se necessário um contínuo investimento na manutenção e modernização do NHMET/IEPA, principalmente quanto à atração e fixação de recursos humanos técnicos em nível de mestrado e doutorado.

A despeito dos imensos avanços técnicos, científicos, operacionais e administrativos do NHMET/IEPA, há ainda ameaças circunstanciais à sua plena operação que não são desprezíveis. Essas ameaças, caso venham a se consolidar, podem implicar em retrocessos iminentes, como a evasão de pesquisadores, o enfraquecimento da capacidade de atração e fixação de mestres e doutores (atualmente já bastante complexa) e as dificuldades na manutenção e operação das estruturas e equipamentos adquiridos no Projeto REMETAP (além de outros projetos, como o AERBOM, SUDAM, REMAM), em especial materiais de informática e PCDs instaladas em diversos locais do Estado do Amapá. Estas últimas necessitarão de contínua manutenção preventiva e corretiva ao longo de seu ciclo de vida operacional.

Além disso, no longo prazo, há dificuldades quanto a manutenção atual de recursos humanos qualificados do Núcleo, tais como bolsistas de diversos níveis (IC, DTI, DCR etc). A razão é que os mesmos projetos que proporcionam a manutenção e execução das atividades de pesquisa e operação são também bastante limitados e, como consequência, as bolsas que mantêm esses pesquisadores. Uma das soluções de longo prazo seria definir uma política estadual de atração e fixação de recursos humanos no Estado do Amapá, pois este apresenta uma desvantagem geográfica e financeira que dificulta a atração de recursos humanos da área para fomentar novos projetos que viabilizem estratégias de funcionamento do Núcleo no futuro. De modo que os ciclos de vida das etapas evolutivas do Núcleo não sejam constantemente interrompidas por falta de pesquisadores.

Em resumo, a importância deste capítulo é dar a oportunidade, ao leitor interessado no assunto, de reconhecer o grande esforço multi-institucional para a implantação do NHMET/IEPA, o qual teve como origem o antigo PMTCRH/CPTEC/INPE. Assim, os frutos deste trabalho podem se tornar duradouros e definitivos no Estado do Amapá. Para isso, é preciso que sejam mantidas as melhores práticas de atividades que permitam a continuação evolutiva do seu processo histórico de desenvolvimento.

Como será visto nos capítulos seguintes, é possível afirmar que a REMETAP foi e tem sido a grande divisora de águas que mudou, definitivamente, a capacidade, a aparência e a eficiência científica e operacional do setor de meteorologia no Amapá, bastando apenas observar os demais resultados divulgados nas páginas seguintes.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do REMETAP (CNPq/FINEP), RPCH/FINEP-CNPq, REMAM/FINEP-CNPq e SETEC-AP, aos pesquisadores e bolsistas do (NHMET/IEPA) e a todos os parceiros institucionais e membros ativos da REMETAP – EMBRAPA-AP, SEMA-AP, DC-AP, FIEAP/IEL-AP.

## 6. REFERÊNCIAS

CUNHA, A.C. *Implantação do Centro Tecnológico de Hidrometeorologia do Estado do Amapá (CTHEA)*. CPAQ/IEPA. Dossiê Técnico, versão 26, jan., 2005. 91 p .

CUNHA, A. C. Rede Amapaense de Meteorologia e Recursos Hídricos (REMETAP) e a Consolidação do Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis do Estado do Amapá (NHMET/IEPA). *Boletim SBMET*, v.31, n. 2-3, ago-dez, 2007. p. 20-28.

DOE – Diário Oficial do Estado do Amapá. Número 4160, sobre a Nova Estrutura do IEPA (NHMET), Cap III, Art.3º, p 61-63, Quarta-Feira. Circulação 15.01.08. Macapá, 02/01/2008.

NOBRE, P. Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hídricos (PMTCRH) do MCT e Estados Brasileiros. *Boletim da SBMET*, V.29, jul/2005. p.43-45.

NHMET/IEPA. . *Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis do Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Amapá (IEPA)*. Boletins Semanais de Previsão do Tempo/Boletins Climáticos Mensais. Site <[www.iepa.ap.gov.br/meteorologia](http://www.iepa.ap.gov.br/meteorologia)>. Acessado em 30/06/2008.

PINHEIRO, L. A R., CUNHA, A. C. e BRITO, D. C. *Desenvolvimento de modelos numéricos aplicados à dispersão de poluentes na água sob influência de marés próximas de Macapá e Santana-AP*. Projeto de Pesquisa – Iniciação Científica/SETEC-IEPA. I Relatório Parcial, junho, 2008. 52 p.

SETEC (Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia). *O Ofício 842/ GAB/ SETEC, de 27 de setembro de 2001*. Assunto: Compromisso de Institucionalização da Criação do Núcleo Estadual de Meteorologia e Recursos Hídricos no Amapá. Enviado ao MCT em 27 de setembro de 2001.

## Manutenção e Expansão da Rede de Estações Hidrometeorológicas Automáticas (PCDs) no Amapá

**Msc. Met. Edmir dos Santos Jesus**

edmir.jesus@iepa.ap.gov.br

Meteorologista e Coordenador do NHMET/IEPA.

Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis (NHMET).

**Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha**

alancunha@unifap.br

Ex-coordenador do NHMET/IEPA, coordenador do Projeto REMETAP, Prof. do curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e dos Programas de Pós-Graduação PPGBio/PPGDAPP-UNIFAP.

**Dr. Eng. Alaan Ubaia Brito**

alaan.brito@eletronorte.gov.br

Eng. de Operações Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A.

Meteorologista e bolsista CNPq/MCT do NHMET/IEPA.

**Bal. Físico, Derivan Dutra Marques**

derivan.marques@iepa.ap.gov.br

Bolsista DTI – Projeto SUDAM/JARI.

**Msc. Met. Naurinete Jesus da Costa Barreto**

naurinete.barreto@iepa.ap.gov.br

Bolsista DTI/MCT/CNPq – Meteorologista do NHMET/IEPA.

**Dr. Antônio Carlos Lola da Costa**

lola@ufpa.br

Prof. Associado da Faculdade de Meteorologia da UFPA.

**Resumo.** Neste trabalho é analisada a experiência do Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis (NHMET/IEPA) no uso de estações automáticas para coleta e transmissão de dados hidrometeorológicos. O texto trata também das etapas de modernização da rede de observação de superfície e de alguns procedimentos de instalação de estações automáticas com teletransmissão de dados (PCDs). As principais etapas de expansão das PCDs foram divididas da seguinte forma: inserção em estruturas de um sistema telemétrico que torna possível otimizar a rede existente (CPTEC/INPE, INMET, NHMET/IEPA); aumento do número de informações hidrometeorológicas por período de análise; melhoria da qualidade dos dados; e disponibilização de dados em tempo “quase real” à sociedade e aos usuários em geral, com o objetivo de alimentar modelos de previsão de tempo em uso operacional no Estado do Amapá. A metodologia apresentada é basicamente descritiva e se divide em dois tópicos principais: a) distribuição das estações meteorológicas automáticas instaladas no Estado do Amapá; b) importância da manutenção da rede de monitoramento para estudo e análise das condições hidrometeorológicas observadas em vários municípios da região. A principal análise do estudo foi focada no detalhamento dos sistemas de aquisição, armazenamento e transmissão de dados hidrometeorológicos, considerando a necessidade de um melhor planejamento e modernização da rede, mormente concernentes à manutenção, operação e disponibilização das informações hidrometeorológicas. A principal conclusão é que a modernização da rede estadual de observação é uma das consequências da parceria entre o Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT-FINEP/CNPq), em convênio com o Estado do Amapá (PROJETO REMETAP – NHMET/IEPA), cuja visão final é integrar a rede de observação do Amapá ao restante do país, possibilitando estudos e análises mais avançadas sobre a previsão de tempo, clima e recursos hídricos.

**Palavras chave:** PCDs, instalação, operação, manutenção, telemetria, dados hidrometeorológicos, observação.

## 1. INTRODUÇÃO

O Estado do Amapá, situado no extremo norte do país, detém uma superfície territorial de 140.276km<sup>2</sup>, que corresponde a 1,6% do território brasileiro e a 3,6% da Região Norte. Faz fronteira com o Estado do Pará e os países Suriname e Guiana Francesa, apresentando-se como um Estado relativamente pequeno quando comparado com os demais da Amazônia. Além disso, concentra uma das maiores diversidades em ambientes naturais, já que faz parte de dois grandes domínios geográficos: o Amazônico e o Oceânico, o que lhe atribui características muito particulares quanto à formação e estruturação de seus ambientes naturais (JESUS *et al.*, 2000).

O Estado do Amapá, representado pelo IEPA e por meio do Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis – NHMET, tem buscado apoio técnico junto a outras instituições de pesquisa e tecnologia como o CPTEC/INPE, o INMET, o SIPAM, a UFPA, entre outros. O resultado desta integração com outras instituições técnicas e financeiras (FINEP/CNPq-REMETAP) tem permitido a estruturação e o desenvolvimento de uma rede de observação representada pelas Plataformas Automáticas de Coleta de Dados (PCDs) em diversas regiões do Estado do Amapá (CUNHA, 2007).

Atualmente, o Estado possui uma rede física constituída de PCDs com três tipologias funcionais: hidrológica, meteorológica e agrometeorológica. Contudo, as PCDs não estão geográfica e homogeneamente distribuídas, concentrando-se em áreas de desenvolvimento econômico ou nas principais capitais municipais, como Macapá, Santana, Serra do Navio, Oiapoque, Porto Grande, Ferreira Gomes, Tartarugalzinho, Laranjal do Jari, Mazagão e distrito de Pacuí (Macapá).

Diante da tendência mundial de modernização da coleta dos dados, as Estações Meteorológicas Convencionais (EMC), com sua longa série de dados, estão sendo substituídas por Estações Meteorológicas Automáticas (EMA) (Figura 1). A principal finalidade das PCDs é a facilidade de obtenção de dados em tempo quase real de transmissão sem a intervenção humana, permitindo a efetivação do monitoramento do tempo e a tomada de decisões nas mais diversas atividades humanas, seja em nível local ou nacional.



**Figura 1.** PCD hidrológica NHMET/IEPA instalada em 2008 pelo Projeto REMETAP no rio Matapi, Santana.

Uma PCD pode servir para diferentes propósitos, desde mensurações simples de precipitação, temperatura e umidade do ar até medidas de fluxo de carbono, radiação solar, entre outras. Efetuam registros e emitem via satélite (telemetria) em tempo quase real nas 24 horas do dia. Em todo o Amapá contabiliza-se a cobertura de 16 PCDs (Figura 1) incluindo as meteorológicas, as hidrometeorológicas e as agrometeorológicas.

Atualmente, a principal estação climatológica convencional está localizada no município de Macapá, mantida pela rede do INMET, com uma série de dados meteorológicos de 40 anos. Entretanto, em outras localidades do Estado não se conta com uma série tão longa de dados meteorológicos, tratando-se de uma deficiência a ser superada no futuro.

Um dos objetivos de dispor de uma base de dados observacional no Projeto REMETAP é avaliar resultados de simulações geradas por modelos de previsão do tempo (BRAMS, WRF e ETA) e climático regional (RegCM3).

Segundo Souza *et al.* (2009), a base de dados do projeto RPCH do Pará tem sido utilizada para integrar um conjunto de dados contendo o máximo possível de medições de precipitação registradas pelas estações meteorológicas espalhadas sobre a Amazônia Oriental (PCDs ou convencionais). Contudo, procedimentos de controle de qualidade dos dados devem ser aplicados para checar e verificar a presença de inconsistências ou ausências. Nestes casos, sempre se selecionam estações contendo menos do que 5% de dados ausentes. Essas eventuais falhas são normalmente preenchidas por interpolação de dados das estações vizinhas. Nos estudos de Souza *et al.* (2009) foram selecionadas 150

estações pluviométricas para a Amazônia Oriental, com observações mensais ininterruptas entre 1978 e 2008. O objetivo do NHMET/IEPA, com o apoio inicial da REMETAP, é formar uma base de dados para o Estado do Amapá semelhante à implementada pela Rede Paraense de Clima e Recursos Hídricos, desenvolvidas por Souza *et al.* (2009).

## 2. METODOLOGIA

Neste estudo são apresentadas algumas das estações automáticas instaladas em distintas localidades do Estado do Amapá que, por meio de cooperação institucional, convênios e projetos aprovados pelo NHMET/IEPA (REMETAP, AERBOM, SUDAM etc.) nos últimos cinco anos têm mostrado o crescimento na rede de monitoramento de tempo, clima e recursos hídricos. O Projeto AERBOM financiado pelo FINEP, *Desenvolvimento de um Aerogerador e Otimização de seu Acoplamento à Motobombas Convencionais por meio de Inversores de Frequências*, também contemplou a instalação de mais uma PCD utilizada para monitorar um protótipo de turbina eólica no município de Itauba do Piririm.

Uma das principais utilidades da PCD nesses casos, segundo Farias *et al.* (2008) e Rodrigues *et al.* (1999), é que o desempenho dos sistemas de energia elétrica é bastante suscetível a variações no clima e muito vulnerável aos eventos extremos de chuva. Por exemplo, o Projeto SUDAM (NHMET/IEPA) é um projeto de pesquisa e desenvolvimento voltado para o monitoramento mais efetivo da bacia do rio Jari, cujo título é *Rede de Gestão Integrada de Monitoramento da Dinâmica Hidroclimática e Ambiental do Estado do Amapá*, e pode ser considerado uma extensão específica do REMETAP. No projeto SUDAM também será contemplada uma PCD hidrológica que deverá ser instalada em 2010 como apoio à gestão e à defesa civil do Estado e do município de Laranjal do Jari. Seu objetivo principal será monitorar o nível do rio Jari (variabilidade hidrológica) e apoiar tomada de decisão antes que se alcancem níveis críticos causados por enchentes severas na região, além de apoiar estudos relacionados ao meio ambiente e recursos hídricos de amplo espectro, como saneamento, geração de energia, processos de sedimentação etc.

Na capital do Estado é mantida a estação climatológica convencional do INMET com registro de dados nos últimos 40 anos cujos parâmetros são: temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), direção (graus) e velocidade (m/s) do vento, evaporação de água (mm), precipitação pluviométrica (mm), radiação solar (MJ/m<sup>2</sup>d), insolação (horas) e evapotranspiração (mm). As PCDs contemplam vários tipos de sensores que monitoram variáveis hidrometeorológicas, como pode ser observado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Principais sensores das PCDs hidrológicas, meteorológicas e agrometeorológicas.

N.º	Sensor	Parâmetro	Unidade
	Ultrassônico de vento	Velocidade do vento Direção do vento	m/s °NV
	Temperatura e umidade relativa do ar	Temperatura do ar	°C
		Umidade relativa do ar	%
	Sensor de radiação solar global	Radiação solar global	MJ/m <sup>2</sup>
	Precipitação ou pluviômetro	Precipitação (chuva)	mm
	Radiação total líquida	Radiação total líquida	W/m <sup>2</sup>
	Temperatura do solo*	Temperatura do solo a 10 e 20 cm	°C
	Teor de umidade do solo*	Percentual (vol. água/vol. solo)	%
	Fluxo de calor no solo*	Fluxo de calor no solo	W/m <sup>2</sup>
	Nível de régua (cota do rio) **	Nível	m

\* Parâmetros coletados por PCDs agrometeorológicas (tanto temperatura do solo quanto teor de umidade do solo podem ser quantificados em até três níveis – Macapá e Pacuí).

\*\* Parâmetros coletados por PCDs hidrológicas.

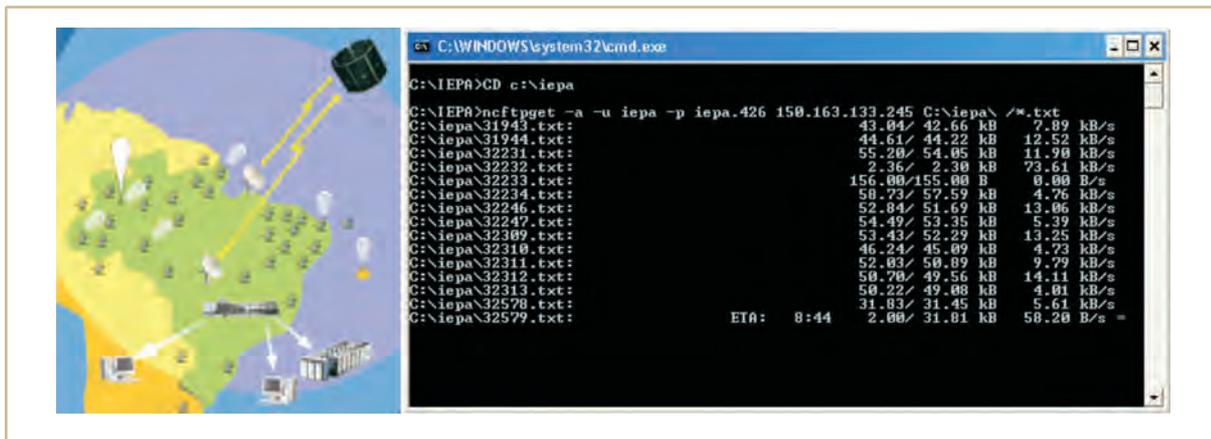
Fonte: CPTEC-INPE, 2009/NHMET-IEPA/2009.

O mecanismo de funcionamento do sistema telemétrico das PCDs pode ser explicado a partir da Figura 2a e 2b. Inicialmente, a PCD envia as informações (dados armazenados nos *data loggers*) via satélite para a antena de recepção em Alcântara (MA) ou Cuiabá (MT), os quais tornam-se disponíveis na Internet dirigida a uma central localizada no CPTEC/INPE. A partir do *site* do CPTEC/INPE, qualquer estação pertencente a rede de monitoramento ambiental no País estará divulgando *on line* os dados registrados pelas estações. No NHMET/IEPA há um *link* entre os dois centros.

A transmissão dos dados ao CPTEC/INPE em Cachoeira Paulista (SP) é também disponibilizada, além da Internet, a partir de contas exclusivas FTP<sup>1</sup> para os usuários. Assim que chegam ao CPTEC/INPE, os dados registrados são armazenados em um banco de dados no qual é realizada sua filtragem e tratamento. Esse procedimento ocorre para cada estação automática individualmente (Figura 2a). As PCDs emitem sinais aos satélites diariamente em valores acumulados a cada três horas. Contudo, a tendência é que essa frequência se torne horária.

O sistema apresentado na Figura 2b utiliza um meio de comunicação denominado Sistema de Coleta de Dados (SCD) pertencente a rede de satélites SCD1, SCD2 e CBERS2. Outra maneira de obter os dados enviados pelas estações é utilizando o programa NCFTP versão 3.1.8, distribuído gratuitamente pelo CPTEC. A Figura 2b apresenta a tela do programa NCFTP 3.1.8 sendo executado na aquisição dos dados das estações automáticas de coleta de dados para os núcleos estaduais como o NHMET/IEPA.

<sup>1</sup> File Transfer Protocol (Protocolo de Transferência de Arquivos).

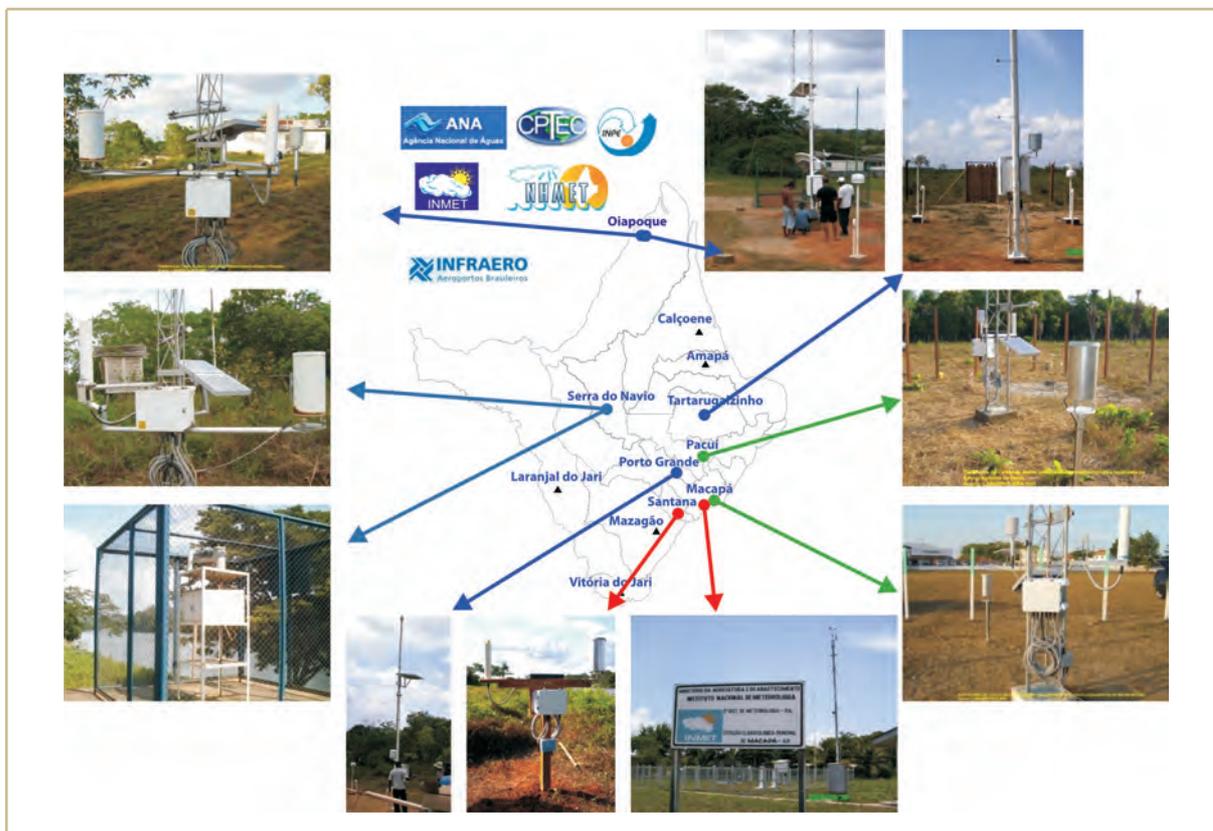


**Figura 2.** a) Sistema Brasileiro de Coleta de Dados, mostrando os círculos de visibilidade das estações de Cuiabá (MT), Alcântara (MA) e em Cachoeira Paulista (SP); b) Ambiente do programa NCFTP, executando download dos arquivos em formato TXT. Fonte: CPTEC/INPE 2008 e NHMET/IEPA 2009.

### 3. RESULTADOS

Como pode ser observado, a aquisição dos dados coletados pelas PCDs são de grande utilidade. Os centros nacionais e núcleos operacionais estaduais os utilizam sistematicamente, tais como: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a Agência Nacional de Águas (ANA), o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO), o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e o NHMET/IEPA, além de outros núcleos de pesquisa, como o RPCH do Pará.

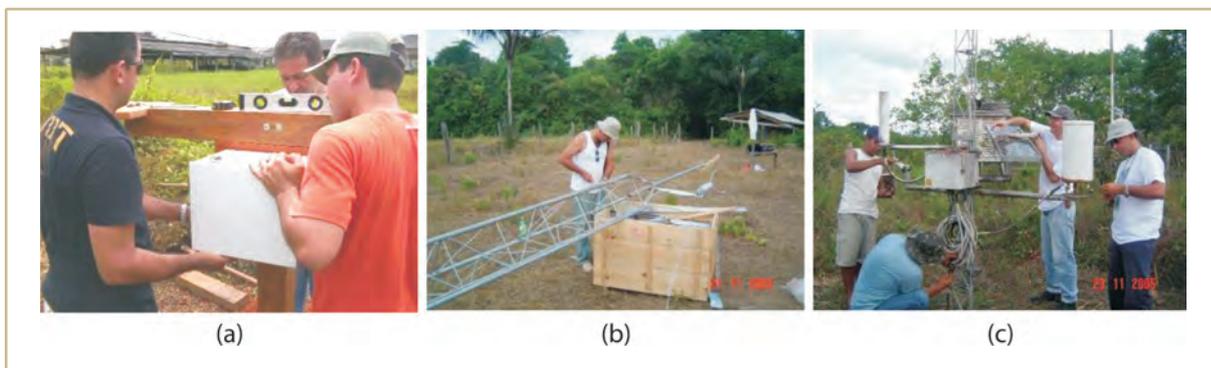
Na Figura 3 são destacadas as principais PCDs instaladas no Amapá e que são mantidas sob vigilância de diversos órgãos federais, estaduais ou municipais.



**Figura 3.** Localização das principais estações automáticas no Estado. No sentido horário da figura: a) Oiapoque, b) Tartarugalzinho, c) Pacuí, d) Macapá, e) Fazendinha, f) Santana, g) Amapari, h) Serra do Navio. Fonte: [www.iepa.ap.gov.br/meteorologia](http://www.iepa.ap.gov.br/meteorologia)

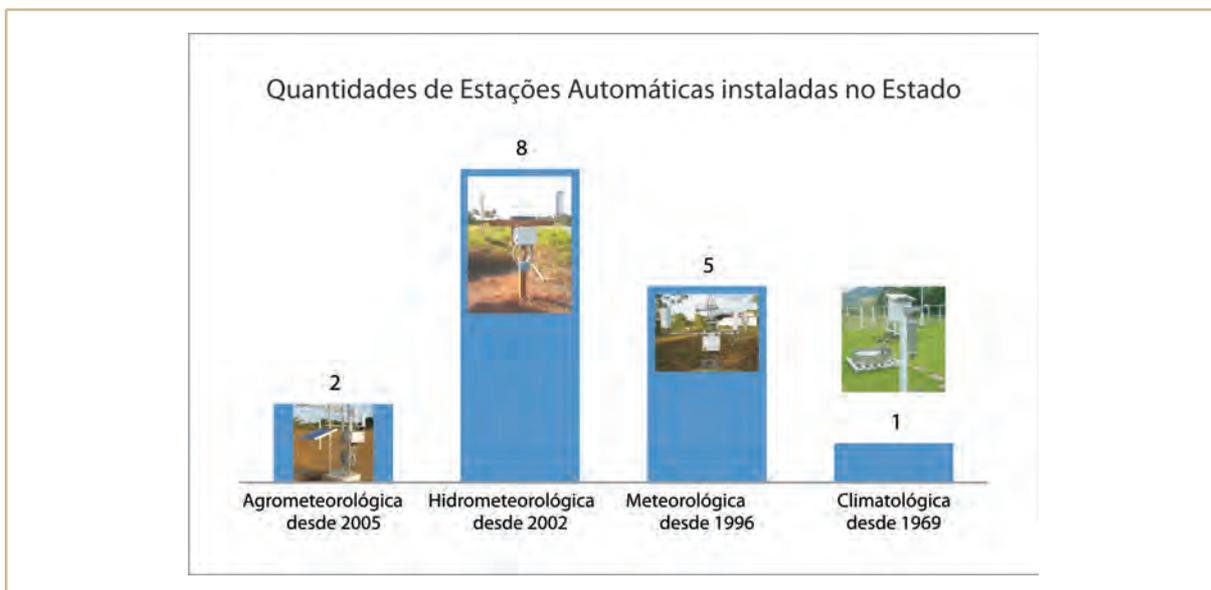
Cabe salientar que na região nordeste do Estado não há PCDs (como em Calçoene, por exemplo, a região com o maior índice pluviométrico do Brasil). Contudo, em uma recente operação da REMETAP a segunda PCD do Oiapoque foi retirada deste município e reinstalada em área próxima de Calçoene. Nas localidades de Carnot, Amapá, Estirão do Cricou e Tartarugal Grande há apenas postos pluviométricos convencionais mantidos pela ANA, mas não possuem transmissão telemétrica automática.

Uma das vantagens do projeto REMETAP tem sido o irrestrito apoio à aquisição, instalação e manutenção de PCDs (Figura 4a e 4b). Neste caso, houve um esforço sistemático para manter em operação as antigas PCDs (Figura 4c). Nas fases contínuas de manutenção, o NHMET/IEPA tem recebido vários técnicos do INPE e INMET no Estado que, em conjunto e com apoio logístico da equipe técnica do NHMET, realizaram diversas atividades de instalações, manutenções e capacitações, visando manter os equipamentos em plena operação.



**Figura 4.** Instalação de uma PCD às margens do rio Matapi (a); Escola Agrícola do Pacuí (b) e manutenção em Serra do Navio (c). Fonte: NHMET (2008)

A Figura 5 mostra o levantamento quantitativo de estações adquiridas, instaladas e em operação no Estado desde o ano de 1969, incluindo a estação climatológica convencional mantida pelo INMET, no Distrito da Fazendinha, em Macapá.



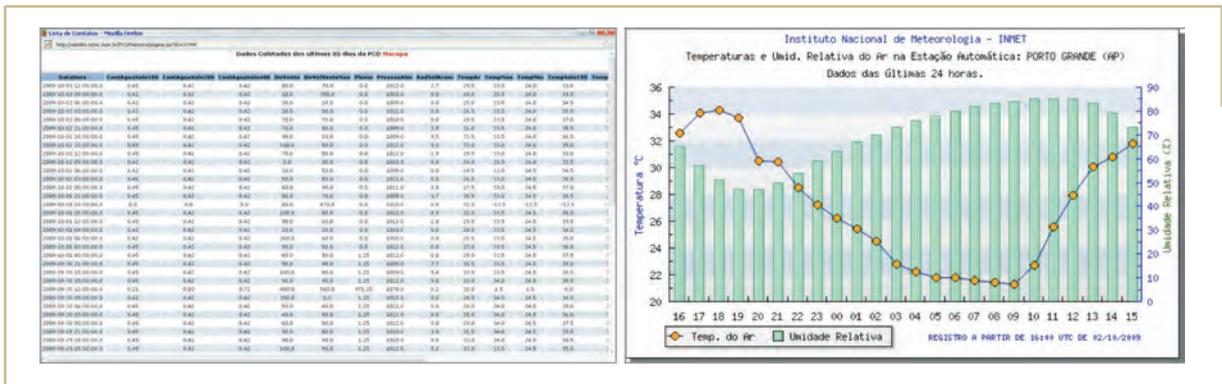
**Figura 5.** Distribuição das Estações Automáticas instaladas no Estado do Amapá. Fonte: NHMET (2008).

O monitoramento de variáveis hidrometeorológicas tem dado suporte sistemático à previsão do tempo (curto prazo) e conseqüentemente aos prognósticos climáticos mensais (médio e longo prazos) realizados pelo NHMET/IEPA. A Figura 6 mostra os sites do CPTEC e INMET mantidos para disponibilizar informações da rede nacional de PCDs.



**Figura 6.** Portais de aquisição dos dados ambientais enviados via satélite disponíveis na Internet. Fonte: www.cptec.inpe.br e www.inmet.gov.br

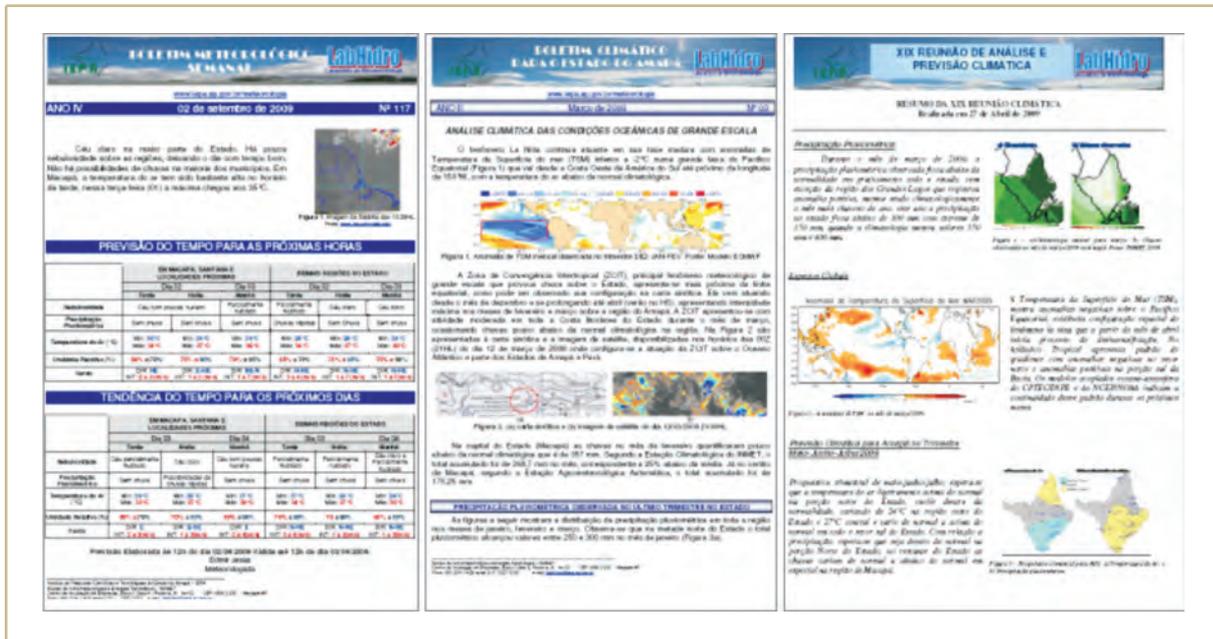
A Figura 7 indica as tabelas e gráficos nos quais são registradas as variáveis em horários cíclicos a cada três horas. A densidade de estações ainda é insuficiente no Estado do Amapá quando comparada aos outros Estados brasileiros. A REMETAP e o NHMET/IEPA têm como objetivo principal elevar o atual patamar de números de PCDs.



**Figura 7.** Registro dos dados coletados pelas estações automáticas com as respectivas variáveis de campo. Fonte: CPTEC/INPE – INMET

A Figura 8 mostra alguns dos produtos gerados pelo NHMET/IEPA com base nos dados registrados pelas PCDs espalhadas no Estado. Entre os mais importantes, o boletim de previsão do tempo é gerado diariamente, informando não somente a previsão para os dias seguintes, como os dados observados pelas PCDs: temperatura máxima do ar, umidade relativa e precipitação pluviométrica. Além do uso em boletins do tempo, os dados registrados pelas PCDs têm sido utilizados em laudos técnicos oriundos de eventos críticos do tempo e clima. Dentre os mais relevantes encontram-se aqueles relacionados com os efeitos negativos de enchentes, temperatura média elevada ao longo do dia, rajadas de vento e

sensação térmica. Os órgãos e empresas públicas e privadas que mais utilizam esses dados são: Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), Defesa Civil do Estado, Polícia Técnica, empresas de consultoria ambiental, secretarias de Infraestrutura, Agricultura e Economia e Economia e financiamento, setor de geração de energia elétrica, entre outros usuários, inclusive de outros Estados.



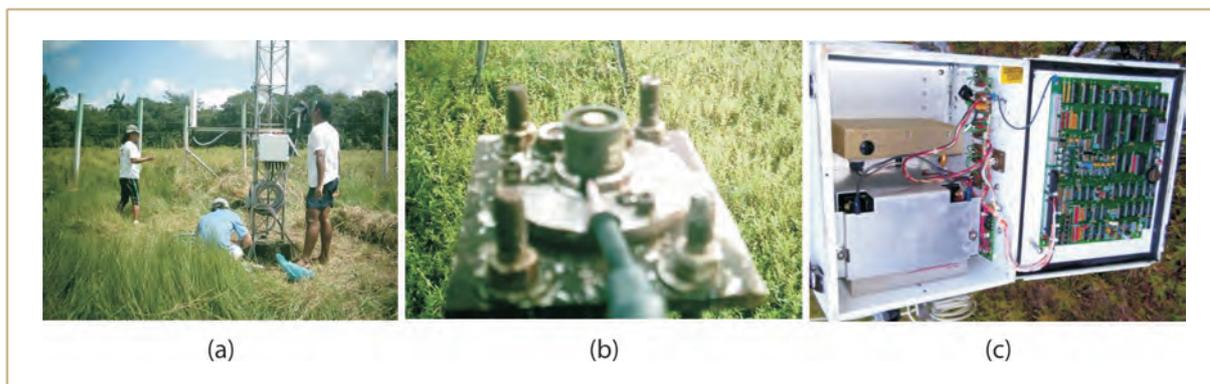
**Figura 8.** Boletins de previsão do tempo e clima gerados no NHMET com base nos dados registrados das principais estações automáticas. Fonte: [www.iepa.ap.gov.br/meteorologia](http://www.iepa.ap.gov.br/meteorologia)

Por outro lado, durante a confecção do boletim climático são realizadas várias análises sobre o padrão de grande escala na busca de informações sobre o comportamento da temperatura do ar e da superfície do mar (TSM), correntes de vento, chuvas etc. A partir destas variáveis é efetivado um prognóstico climático mensal para todo o Estado do Amapá, destacando o comportamento das variáveis nas principais regiões ou municípios.

Contudo, apesar de todo avanço operacional em campo, percebe-se a necessidade contínua de manutenção preventiva e/ou corretiva da rede de observação (PCDs) no Estado do Amapá. Esses procedimentos são componentes fundamentais para elevar o tempo de vida útil das estações, até porque apresentam custos elevadíssimos. Dentre os procedimentos de manutenção mais importantes encontram-se aqueles relacionados à limpeza, em que ocorre a verificação e retificação dos sensores, das conexões dos cabos e avaliação de segurança local onde estão instaladas.

Manutenções preventivas são recomendadas uma vez ao ano. Quando ocorre a necessidade de manutenções corretivas (devido a defeitos do equipamento), tem sido solicitado apoio ao CPTEC/INPE para realizá-las (devido à complexidade instrumental dos equipamentos), o que aumenta sobremaneira os custos de logística e de reposição de peças ou sensores. A Figura 9 indica algumas das operações de

manutenção das estações que ocorreram durante períodos distintos em 2006 e 2008 em Pacuí e Serra do Navio (Fotografias a e b) e Oiapoque (Fotografia c).



**Figura 9.** Manutenção em PCD do Pacuí (a); sensor de radiação solar global, PCD em Serra do Navio (b) e *data logger* da PCD do Oiapoque (c). Fonte: NHMET (2008)

Em julho de 2007 constatou-se que a estação de Serra do Navio havia saído de operação devido a um defeito. Na manutenção, realizada em junho de 2008, verificou-se que os sensores haviam sido danificados pela ação do tempo. Deste modo não foi possível realizar a atualização da série histórica do ano de 2007. Na mesma época, esta estação foi recolhida para manutenção no NHMET (realizada com o auxílio da REMETAP) e encaminhada para o laboratório de Instrumentação Meteorológica do LIM-CPTEC/INPE. Ao mesmo passo, a PCD de Oiapoque, que apresentava problemas de transmissão dos dados coletados, foi reparada em junho de 2008. Contudo, voltou a operar normalmente após a manutenção corretiva somente no início de novembro de 2009.

Na Tabela 2 é apresentada a localização geográfica das PCDs (além de uma convencional) distribuídas nos diversos municípios do Estado. A quantidade de estações hidrometeorológicas supera as meteorológicas e essas, por sua vez, superam as agrometeorológicas.

**Tabela 2.** Localização geográfica das estações meteorológicas automáticas no Estado.

*continua*

Localidade	Tipo de Estação	Código	Órgão	Latitude	Longitude	link
Macapá - 34° BIS	Agrometeorológica	31944	CPTEC	0,03	-51,08	<a href="http://www.cptec.inpe.br">www.cptec.inpe.br</a>
Macapá - CBMAP	Meteorológica	-	NHMET	0,03	-51,05	
Macapá - Aeroporto	Meteorológica	82099	INFRAERO	0,03	-51,06	<a href="http://www.redemet.aer.mil.br">www.redemet.aer.mil.br</a>
Macapá - Fazendinha	Climatológica	82098	INMET	-0,05	-51,12	<a href="http://www.inmet.gov.br">www.inmet.gov.br</a>
Macapá - CAESA	Hidrometeorológica	32234	ANA	0,05	-51,5	<a href="http://www.cptec.inpe.br">www.cptec.inpe.br</a>
Pacuí	Agrometeorológica	31943	CPTEC	0,96	-50,86	<a href="http://www.cptec.inpe.br">www.cptec.inpe.br</a>

**Tabela 2.** Localização geográfica das estações meteorológicas automáticas no Estado.

conclusão

Localidade	Tipo de Estação	Código	Órgão	Latitude	Longitude	link
Santana	Hidrometeorológica	31002	CPTEC	0,04	-51,2	<a href="http://www.cptec.inpe.br">www.cptec.inpe.br</a>
Acampamento Bacuri (*)	Hidrometeorológica	32233	ANA	0,44	-51,79	<a href="http://www.cptec.inpe.br">www.cptec.inpe.br</a>
Coaracy Nunes Barragem (*)	Hidrometeorológica	32310	ANA	0,9	-51,27	<a href="http://www.cptec.inpe.br">www.cptec.inpe.br</a>
Coaracy Nunes Jusante	Hidrometeorológica	32309	ANA/CPTEC	0,92	-51,27	<a href="http://www.cptec.inpe.br">www.cptec.inpe.br</a>
Estirão Cricou	Hidrometeorológica	32246	ANA	3,72	-51,92	<a href="http://www.ana.gov.br">www.ana.gov.br</a>
Retiro Santa Isabel	Hidrometeorológica	32247	ANA	3,05	-51,37	<a href="http://www.ana.gov.br">www.ana.gov.br</a>
Iratapuru	Hidrometeorológica	32082	ANA	0,4	-51,75	<a href="http://www.ana.gov.br">www.ana.gov.br</a>
São Francisco	Hidrometeorológica	32231	ANA	0,58	-52,61	<a href="http://www.ana.gov.br">www.ana.gov.br</a>
Tartarugal Grande	Hidrometeorológica	32245	ANA	1,39	-51,06	<a href="http://www.ana.gov.br">www.ana.gov.br</a>
Oiapoque	Meteorológica	32579	CPTEC	3,81	-51,86	<a href="http://www.cptec.inpe.br">www.cptec.inpe.br</a>
Oiapoque	Meteorológica	A0242	INMET	3,81	-51,86	<a href="http://www.inmet.gov.br">www.inmet.gov.br</a>
Tartarugalzinho	Meteorológica	A0243	INMET	0,7	-51,42	<a href="http://www.inmet.gov.br">www.inmet.gov.br</a>
Porto Grande	Meteorológica	A0244	INMET	1,46	-50,91	<a href="http://www.inmet.gov.br">www.inmet.gov.br</a>

É importante observar que a principal diferença entre as tipologias de PCDs deve-se aos tipos e números de sensores que cada uma possui.

#### 4. CONCLUSÃO

A instalação, expansão e manutenção de PCDs tem sido uma das principais condicionantes que permitem o real funcionamento do sistema de previsão de tempo, estudos climáticos e recursos hídricos no Estado do Amapá. A importância da rede de observação de superfície está na capacidade de monitorar diariamente as informações coletadas por essas estações, suprimindo a necessidade crescente dos dados observados, numa perspectiva de melhoria da qualidade da previsão do tempo, do estudo do clima e de recursos hídricos. Esta é uma das metas mais importantes da REMETAP.

Demandas por informações desta natureza são principalmente oriundas dos setores ambientais, científico-tecnológico, produtivo, defesa civil, infraestrutura e em especial a geração de energia elétrica. Somente por estes motivos faz-se necessária a manutenção e a expansão da Rede de Estações Hidrometeorológica no Estado.

Mas ainda é necessário um grande esforço multi-institucional (mantendo-se o formato de rede) para garantir o pleno funcionamento do sistema de observação, tanto federal quanto estadual. Para

tanto, as seguintes etapas necessitam ser consideradas: a) elaboração de novos projetos de pesquisa e desenvolvimento, que proporcionem a expansão e melhoria de todo o sistema estadual de operação de previsão (tempo, clima e recursos hídricos); b) treinamento de equipes para a operação de campo e laboratório (instalação, operação e manutenção preventiva/corretiva de equipamentos); c) política de configuração das PCDs (escolha do satélite para as transmissões telemétricas) para atender as demandas específicas dos usuários locais, além do planejamento e descentralização da operação e manutenção da rede; d) desenvolvimento de sistemas de recepção e análise de informações (outras modalidades, como telefonia celular, rádio, telefone convencional etc; e) disponibilização da informação via Internet no site do NHMET/IEPA.

A importância da disponibilização de informações hidrometeorológicas atualizadas para a sociedade em “tempo quase real”, é também fundamental para alimentar modelos de previsão de tempo. O Estado do Amapá, com sua rede local, contribui também para a formatação da rede nacional de observação, num auxílio recíproco de integração de redes. Com isto, todos os membros integrantes saem ganhando com o sistema.

É importante enfatizar que os sistemas de rede de observação representados pelas PCDs são relativamente mais expansivos economicamente, em especial devido aos custos de aquisição de equipamentos. Por outro lado, este problema é compensado pela economia em termos de custeio de viagem de equipes para operar o sistema convencional em locais remotos, como ocorre na Amazônia.

Com os novos projetos de modernização da rede hidrometeorológica deverá ocorrer a continuação da expansão da rede de observação no Estado do Amapá. Destaque é dado à demanda de empreendimentos hidrelétricos e às futuras implementações e manutenção de estações pluviométricas e fluviométricas relacionadas com esses empreendimentos. Muitas deverão ser telemétricas para se integrarem ao sistema de informações no restante do país. Além disso, projetos como o da SUDAM-NHMET/IEPA, recentemente inicializado, promoverão a instalação de uma PCD hidrológica na bacia do rio Jari. Essa é uma demonstração de que a rede de observação tende a uma contínua expansão. Contudo, provavelmente deverá haver uma tendência de melhoria da distribuição geográfica em áreas menos assistidas por PCDs no Estado. Outro exemplo é a instalação de duas novas PCDs na região sudeste do Estado, mais precisamente em Itaupal do Piririm (relativamente próxima da PCD do Pacuí) e outra na Ilha do Parazinho (Distrito do Bailique), próxima à foz do rio Amazonas, na sua margem esquerda.

A contribuição da REMETAP como agente de desenvolvimento local tem sido oportuna não só pela capilaridade que se apresenta diante da contribuição e apoio a outros projetos (pesquisa, extensão e ensino), mas também no auxílio de condução de políticas públicas do setor. Todo esse esforço conjunto tem incluído o Amapá no contexto da meteorologia da Amazônia, notabilizando-o como um dos Estados emergentes mais ativos nesta área.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro Projeto REMETAP financiado pela FINEP/CNPq e parceiros institucionais (IEPA, IEL-FIEAP, SEMA(AP), DEFESA CIVIL(AP), EMBRAPA(AP), sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS

JESUS, E.S., GONÇALVES, P.H.L, OLIVEIRA, M.C.F. A variabilidade dos elementos meteorológicos associados ao fenômeno El Niño na Cidade de Macapá-AP. X Congresso Brasileiro de Meteorologia. *Anais de congresso*. Rio de Janeiro, 2000.

CUNHA, A. C. Rede Amapaense de Meteorologia e Recursos Hídricos (REMETAP) e a Consolidação do Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis do Estado do Amapá (NHMET/IEPA). *Boletim SBMET*, v.31, n. 2-3, ago-dez, 2007. p 20-28.

FARIAS, W.R.G.; CORREIA, M. F. Descargas atmosféricas e interrupções de energia elétrica na área da CHESF: relação com variáveis atmosféricas em anos de El Niño e La Niña. *Rev. Bras. Meteorol.* v.23, n.3. São Paulo, setembro de 2008.

RODRIGUES *et al.* (1999). Aquisição automática e dados em hidrologia: perspectiva de gestão e informação de recursos hídricos. In: *Estado das Águas no Brasil*. MME/MMA. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas (SIH) – ANEEL, p 213-231. 1999.

SOUZA *et al.* Precipitação sazonal sobre a Amazônia Oriental no período chuvoso: observações e simulações regionais com o RegCM3. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.24, n.2, 2009. p.111-124.

## Análise Comparativa do Desempenho dos Modelos WRF e ETA na Previsão de Chuva para o Município de Macapá (AP)

Lic. Jonathan Castro Amanajás

jonathan.amanajas@hotmail.com

Licenciado em Matemática. Ex-bolsista IC e DTI NHMET/IEPA Projeto REMETAP, mestrando em Meteorologia da UFPB.

Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha

alancunha@unifap.br

Ex-coordenador do NHMET/IEPA, coordenador do Projeto REMETAP, Prof. do curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e PPGBio/PPGDAPP-UNIFAP.

**Resumo.** O objetivo da pesquisa foi quantificar a qualidade das previsões de chuva em Macapá (AP) a partir da análise da saída de dados de dois modelos numéricos em operação no NHMET/IEPA: ETA (desde 2005) e WRF (desde 2007) e, como objetivo específico, comparar seus resultados com informações de estações meteorológicas automáticas (PCDs). O método de comparação entre dados observacionais de precipitação de chuva e de saídas de ambos os modelos numéricos de previsão de tempo foi o Método de Análise de Contingente (MAC), o qual se caracteriza como uma matriz de correspondência de dupla entrada (duas categorias de eventos: sim e não). Os resultados foram obtidos a partir dos seguintes indicadores numéricos propostos pelo MAC: proporção de acertos (PA), Índice Crítico de Sucesso (ICS); Relação de Alarme Falso (RAF); Probabilidade de Detecção (POD) e o BIAS (viés). Verificou-se que, em média, o modelo WRF apresentou moderada tendência em subestimar as ocorrências de chuva sobre Macapá. No entanto, a análise do modelo estendeu-se por um período de apenas oito meses para o ano de 2008. O modelo ETA apresentou melhor desempenho comparado com o modelo WRF quanto a seus acertos nas ocorrências e não-ocorrências de chuva para o ano de 2008. As análises diárias das previsões de precipitação do modelo ETA indicaram um comportamento sistemático deste em prever mais ocorrências de chuvas do que são observadas pela rede de pluviômetros do NHMET/IEPA (independente da quantidade da precipitação), ou seja, tende a superestimar as precipitações observadas. Essa tendência se manifesta, principalmente, em diferenças de fase temporal (período chuvoso versus menos chuvoso). Os resultados obtidos indicaram que, embora existam casos de falsos alertas e superestimativa de precipitação, há possibilidade da utilização dos modelos atmosféricos para a previsão de chuvas para alertas de níveis críticos com até 24 horas de antecedência. Apesar dos eventos de precipitação na maioria dos casos terem sido superestimados em relação aos dados observados, a intensidade da chuva prevista foi menor que a da chuva observada. Mediante os resultados obtidos pelo MAC, foi demonstrado que os modelos WRF e ETA constituem-se ferramentas eficazes no serviço de previsão do tempo. Tais resultados apontam para o fato do NHMET/IEPA poder emitir, com maior confiabilidade, avisos meteorológicos (tempestades severas, enchentes, secas e focos de incêndio) em especial os usuários de setores estratégicos como pesquisa, energia, indústria, comércio, agricultura, defesa civil e turismo, que se caracterizam como os principais usuários do serviço de previsão do tempo do NHMET/IEPA.

**Palavras-chaves:** Precipitação, níveis de acerto, previsão do tempo, ETA, WRF, MAC (método de análise de contingente).

# 1. INTRODUÇÃO

O avanço da modelagem numérica para previsão de tempo nas últimas décadas tem sido de grande ajuda na tomada de decisão em diversos setores da economia. Pouco se conhece sobre a real variabilidade do tempo e do clima nos eixos temporal e espacial. Isto é, como funcionam os sistemas que governam, por exemplo, os níveis de precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, os quais se mostram de iminente importância regional.

A previsão quantitativa de precipitação é de grande complexidade, pois seus processos físicos podem ocorrer em várias escalas, desde grandes massas de ar até eventos convectivos extremamente localizados (GANGULY; BRAS, 2003), tornando-a extremamente variável no tempo e no espaço.

Apesar do uso generalizado de modelos de previsão do tempo em vários centros estaduais e de pesquisa, o método mais utilizado na avaliação das previsões de precipitação é o que permite a comparação entre dados de saída dos modelos numéricos com os dados observados na superfície (DEMIRTAS *et al.*, 2005). Entretanto, a qualidade da avaliação está relacionada diretamente com a densidade de estações de observação, sendo economicamente inviável manter uma rede de estações com densidade suficiente para avaliar uma previsão atmosférica de alta resolução com a devida acurácia (BENOIT; PELLERIN, 2000).

Os modelos de circulação global reproduzem bem o estado da atmosfera nas escalas global e sinótica, mas não representam em escalas regionais próximas à superfície da terra (KALMA; CALDER, 1994). Um dos problemas que provavelmente contribui para este fato é a suavização da topografia nas escalas globais. Além disso, o clima na Amazônia é fortemente influenciado pela migração norte-sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que determina o início, duração e término do período chuvoso sobre a região (FIGUEROA & NOBRE, 1990; LIEBMANN & MARENGO, 2001; AMANAJÁS & ARAÚJO, 2008). O estudo da atuação, desenvolvimento e deslocamento desse sistema proverá seu melhor entendimento e, por sua vez, contribuirá na análise gráfica dos modelos e produção de boletins meteorológicos para discussões de análise sinótica e previsão do tempo para o Estado do Amapá.

Por outro lado, os modelos conceituais em mesoescala recentemente evoluíram. Por este motivo, o conhecimento gerado necessita ser difundido e incorporado no cotidiano das atividades dos centros estaduais de meteorologia. É neste contexto que se enquadram os estudos e a pesquisa em mesoescala que cobrem esta demanda e a necessidade de difusão de informações, que exige a utilização de resultados de pesquisa de ponta e a realização de investigação por parte da comunidade científica.

Além disso, o desenvolvimento de um sistema de modelagem regional adequado consiste na adaptação do modelo numérico, treinamento local e manutenção operacional, uma vez que seus usuários não são os mesmos ao longo do tempo (é dinâmico). Daí a importância de implantar sistemas numéricos de previsão regional e sua integração nacional.

Neste contexto, o objetivo deste estudo é quantificar estatisticamente o nível de eficiência da previsão de precipitação dos modelos WRF (Weather Research and Forecasting) e ETA por intermédio

de comparações entre os dados observados em superfície (PCDs) e as saídas gráficas dos modelos para o município de Macapá. Para cumprir com este objetivo utilizou-se o Método de Análise de Contingência (MAC), complementado pela indicação de quais os sistemas meteorológicos que inibiram ou acentuaram os totais observados de precipitação em Macapá no ano de análise.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo e as características operacionais dos Modelos WRF e ETA são apresentadas, bem como suas saídas gráficas e descrição dos índices utilizados para avaliação do comportamento das previsões de precipitação em Macapá.

### 2.1. Localização da área de estudo e processamento de dados

A região de estudo foi definida de modo a permitir a visualização dos sistemas atmosféricos que atuam sobre Macapá, capital do Estado do Amapá, mais precisamente a zona urbana do município (Figura 1), localizada entre as latitudes de  $0^{\circ}06'04.14''N$  a  $0^{\circ}03'18.08''S$  e as longitudes de  $51^{\circ}02'21.40''W$  a  $51^{\circ}07'56.17''W$ .

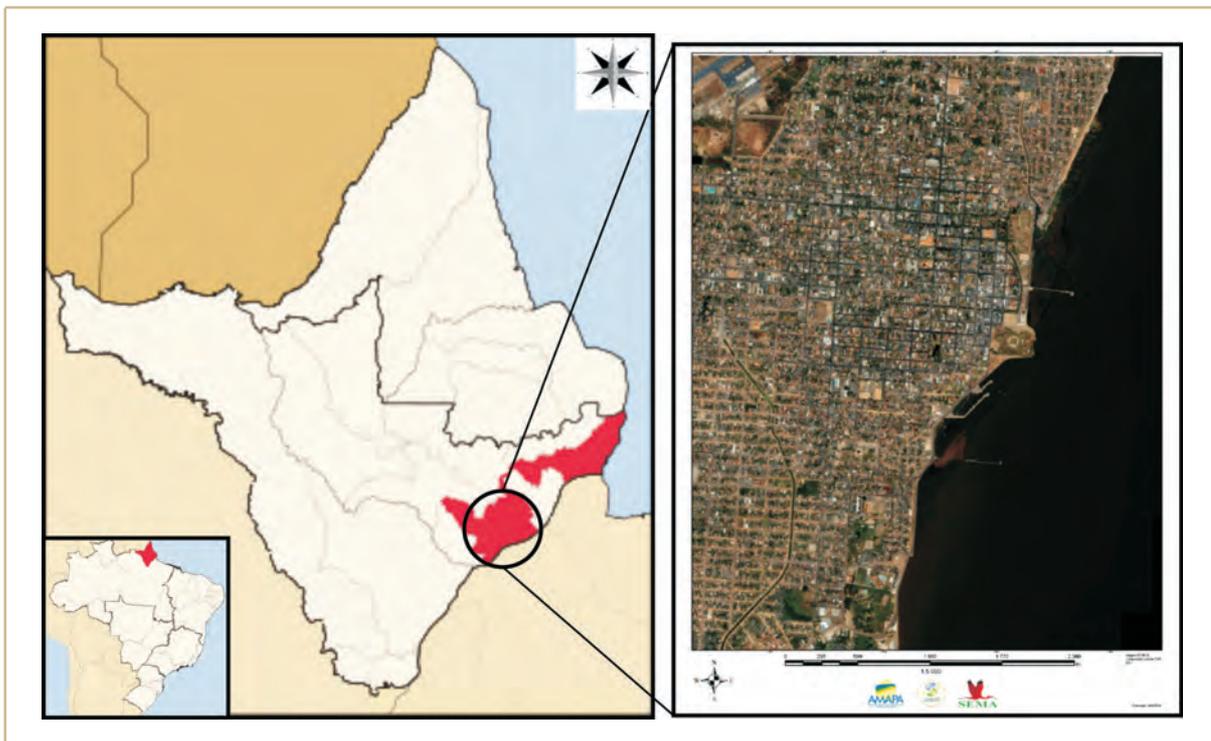


Figura 1. Localização da Zona Urbana de Macapá. Fonte: Wikipedia/SEMA.

Neste estudo foram selecionadas as séries de dados obtidas junto ao banco de dados do NHMET/IEPA, provenientes de observações feitas pelas estações: PCD Agrometeorológica (CPTEC/INPE), situada no 34.º Batalhão de Infantaria e Selva, de coordenada geográfica 0°02'10.28"N e 51°05'20.07"W; Estação Pluviométrica (ANA), situada às margens do rio Amazonas, de coordenada geográfica 0°01'20.27"N e 51°03'07.81"W; e a Estação Convencional de Superfície (INMET), localizada no Distrito de Fazendinha, de coordenadas geográficas 0°02'42.36"S e 51°06'35.64"W.

A escolha dessas estações deve-se ao fato das chuvas serem um fenômeno discreto, cuja observação é localizada. Ou seja, não são espacialmente bem distribuídas, o que levaria a erros sistemáticos nas comparações das saídas gráficas dos modelos com as observações de superfície. Este procedimento induz a melhoria dos níveis de acerto da previsão de chuva prevista pelo modelo (AMANAJÁS & ARAÚJO, 2008).

Os dados de precipitação utilizados neste estudo foram oriundos de coletas diárias realizadas de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2008. Os totais observados de precipitação das três estações foram submetidos a testes de Análise de Variância (ANOVA,  $p < 0,05$ ). Os resultados indicaram que as médias amostradas tendem a ser significativamente semelhantes para fins de análise comparativa com as saídas dos modelos WRF e Eta (Tabela 1).

**Tabela 1.** Teste ANOVA das precipitações observadas em 2008.

Mês	$F_{real}$	$F_{crítico}$	Hipótese Nula ou Alternativa ( $p < 0,05$ )
Janeiro	0,656	3,098	Médias Iguais ( $F_{real} < F_{crítico}$ )
Fevereiro	1,538	3,105	Médias Iguais ( $F_{real} < F_{crítico}$ )
Março	0,098	3,098	Médias Iguais ( $F_{real} < F_{crítico}$ )
Abril	1,520	3,101	Médias Iguais ( $F_{real} < F_{crítico}$ )
Maiο	0,065	3,099	Médias Iguais ( $F_{real} < F_{crítico}$ )
Junho	0,439	3,101	Médias Iguais ( $F_{real} < F_{crítico}$ )
Julho	0,656	3,098	Médias Iguais ( $F_{real} < F_{crítico}$ )
Agosto	0,029	3,098	Médias Iguais ( $F_{real} < F_{crítico}$ )
Setembro	0,168	3,101	Médias Iguais ( $F_{real} < F_{crítico}$ )
Outubro	0,101	3,098	Médias Iguais ( $F_{real} < F_{crítico}$ )
Novembro	0,835	3,101	Médias Iguais ( $F_{real} < F_{crítico}$ )
Dezembro	0,176	3,098	Médias Iguais ( $F_{real} < F_{crítico}$ )

Uma breve análise da Tabela 1 indica que, em média, os valores de precipitação registrados pelas estações meteorológicas (PCDs e Convencional) não diferiram entre si ao longo do ano de 2008 quando se considera um nível de significância  $p < 0,05$ . Ou seja, podemos considerar que a média mensal das

observações pode ser comparada com as saídas do modelo numérico sem que nenhuma delas tenha registrado algum valor muito diferente das demais.

## 2.2. Caracterização dos modelos WRF e ETA operacional NHMET/IEPA

Para a implementação dos modelos atmosféricos WRF e ETA, a região de estudo foi definida ainda de modo a evitar problemas relacionados aos “efeitos de borda”, relacionados aos fenômenos de grande escala. Esta distorção ocorre devido a interação entre esses fenômenos e a grade de alta resolução, o que pode provocar uma perturbação virtual na saída dos dados numéricos.

Para minimizar esse problema, a grade dos modelos WRF e ETA foram definidas abrangendo, além de todo Estado do Amapá, parte do Oceano Atlântico Norte, grande parte do Estado do Pará e dos países Guiana Francesa e Suriname.

- **Modelo WRF**

O modelo atmosférico WRF é um modelo de previsão numérica do tempo de mesoescala, desenvolvido tanto para fins de pesquisa quanto operacionais (WANG *et al.*, 2004). Foi desenvolvido para ser flexível, com código portátil e eficiente em ambientes de computação paralela. Oferece uma diversidade de opções físicas, além de sistemas avançados de assimilação de dados que estão sendo desenvolvidos e testados em conjunto com o modelo. Pode ser usado em aplicações de diferentes escalas espaciais, desde alguns metros até milhares de quilômetros. Estas aplicações incluem previsões numéricas do tempo operacionais e voltadas para a pesquisa em geral na área, bem como pesquisas específicas de parametrizações físicas e assimilação de dados, modelos dirigidos de qualidade do ar, acoplamento oceano-atmosfera e simulações idealizadas.

- a. Seleção da variável e intervalos:** saída gráfica de 00TMG da previsão de precipitação acumulada em 24 horas;
- b. Código do modelo:** foi implementado em uma máquina com sistema operacional Linux, sendo composto por códigos em linguagem C, Fortran 90 e *bash script*. As etapas de pós-processamento incluíram ainda *scripts* do aplicativo GrADS (Grid Analysis and Display System) usado para interpolar e extrair os dados de previsão de precipitação e plotar os resultados;
- c. Intervalos de integração e estrutura:** a previsão do modelo operacional WRF é da ordem de 144 horas de integração, com grade de 9 km x 9 km na malha horizontal e 35 camadas na vertical. As variáveis calculadas não representam um valor sobre as superfícies verticais e sim uma média para a parcela entre duas superfícies;
- d. Domínio computacional do modelo:** cobre explicitamente a região compreendida entre as longitudes de 53°W a 49,5°W e as latitudes de 5°N a 2,5°S (Figuras 2a e 2b).

Foram utilizadas as previsões de 09 de maio a 31 de dezembro de 2008, data em que o modelo entrou efetivamente em operação no NHMET/IEPA, totalizando 237 dias de previsão.

- **Modelo ETA**

O modelo de área limitada ETA utiliza como condição inicial a análise fornecida pelo National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e como condições de contorno as previsões do modelo global do CPTec (CHOU *et al.*, 2004). No Estado do Amapá funciona operacionalmente no NHMET/IEPA desde maio de 2006.

- a. Seleção da variável e intervalos:** saída gráfica da previsão de precipitação acumulada a cada três horas;
- b. Código do modelo:** foi implementado em uma máquina com sistema operacional Linux, sendo composto por códigos em linguagem C e Fortran 90. As etapas de pós-processamento incluíram ainda *scripts* do aplicativo GrADS usado para interpolar e extrair os dados de previsão de precipitação e plotar os resultados;
- c. Intervalos de integração e estrutura:** 72 horas de integração, cuja grade é da ordem de 15 km x 15 km na malha horizontal e 38 camadas na vertical. Verifica-se que a grade do ETA difere substancialmente da do WRF descrito. É importante alertar que, devido apenas a esta diferença entre as grades, possa haver diferentes resultados em termos de acerto, principalmente pela melhor resolução de um em relação a outro modelo;
- d. Domínio computacional do modelo:** cobre explicitamente a região compreendida entre as longitudes de 60,2°W a 44,6°W e as latitudes de 6°N a 3°S (Figuras 2c e 2d).

Para este estudo foram utilizadas as saídas gráficas de 00TMG e 12TMG, de precipitação acumulada a cada três horas, analisadas separadamente. Utilizou-se apenas o intervalo de integração entre 24 horas e 48 horas (equivalente ao segundo dia de previsão, denotado aqui por ETA 48 horas). Tal situação é sempre recomendável porque melhora significativamente a eficiência operacional do modelo e o nível de acerto. Semelhantemente a escolha da região de discretização do modelo (maior que a área necessariamente útil), esse procedimento auxilia na eliminação das perturbações iniciais do processo de integração, as quais podem causar inconsistências nos resultados.

### 2.3. Descrição do Método de Análise de Contingência (MAC)

Os parâmetros estatísticos analisados a seguir definem a capacidade do modelo de prever a ocorrência de determinados sistemas atmosféricos. Nesta seção será apresentada a metodologia usada para quantificar os principais índices de acerto na previsão dos Modelos WRF e ETA operacionais NHMET/IEPA, em que as ocorrências previstas foram comparadas às observadas.

A avaliação da precipitação foi analisada por meio de categorias, isto é, o critério de erro ou acerto da previsão baseou-se na ocorrência ou não do evento de chuva (foram considerados dias com chuva os dias que registraram precipitações acima de 1 mm). Para isto, foram definidas as seguintes categorias para todos os meses de 2008, segundo os dados de entrada da Tabela 2, adaptado de (WILKS, 2006):

- O modelo previu chuva e esta ocorreu na área de verificação (a);
- O modelo previu chuva na área e esta não ocorreu (b);
- O modelo não previu chuva na área e esta ocorreu (c);
- O modelo não previu chuva na área e esta não ocorreu (d).

**Tabela 2.** Verificação da previsão de chuva por meio do MAC

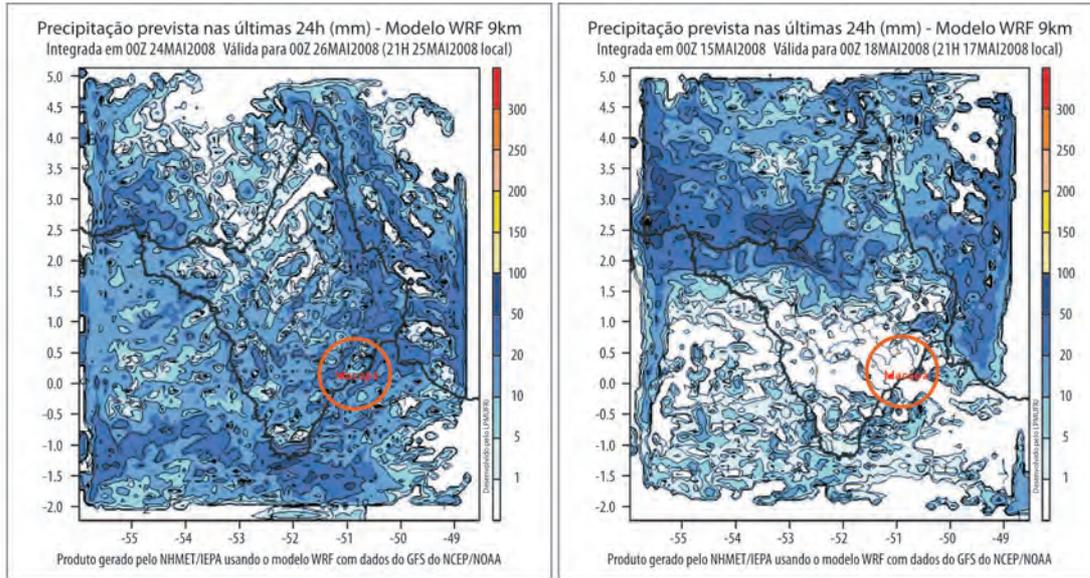
		Observado		
		Sim	Não	
Previsto	Sim	a	b	a + b
	Não	c	d	c + d
		a + c	b + d	n = a + b + c + d

totais marginais da previsão

		Observado		
		Sim	Não	
Previsto	Sim	a/n	b/n	(a + b)/n
	Não	c/n	d/n	(c + d)/n
		a + c	b + d	1

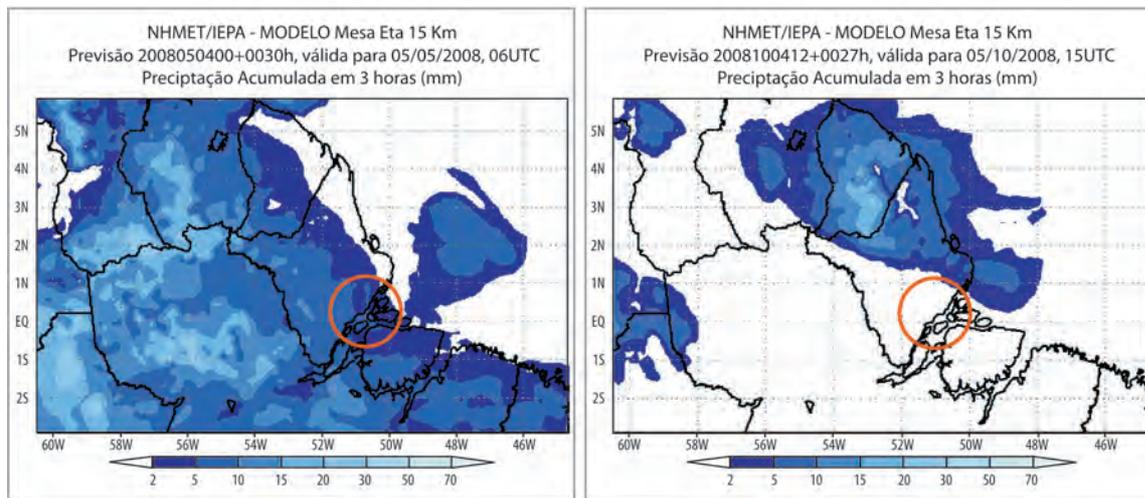
distribuição marginal da previsão, p(y)

Para a avaliação das ocorrências (Sim) ou não (Não) dos eventos de chuva (Tabela 2), foram utilizadas cartas de precipitação pluviométrica dos modelos WRF e ETA obtidas no NHMET/IEPA e dados observados de precipitação pluviométrica da rede do sistema nacional de estações. As ocorrências e não-ocorrências previstas pelo modelo foram verificadas sobre o domínio e identificadas de acordo com a **escala de cores da saída gráfica** (Figura 2).



(a)

(b)



(c)

(d)

**Figura 2.** Saída gráfica com previsão de chuva (a) e (c) e sem previsão de chuva (b) e (d) sobre Macapá, previstas pelos modelos WRF (a) e (b); e ETA (c) e (d). Fonte: NHMET/IEPA

O passo seguinte foi lançar os somatórios dos pares de combinações de previsão/observação nas tabelas de contingência, de acordo com as categorias (a), (b), (c) e (d), como mostra a Tabela 2. As avaliações objetivas de previsão dos modelos foram realizadas utilizando a Proporção de Acertos (PA), o Índice Crítico de Sucesso (ICS), a Probabilidade de Detecção (POD), a Relação de Alarme Falso (RAF) e o Viés (Bias) definidos a seguir:

## Proporção de Acertos (PA)

A medida mais direta e intuitiva das precisões de previsão para eventos discretos foi proposta por Finley (1884) *apud* WILKS (2006). Esta é a fração das “*n*” previsões ocorridas para as quais a probabilidade prevê corretamente, se antecipando ao evento subsequente ou a nenhum evento (previsão de chuva e sua ocorrência ou previsão sem chuva em que ela não ocorreu). Em termos matemáticos, a Equação 1 mostra a proporção de acertos do seguinte modo:

$$PA = \frac{(a + d)}{n} \quad (1)$$

A proporção de acertos satisfaz o princípio de equivalência de eventos, desde que credite sim e não corretamente para previsões iguais. Além disso, a proporção de acertos penaliza ambos os tipos de erros (falsos alarmes e erros) igualmente. A proporção de acertos pior possível é igual a zero (0%) e a melhor é igual a um (100%). Como a proporção de acertos não difere entre previsões corretas do evento *a*, e previsões corretas do não evento, *d*, esta fração de previsões corretas também foi chamada **taxa de golpe**.

## Índice Crítico de Sucesso (ICS)

O índice crítico de sucesso é o número de previsões corretas *a* divididas pelo número total de ocasiões nas quais aquele evento foi previsto e/ou observado. Pode ser visto como uma proporção de acerto para a quantidade prevista depois de remover acertos não previstos considerados, dado por:

$$ICS = \frac{a}{(a + b + c)} \quad (2)$$

O pior índice crítico de sucesso é igual a zero (0%). E o melhor índice crítico de sucesso é igual um (100%). Cada uma das categorias na tabela de contingência 2 x 2 pertence a uma ocasião prevista diferente. Assim, *a* representa a intersecção das áreas sobre as quais o evento era previsto e consequentemente aconteceu; *b* representa a área sobre a qual o evento era previsto, mas não aconteceu; e *c* é a área sobre a qual o evento aconteceu, mas não foi previsto.

## Probabilidade de Detecção (POD)

O POD é a relação do evento de chuva prevista corretamente com os eventos previstos correta ou incorretamente. Ou seja, mostra o desempenho de detecção da chuva. A melhor previsão ocorre

quando o POD for igual a um (100%). Conseqüentemente, a pior previsão ocorrerá quando o POD for igual a zero (0%).

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (3)$$

### Relação de Alarme Falso (RAF)

O RAF nada mais é do que a proporção de previsões de ocorrência de chuva que na verdade não ocorreram. Por esta razão utiliza-se o termo “alarme falso”. O RAF tem uma orientação negativa, de forma que valores menores de RAF serão preferidos. O melhor possível RAF é quando for igual a zero (100%), e o pior possível é quando o RAF for igual um (0%).

$$RAF = \frac{b}{a+b} \quad (4)$$

### Bias (B)

O Bias, ou comparação da média prevista com a média observada (viés), normalmente é representado como uma relação para verificação de tabelas de contingência. Em termos de tabela 2 x 2 a relação do Bias é:

$$B = \frac{a+b}{a+c} \quad (5)$$

O Bias simplesmente é a relação do número de sim previstos com o número de sim observados. Exibe previsões imparciais  $B = 1$  indicando que o número de eventos previstos e observados foi o mesmo. Note que o Bias não fornece nenhuma informação sobre a correspondência entre as previsões e observações do evento em ocasiões particulares, de forma que o Bias não é uma medida de precisão. Bias maiores que 1 indicam que o evento previsto ocorreu mais que o observado (superestimado). Reciprocamente, Bias menores que 1 indicam que o evento previsto ocorreu menos que o observado (subestimado).

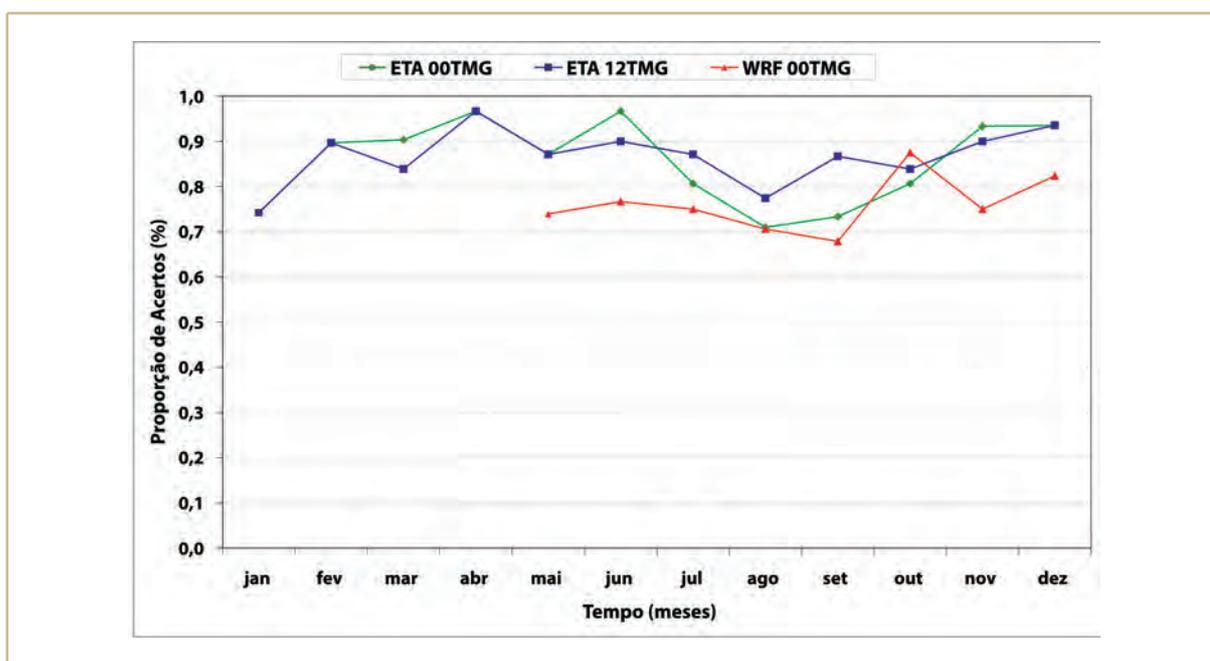
## 3. RESULTADOS

Nesta seção foram analisados e discutidos os resultados obtidos durante a pesquisa, analisando-se, individualmente, o **desempenho de cada modelo**. Foi analisado cada índice de acordo com suas respostas à capacidade de previsão dos modelos WRF e ETA, destacando-se os meses em que cada modelo

apresentou melhor e pior desempenho. O objetivo foi estimar a qualidade de suas previsões para Macapá em 2008.

### Proporção de Acertos (PA)

A Proporção de Acertos (PA) não difere as previsões do evento *a* das previsões do evento *d*, observando que abril e junho foram os meses em que o modelo ETA com integração às 00TMG melhor detectou as ocorrências e não-ocorrências de chuva na região. As ocorrências *sim* e *não* foram corretamente creditadas para previsões iguais com nível de acertos de 97% para ambos os meses (Figura 1). Contudo, em média, as previsões do modelo ETA com integração às 12TMG apresentaram melhores resultados, com média anual de acertos de 87%.



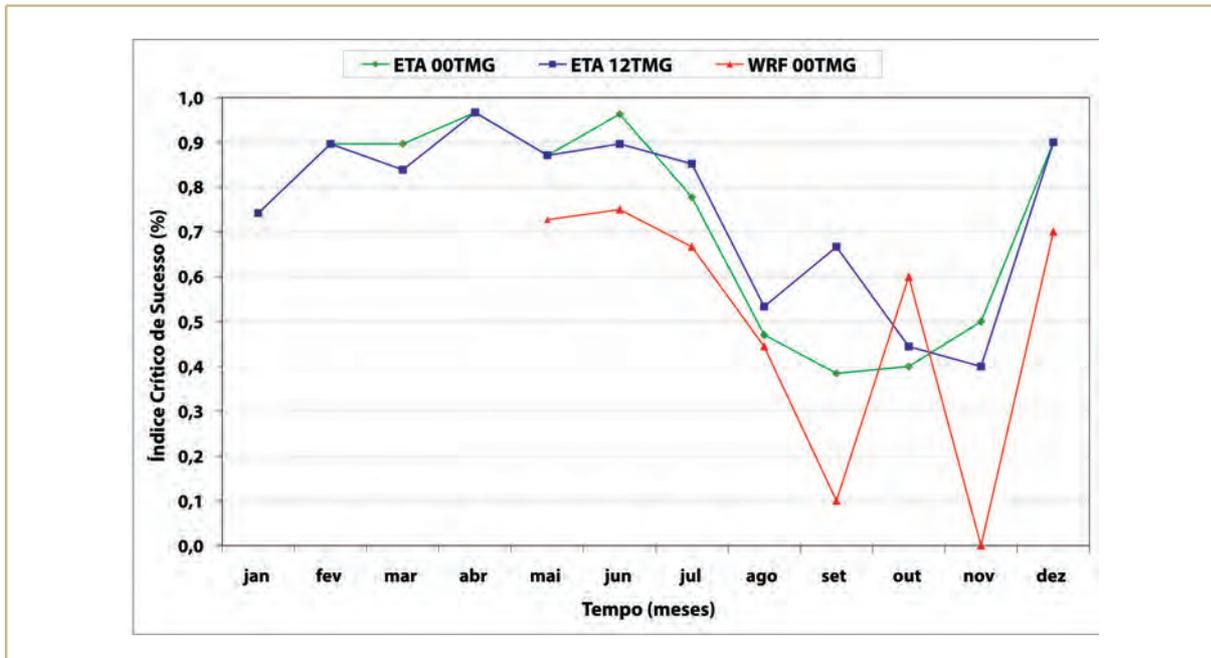
**Figura 1.** Proporção de Acertos das previsões de chuva dos modelos WRF com saída às 00TMG e ETA com saídas às 00TMG e 12TMG sobre Macapá.

Para os oito meses de 2008 nos quais se pode analisar a previsibilidade do modelo WRF, este apresentou média de acerto de 76%, cujo melhor resultado foi para o mês de outubro, com 86% (Figura 1).

Os valores altos obtidos pelo índice analisado (em torno de 0,8 a 1,0) significam que as ocorrências de chuva prevista pelos modelos e a chuva observada são muito semelhantes, ou seja, a correspondência entre a chuva observada e a chuva prevista sobre a zona urbana de Macapá foi elevada.

## Índice Crítico de Sucesso (ICS)

O Índice Crítico de Sucesso (ICS), por ter relação direta com a ocorrência da chuva, apresentou valores satisfatórios nos meses chuvosos (dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril e maio) para as previsões do modelo ETA com integração às 00TMG. Porém, novamente as integrações do modelo para as 12TMG apresentaram médias anuais melhores, com destaque às previsões dos meses do período menos chuvoso – agosto (53%) e setembro (67%) –, como mostra a Figura 2.



**Figura 2.** Índice Crítico de Sucesso das previsões de chuva dos modelos WRF com saída às 00TMG e ETA com saídas às 00TMG e 12TMG sobre Macapá.

Para o modelo WRF, o ICS não foi tão satisfatório, principalmente para os meses de setembro, quando previu a ocorrência de chuva em apenas 10% das vezes. Para o mês de novembro, subestimou em 100% a ocorrência de chuvas (Figura 2). Essa fraca correlação se deve, possivelmente, à diferença de fase temporal e espacial. O modelo WRF obtém êxito em identificar os eventos meteorológicos, mas não consegue fazer uma previsão com precisão temporal. Além disso, a distribuição espacial pode ser prejudicada pela resolução da grade, deslocando a precipitação para dentro ou para fora da área de estudo.

## Probabilidade de Detecção (POD)

A Probabilidade de Detecção (POD) é utilizada na verificação de previsões fortuitas dos modelos. Esta foi mais significativa na análise dos meses chuvosos, como já era esperado (Figura3). Os meses nos

quais o modelo ETA apresentou pior desempenho foram setembro (56% e 89%, respectivamente para as integrações de 00TMG e 12TMG) e outubro (67% para ambas as integrações).

Já o modelo WRF apresentou desempenho muito inferior ao modelo ETA, principalmente para o período menos chuvoso (junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro). No mês de setembro, o modelo detectou em apenas 13% das ocorrências a possibilidade de chuva e para o mês de novembro o percentual foi de 0%.

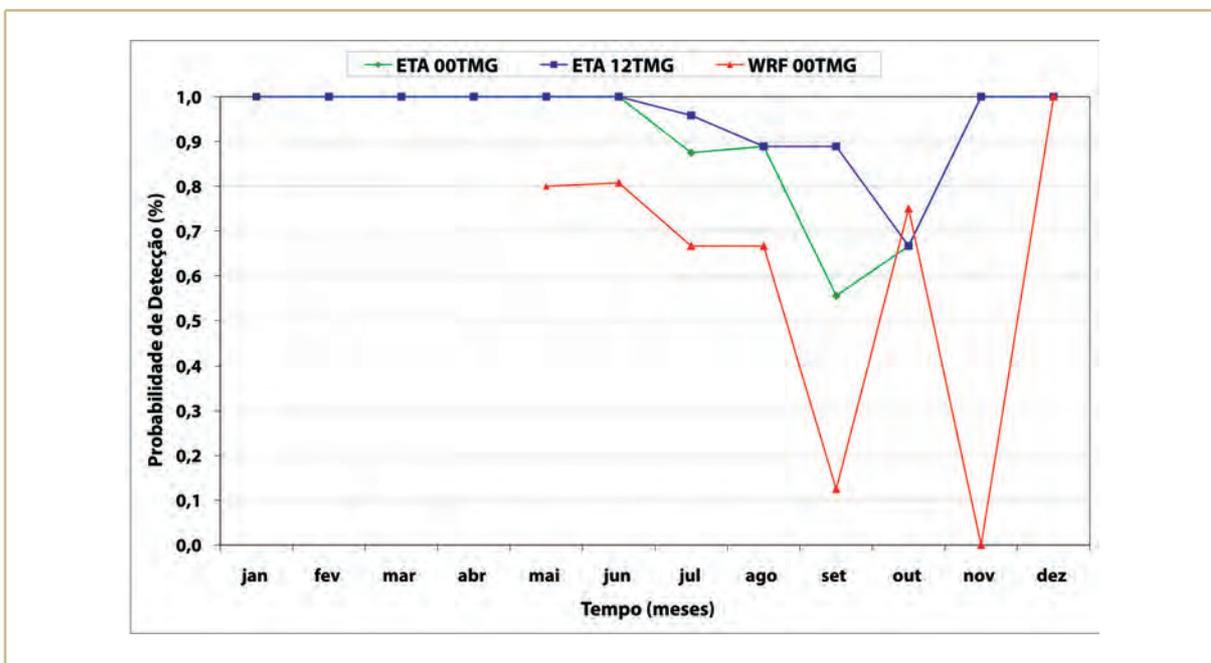
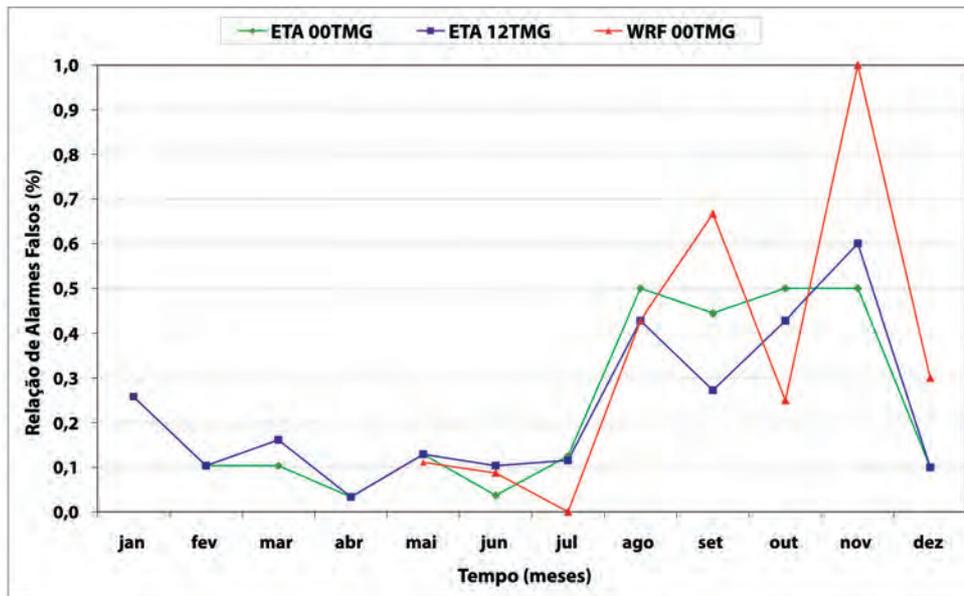


Figura 3. Probabilidade de Detecção das previsões de chuva dos modelos WRF com saída às 00TMG e ETA com saídas às 00TMG e 12TMG sobre Macapá.

### Relação de Alarme Falso (RAF)

A Relação de Alarmes Falsos é o índice que indica a proporção de eventos *sim* que não aconteceram, segundo as previsões do modelo. O RAF mostrou que as piores previsões do modelo ETA ocorreram no período menos chuvoso. O maior desvio na previsão deste modelo ocorreu em novembro, com 60% de erro, quando se observaram duas ocorrências de chuva em cinco previsões integralizadas às 12TMG (Figura 4).

Em comparação com o modelo ETA, o modelo WRF apresentou novamente desempenho inferior, principalmente para o período menos chuvoso, com 100% de erro no mês de novembro. No entanto, suas previsões para o mês de julho foram satisfatórias, com 100% de correspondência entre suas previsões fortuitas e as observações.



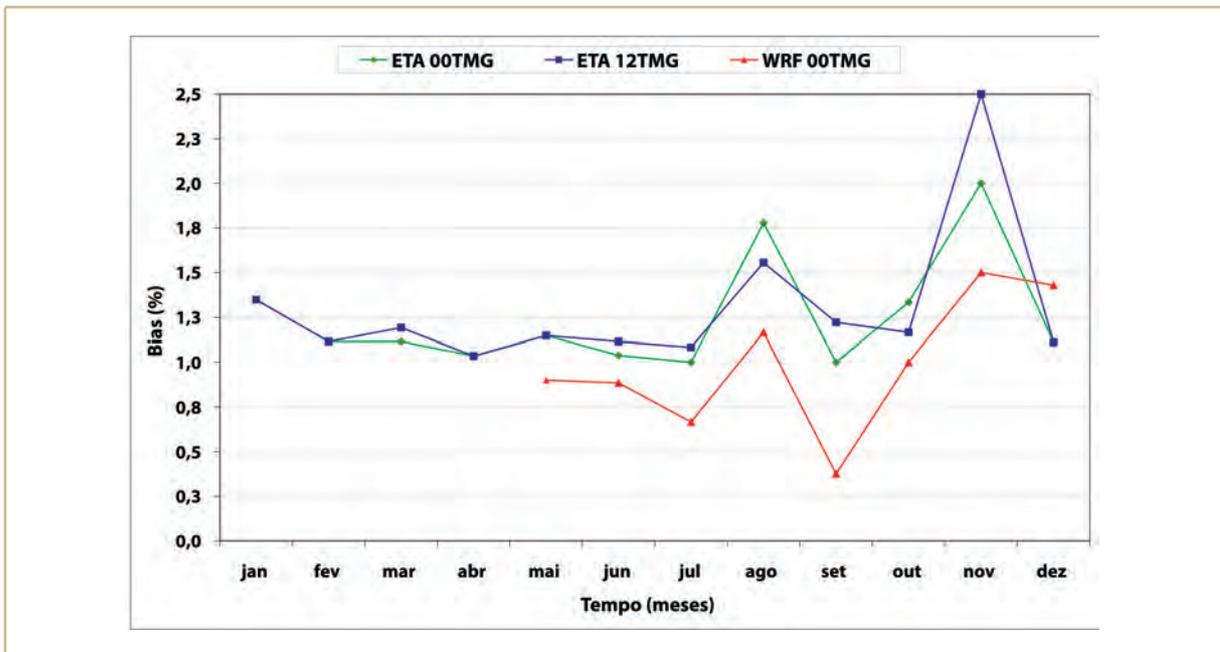
**Figura 4.** Relação de Alarme Falso das previsões de chuva dos modelos WRF com saída às 00TMG e ETA com saídas às 00TMG e 12TMG sobre Macapá.

## BIAS (B)

O Bias, índice que expressa a tendência do modelo em subestimar ou superestimar as ocorrências de chuvas previstas em relação às observações, mostrou tendência do modelo ETA em superestimar as ocorrências em todos os meses do ano de análise, para ambas as integrações (Figura 5).

Nos meses de julho e setembro, o modelo ETA com integração para às 00TMG apresentou Bias igual a 1, indicando que o número de previsões foi igual ao número de ocorrências de chuva.

Para o mês de setembro, o modelo WRF subestimou em 38% as ocorrências de chuva sobre Macapá. Já para o mês de novembro, superestimou em 15% as ocorrências de chuva, no entanto, este mês foi o mais seco do ano.



**Figura 5.** BIAS das previsões de chuva dos modelos WRF com saída às 00TMG e ETA com saídas às 00TMG e 12TMG sobre Macapá.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste estudo observou-se que, em média, o modelo WRF apresentou moderada tendência em subestimar as ocorrências de chuva sobre Macapá. No entanto, vale ressaltar que a presente análise do modelo estendeu-se por um período de apenas oito meses para o ano de 2008. O modelo ETA para ambas as integrações (00TMG e 12TMG) apresentou melhor desempenho comparado ao modelo WRF quanto a seus acertos nas ocorrências e não-ocorrências de chuva para o ano de 2008.

As análises diárias das previsões de precipitação do modelo ETA, tanto para 00TMG como para 12TMG, indicaram um comportamento sistemático deste em prever mais ocorrências de chuvas do que são observadas pela rede de pluviômetros do NHMET/IEPA (independente da quantidade da precipitação). Ou seja, que este tende a superestimar as precipitações observadas.

A tendência de superestimação se manifesta, principalmente, em diferenças de fase temporal (período chuvoso versus menos chuvoso), e se deve, provavelmente, a problemas de calibração e inicialização do modelo e principalmente devido à diferença de densidade de postos na área de interesse. Na região de estudo existem três estações de monitoramento que contribuiriam no cálculo das ocorrências de chuva na área.

Por exemplo, para o serviço de previsão e gestão das informações meteorológicas, ambos os modelos promoveriam consequências positivas e negativas, de acordo com a análise do RAF.

Positivas porque, em caso de previsões fortuitas, poupariam o deslocamento de equipes de Defesa Civil aos sítios em que não se confirmassem chuvas intensas. E negativas porque, em caso de um número elevado de falsas previsões, causariam prejuízos ao setor agrícola que demandaria sistemas artificiais de irrigação. Não estariam preparados porque estariam esperando chuva.

Os resultados obtidos indicaram que, embora existam casos de falsos alertas e superestimativa de precipitação, há possibilidade da utilização dos modelos atmosféricos para a previsão de chuvas para alertas de níveis críticos com até 24 horas de antecedência.

Apesar dos eventos de precipitação na maioria dos casos terem sido superestimados em relação aos dados observados, houve casos nos quais a intensidade da chuva prevista foi menor que a da chuva observada. Isto se deve, além da localização e densidade das estações meteorológicas, aos diversos tipos de eventos meteorológicos ocorridos, como a atuação da ZCIT, principal sistema gerador de chuvas sobre a região, favorecendo a formação de linhas de instabilidade.

Mediante os resultados obtidos pelo MAC, observa-se que os modelos WRF e ETA constituem-se ferramentas relativamente eficazes no serviço de previsão do tempo. Com estes resultados, o NHMET/IEPA poderá analisar com maior critério e cuidado os avisos meteorológicos (tempestades severas, enchentes, secas e focos de incêndio) em especial aos setores estratégicos como energia, agricultura, defesa civil, turismo e infraestrutura, que se caracterizam como os principais usuários do serviço de previsão do tempo do NHMET/IEPA.

Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se que esta análise se torne rotineira no setor de previsão do NHMET/IEPA, de forma a monitorar sistematicamente os erros médios dos modelos por períodos climáticos (chuvoso e menos chuvoso – sazonalidade). Essa técnica estatística tornará o serviço de previsão numérica de tempo mais eficaz e analítico, pois promoverá previsões com maior confiabilidade, informando ao meteorologista as reações e comportamentos dos modelos em situações de importantes relacionadas ao tempo, tais como estiagem e excedente pluviométrico.

É importante observar que, apesar das diferentes resoluções apresentadas por ambos os modelos, estes podem ter sido um dos fatores que tenha provocado as principais diferenças entre os indicadores do MAC no período. Mas tais especulações podem ser assunto de estudos futuros, como por exemplo, a utilização de outras técnicas de estimativa de precipitação, como as baseadas em dados de satélite, para validar as previsões geradas pelos modelos WRF e ETA.

## 5. AGRADECIMENTOS

Deve-se um especial agradecimento aos órgãos de fomento CNPq e FINEP, que possibilitam os investimentos de apoio à pesquisa no Estado do Amapá e que contribuem continuamente para o desenvolvimento científico e tecnológico no país. Ao Projeto REMETAP (modernização da Rede Estadual

de Meteorologia para previsão de tempo, clima e recursos hídricos) e ao NHMET/IEPA pela disponibilização dos dados e estações de trabalho para a realização deste estudo.

## 6. REFERÊNCIAS

AMANAJÁS, J. C., ARAÚJO, R. C. M. *Uso do Método de Contingência para Análise da Eficácia de Previsão da Precipitação Pluviométrica do Modelo ETA para o Município de Macapá-AP em 2007*. Monografia de Graduação. Macapá: Universidade Federal do Amapá, 2008.

BENOIT, R., PELLERIN, P. *Toward the use of coupled atmospheric and hydrologic models at regional scale*. *Monthly Weather Review*, v. 128, 2000. p. 1681-1706.

CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. Previsões sazonais utilizando o modelo ETA sobre a América do Sul. In: *Congresso Brasileiro de Meteorologia, XII, 2004, Fortaleza-CE*. CD de Anais, Fortaleza-CE, 2004.

DEMIRTAS, M., NANCE, L., BERNARDET, L., LIN, Y., LOUGHE, A., MAHONEY, J. L., GALL, R.; KOCH, S. Quantitative precipitation forecast (qpf) verification of dwfe. In: *21st Conference on Weather Analysis and Forecasting, 2005*.

FIGUEROA, S.N., NOBRE, C.A. *Precipitation distribution over central and western tropical South America*. *Climanálise*, 5:36-44, 1990.

GANGULY, A. R., BRAS, R. L. Distributed quantitative precipitation forecasting using information from radar and numerical weather prediction models. *Journal of Hydrometeorology*, 2003. p. 1168-1180.

LIEBMANN, B., MARENGO, J.A. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. *Journal Climate*, 14:4308-4318, 2001.

KALMA, J. D.; CALDER, I. R. *Land surface processes in land-scale hydrology*. Geneve, 1994.

WANG, W., BARKER, D., BRUYERE, C., DUDHIA, J., GILL, D., MICHALAKES, J. *WRF Modeling System User's Guide*. MMM Division/NCAR/Tech. Notes, 2004.

WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2ª Edition. California: Elsevier Science & Technology Books. Academic Press, 2006.



## Previsão Numérica Operacional no Estado do Amapá Utilizando o BRAMS

**Dr. Paulo Afonso Fischer Kuhn**

pkuhn@ufpa.br

Prof. adjunto da Faculdade de Meteorologia – Departamento de Geociências da UFPA.

**Dr. Eng. Alan Alan Cavalcanti da Cunha**

alancunha@unifap.br

Ex-coordenador do NHMET/IEPA, coordenador do Projeto REMETAP, Prof. do curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e Prof. dos Programas de Pós-Graduação do PPGBio/PPGDAPP-UNIFAP.

**Grad. Mauro de Jesus Pereira**

Mauro.pereira@iepa.ap.gov.br

Graduado em Gestão da Informação. Ex-Bolsista CNPq Desenvolvimento Tecnológico Industrial do Projeto REMETAP.

**Dr.ª Jaci Maria Bilhalva Saraiva**

jaci.saraiva@sipam.gov.br

Prof.ª Adjunta da Universidade Federal de Santa Maria – UFRGS. Coordenou o Setor de Meteorologia do SIPAM (AM). Coordenadora do Setor de Meteorologia do SIPAM (PA). Atua na Faculdade de Meteorologia – Departamento de Geociências da UFPA.

**Resumo.** O presente texto tem como objetivo apresentar as principais etapas e detalhes do processo de operacionalização de modelagem numérica aplicada à previsão do tempo em todo o Estado do Amapá. A evolução da operacionalização de modelos de previsão, contudo, é resultado de um momento especial de pleno desenvolvimento regional do setor empreendido pelo NHMET/IEPA-REMETAP auxiliado pelos seus diversos parceiros institucionais nacionais, como o CPTEC/INPE e a UFPA. A integração em rede de parceiros institucionais tornou possível a inserção do Estado do Amapá no contexto da aplicação de tecnologias modernas centradas em problemas relacionados à meteorologia e recursos hídricos, produzindo bons retornos de serviços e produtos customizados e disponibilizados à sociedade amapaense. Um dos principais resultados desse processo é a aplicação de modelos numéricos utilizados na previsão do tempo, com destaque ao *Brazilian Regional Modeling System (BRAMS)*. No Estado do Amapá, o BRAMS tem sido executado por intermédio de duas rotinas diárias, sendo inicializada com dados oriundos do CPTEC compreendendo os horários de 0000 e 12000UTC. Nestes casos, os prognósticos gerados são de 72 e 36 horas, respectivamente. Metodologicamente, as etapas analisadas consistiram em descrição de parâmetros e detalhamento operacional do modelo BRAMS com ênfase na etapa computacional de processamento paralelo de alto desempenho. A área de abrangência de previsão escolhida para a execução do modelo atendeu às necessidades locais, a qual se estende pelas coordenadas 1,5S – 56W até 4,5N – 46W, com resolução espacial de 5 km x 4 km (domínio computacional de análise com alta resolução espacial). Como principal resultado foi avaliado o potencial da capacidade do modelo BRAMS em prever as principais variáveis meteorológicas do tempo. Para tanto, foram realizadas análises comparativas entre imagens de satélites da atmosfera e resultados de campos de variáveis meteorológicas geradas pela simulação numérica com bons resultados. Como conclusão, observa-se que o modelo BRAMS é um sistema de extraordinária relevância para estudos diversos sobre a dinâmica meteorológica local. A ênfase nas previsões de tempo é dada ao curto e curtíssimo prazos, além de possibilitar análises de eventos meteorológicos (reanálises), estudos específicos de impactos ambientais (dispersão de constituintes químicos na atmosfera – CATT), análise de efeitos térmicos causados por ilhas de calor em áreas urbanas (TEB) etc. O leque de aplicação do BRAMS no NHMET/IEPA é praticamente ilimitado e abre novas oportunidades de estudos específicos na área. Desta forma, o Estado do Amapá passa a dispor de uma ferramenta que possibilita maior capacidade de monitoramento de variáveis meteorológicas de interesse nos ambientes amazônicos.

**Palavras-Chaves:** Núcleo Estadual, Amapá, Operação de Previsão de Tempo, Modelagem, BRAMS, Computação Paralela.

## 1. INTRODUÇÃO

A região norte do Brasil em pleno século da tecnologia ainda é carente de recursos tecnológicos. Este quadro é mais agravante em regiões periféricas predestinadas ao esquecimento, muitas vezes envoltas pelo manto da preservação ambiental. Todavia, isto gera um forte isolamento das populações e dos setores produtivos que em sua gênese são dependentes destas tecnologias para que possam produzir mais e melhor causando o menor impacto ambiental possível, como ocorre por exemplo nos setores de energia, navegação (fluvial e aérea), meio ambiente, saneamento, agrícola, infraestrutura e defesa civil.

A fim de minimizar impactos negativos da atividade humana, torna-se fundamental o emprego de técnicas inovadoras que permitam aos tomadores de decisão agir de modo rápido e eficaz em termos de respostas à sociedade local. Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma contribuição significativa e abrangente ao desenvolvimento científico e tecnológico do Estado do Amapá, traduzido pela inserção do seu núcleo estadual de hidrometeorologia no contexto geopolítico nacional. O Sistema BRAMS operacional no Estado do Amapá é a consolidação desse avanço.

Mas esse objetivo apenas pode ser alcançado com ações eficientes de longo prazo e mediante disponibilização de conhecimento científico, social e ambiental que possam ser traduzidos em benefícios reais ou de desenvolvimento técnico e humano locais. A formulação de ações integradoras de atividades do setor tem sido fundamental para o desenvolvimento do Estado do Amapá, pois este se insere no contexto moderno do uso das melhores técnicas de previsão de tempo, tanto em âmbito inter quanto intrarregional. Desta forma, as novas tecnologias e ferramentas científicas tornam-se mais acessíveis aos usuários dos serviços prestados, pois estão mais próximas dos núcleos estaduais. Contudo, no contexto regional, nacional e internacional há ainda os grandes desafios estratégicos de Estado, tais como a disponibilização de ferramentas capazes de prever as condições do tempo em todo o espaço territorial do Estado do Amapá, por município ou por sub-região, disponibilizando produtos e serviços customizados sob medida a cada usuário em potencial.

Neste sentido, o NHMET vem trabalhando na adoção de técnicas e tecnologias adequadas e totalmente adaptadas à sua área de atuação. Nestas tecnologias inclui-se a modelagem numérica de alta resolução com o modelo numérico para previsão do tempo BRAMS, que é resultado de um esforço nacional para adequar um modelo numérico à realidade nacional, considerando as diferentes características climáticas de cada região do Brasil.

Este esforço teve início ainda na década passada, com financiamento da FINEP, em que contou com a participação de grande número de pesquisadores brasileiros das mais diversas instituições de ensino e pesquisa. Dotou-se desta maneira o país de massa crítica sobre o tema, que continua em pleno desenvolvimento como ocorre na operação meteorológica em vários centros operacionais brasileiros. O SIPAM é um bom exemplo.

O projeto REMETAP teve papel fundamental no desenvolvimento e apoio à operacionalização da modelagem numérica no Amapá, pois permitiu integrar diferentes instituições locais e regionais para o êxito deste sistema de previsão de tempo (CUNHA, 2007).

### **1.1. Características Físicas e Contextualização da Previsão no Estado do Amapá**

O Estado do Amapá é formado por planície litorânea, aluvial e planalto, com colinas e morros como a Serra do Tumucumaque, a Serra Lombard, a Serra da Estrela, a Serra da Agaminuara ou Uruaitu, a Serra do Noucoru, a Serra do Navio, a Serra das Mungubas, a Serra da Pancada, a Serra do Iratapuru, a Serra do Acapuzal, a Serra Culari e a Serra Arú. Cerca de 95% de seu território encontra-se abaixo de 300m de altitude e 72%, abaixo de 200m. A planície litorânea, inundável nas cheias periódicas, caracteriza-se pela presença de mangues e lagoas. Sendo que o ponto mais elevado do Estado é a Serra do Tumucumaque, no Maciço das Guianas, com 501m de altitude, situada em sua parte noroeste. Sua vegetação é densa e apresenta grandes variações de maré, dado que se encontra na região da foz do rio Amazonas. Por ser um dos Estados brasileiros mais novos, provavelmente é também uma das regiões mais preservadas do Brasil. Sendo assim, é fundamental conhecê-lo para protegê-lo. Ou seja, os setores produtivos que são caracterizados basicamente pelo extrativismo mineral, vegetal e pesqueiro, necessitam receber informações precisas quanto ao tempo e ao clima local, garantindo a produtividade sem que haja danos ao ambiente, o que geraria, certamente, prejuízos futuros (IBGE, 2009).

A fim de subsidiar políticas públicas voltadas à preservação ambiental com sustentabilidade, a REMETAP e o NHMET/IEPA objetivam o desenvolvimento tecnológico e humano na região, sendo o serviço de previsão do tempo uma das mais importantes vias para o sucesso desta missão, tanto em termos de qualificação de mão-de-obra especializada para manipular sistemas computacionais complexos de alto desempenho quanto em termos da personalização de produtos de previsão de tempo adequados às características locais, fundamentais para a implementação e operacionalização de um centro de previsão de tempo capaz de realizar estas ações (CUNHA, 2007).

A área de processamento paralelo, aplicado na elaboração das previsões numéricas de tempo, tem sido cada vez mais utilizada, especialmente devido à boa relação custo-benefício necessária para a implantação de aglomerados de computadores (*clusters*). Estes sistemas são bastante eficientes na execução dos modelos numéricos aplicados na previsão do tempo (SANTIN, 2006).

Os usuários do NHMET/IEPA requerem soluções de tecnologia da informação que possam atender demandas crescentes por serviços e produtos tecnológicos com alta confiabilidade, disponibilidade e agilidade de gerenciamento. Além disso, estes usuários desejam soluções que ofereçam a escalabilidade para desenvolvimento de pesquisas e a flexibilidade para desenvolver e implementar rapidamente novos serviços que ofereçam benefícios ao menor custo possível.

Para equipe do NHMET/IEPA, o processamento/armazenamento de informações em *cluster* é uma resposta técnica necessária bastante aguardada pelas dificuldades em implementá-las, exigindo esforço conjunto de áreas como sistemas de informação, engenharia e computação aplicadas (FAZENDA, 2008; MOREIRA, 2008).

O processamento em *cluster* é a prática de integrar vários computadores para que atuem como um único sistema. Esta tecnologia surgiu nos anos 1990 como uma proposta de utilizar microcomputadores considerados obsoletos. Porém, o sucesso da iniciativa foi tal que logo surgiram *clusters* construídos unicamente de equipamentos novos e modernos, garantindo papel de destaque no processamento de alto desempenho e com o bônus do baixo custo frente aos sistemas tradicionais formados por supercomputadores.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O Núcleo de Hidrometeorologia do Estado do Amapá conta com um sistema computacional dotado de um *cluster* com 36 processadores, 36Gb de memória distribuída e uma capacidade de armazenamento de 2Tb em expansão. Esta infraestrutura atualmente encontra-se instalada fisicamente no prédio da Divisão de Informática da UNIFAP por questões meramente de logística, visto que a universidade está conectada na rede lógica da Rede Nacional de Pesquisa (RNP), possibilitando ao NHMET um melhor rendimento e segurança na operacionalização de seus produtos de previsão do tempo.

### 2.1. Descrição do modelo BRAMS

O BRAMS é um modelo numérico criado para simular a circulação atmosférica em várias escalas, com a capacidade de resolver um sistema de equações não hidrostáticas e compressíveis, conforme Tripoli e Cottom (1982). Para tanto, o modelo permite trabalhar com múltiplas grades aninhadas em pilhas ou em mosaico, resolvendo as equações simultaneamente, permitindo a total integração entre elas e proporcionando um aumento da resolução espacial, conforme Freitas *et al.* (2009).

Sendo o estado da arte as parametrizações dos processos físicos, como os de troca entre atmosfera e superfície, processos turbulentos, convectivos, radiativos e de microfísica de nuvens são resolvidos pelo modelo. O BRAMS contempla várias outras características como um esquema de cúmulos rasos e profundos baseados em uma aproximação do fluxo de massa (GREELL e DENVENYI, 2002), bem como a utilização de umidade do solo com variação diária (GEAVERD e FREITAS, 2006).

O programa LBA (Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia – <http://lba.cptec.inpe.br>), contribuiu fortemente para o aprimoramento dos parâmetros de superfície usados pelo BRAMS, visto que os experimentos realizados no âmbito do projeto geraram uma grandiosidade de

dados que possibilitaram o aprimoramento do modelo para as condições tropicais. As parametrizações da energia cinética turbulenta na Camada Limite Planetária (CLP) e vários outros parâmetros biofísicos, como parametrizações de vegetação e solo para as regiões tropical e sub-tropical brasileiras e seus biomas foram incorporados ao modelo. Além disto, o mapa de uso da terra é oriundo do projeto PROVEG (SESTINI *et al.*, 2002), enquanto os dados relativos aos tipos de solos brasileiros são frutos do projeto RADAMBRASIL (Rossato *et al.*, 2002). Os dados de Índice de Vegetação Normalizado por Diferenças (NDVI) são derivados do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), obtidos do período entre 2001 e 2002, processados pelo “Terrestrial Biophysics and Remote Sensing Lab” (<http://tbrs.arizona.edu>).

## 2.2. CATT-BRAMS

Incluso nas potencialidades do BRAMS encontra-se o Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian development on the Regional Modelling System (CATT-BRAMS), um modelo projetado para simular o transporte e os processos associados com a emissão resultante da queima de biomassa (FREITAS *et al.*, 2009). O CATT-BRAMS é um modelo euleriano de transporte totalmente acoplado ao BRAMS, que simula os processos atmosféricos conforme a evolução temporal do modelo, mas utilizando exatamente o mesmo passo de tempo, bem como as parametrizações físicas e dinâmicas. Este modelo é fundamentado na equação geral de conservação de massa para traçadores, como mostrado abaixo.

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} = \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{adv}}_I + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{CLP\ diff}}_II + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{CONV\ prof}}_III + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}\right)_{CONV\ rasa}}_IV + \underbrace{W_{PM2.5}}_V + \underbrace{R}_{VI} + \underbrace{Q_{pr}}_VII \quad (1)$$

onde

- $\bar{s}$  = razão de mistura média do traçador em um determinado ponto de grade;
- I* = termo de transporte em 3D (advecção média do vento);
- II* = difusão turbulenta na escala de sub-grade na CLP (Camada Limite Planetária);
- III* = transporte na escala de sub-grade por convecção profunda;
- IV* = transporte na escala de sub-grade por convecção rasa;
- V* = termo de remoção de umidade aplicado às partículas finas de aerosol;
- VI* = termo genérico que se refere à deposição seca aplicada aos gases e partículas de aerosol, bem como das transformações químicas do CO;
- VII* = termo de fonte que inclui o mecanismo da pluma associado com as queimadas (FREITAS *et al.*, 2006).

O CATT-BRAMS depende de mapas de emissão de queimadas e qualidade do ar sobre a América do Sul, um produto operacional elaborado pelo CPTEC e disponibilizado diariamente na Internet (<ftp://ftp1.cptec.inpe.br/brams/data-brams/fire-map/>). Por outro lado, os produtos operacionais estão em <http://meioambiente.cptec.inpe.br/>.

### **2.3. TEB-BRAMS**

O modelo de balanço de energia para cidades (TEB – Town Energy Budget) está acoplado ao BRAMS usando uma parametrização de geometria de *canyon* generalizada, o que permite simular a circulação local no interior de cidades e ou regiões metropolitanas onde as emissões de “gases-estufa” são produzidas em grande escala. As simulações deste modelo são realizadas usando uma topografia atualizada e mapas de uso da terra. As ilhas de calor urbanas produzem forte convergência no centro destas regiões, o que acelera as brisas marítimas e terrestres em direção ao interior da cidade. Neste sentido, a utilização deste modelo acoplado ao BRAMS é ferramenta importante para o entendimento do comportamento das circulações locais sobre grandes cidades que se encontram em meio ao ecossistema amazônico.

Nas últimas décadas, houve um significativo aumento na modificação das circulações atmosféricas devido a superfícies heterogêneas. As superfícies asfaltadas das cidades afetam diretamente os fluxos de calor latente, sensível e *momentum*, a convergência em superfície, além da altura, outras características da CLP também são afetadas. Assim como provocam alterações na dispersão de poluentes, inibição de tempestades, propriedades óticas da atmosfera e vários outros processos físicos e químicos no ambiente urbano, conforme resultados observacionais obtidos por Changnon *et al.*, 1971; Oke, 1978; Balling *et al.*, 1990; Morris *et al.*, 2001; Dixon e Mote, 2003. Há também resultados obtidos por meio de modelagem por Sailor (1995); Khan e Simpson, 2001 *apud* Freitas *et al.*, 2007.

O TEB também necessita de dados atualizados das concentrações de gases-estufa, como monóxido de carbono, por exemplo. Para tanto, é necessário que estes dados sejam obtidos como valores diários, semanais e ou mensais, para então serem considerados nos parâmetros de iniciação do modelo.

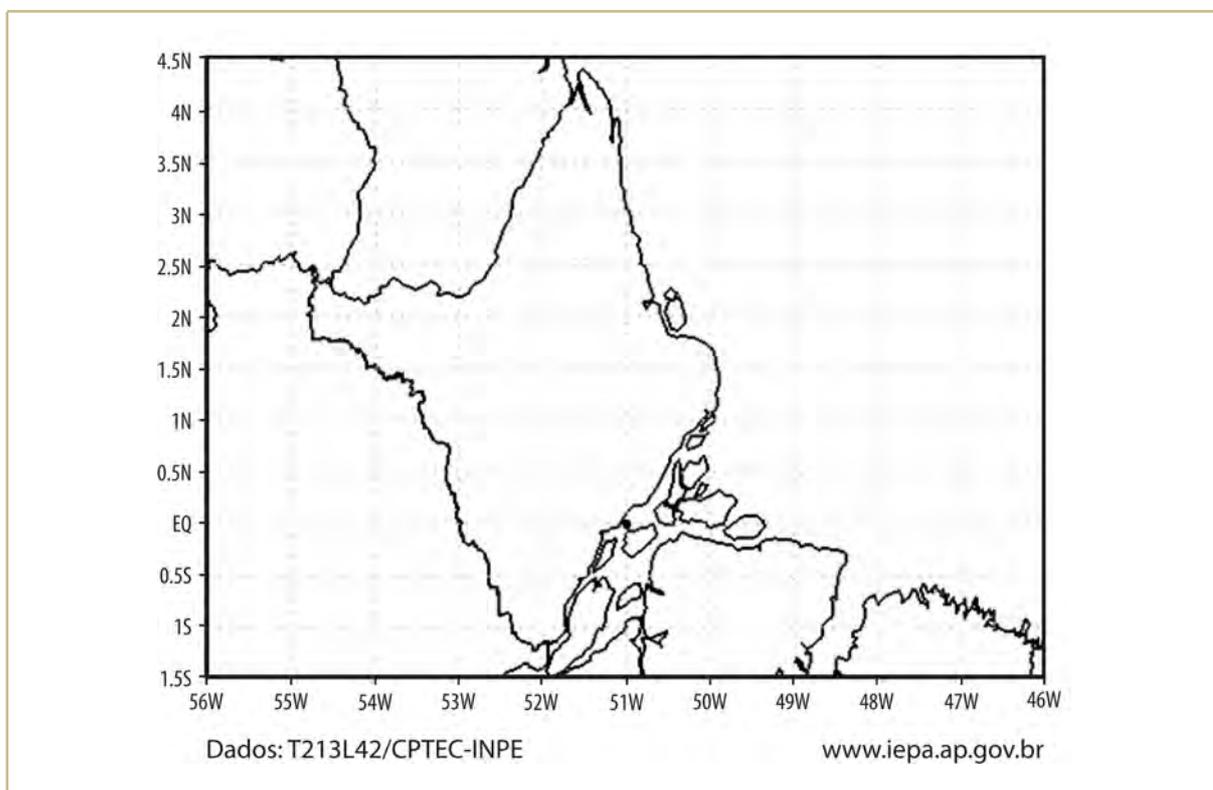
Esta sub-rotina representa uma ferramenta importante para o estudo e compreensão dos fluxos de calor sensível e latente sobre regiões urbanas com áreas razoavelmente grandes, o que apresenta forte contraste com a região em que estão inseridas.

### **2.4. Características do BRAMS/NHMET-IEPA**

O NHMET tem por objetivo providenciar prognósticos numéricos para o Estado do Amapá, e para este fim faz uso da versão 4.2 do BRAMS, a versão mais atualizada e disponível em <http://brams.cptec.inpe.br>.

Considerando as características físicas da região, ou seja, grande área urbana ladeada pela foz do rio Amazonas e pela floresta Amazônica, Macapá é uma cidade de contrastes nas condições de tempo e clima, o que favorece a investigação científica, e por outro lado oferece um desafio aos meteorologistas quanto às futuras projeções do tempo e análises das condições atmosféricas locais.

Para cobrir a totalidade espacial da região estão sendo usadas, no momento, duas rotinas operacionais assimilando dados disponibilizados pelo CPTEC. A área de abrangência do modelo compreende o retângulo com origem em 1,5S – 56W até 4,5N – 46W, correspondendo a 250 pontos de longitude e 160 de latitude com espaçamento em 5 km x 4 km, respectivamente, com 32 níveis verticais, dos quais sete são em profundidades no solo. Os parâmetros de superfície como tipo de solo, vegetação, NDVI, temperatura da superfície do mar (TSM ou SST- Sea Surface Temperature) etc. são aqueles recomendados e disponibilizados pelo sítio de Internet acima citado. O motivo de tal grade é fruto da relação custo computacional x resolução espaço-temporal, considerando que o aumento das resoluções causa um acréscimo significativo no tempo de processamento, o que não pode comprometer a geração e disponibilização dos resultados. A Figura 1 ilustra a área empregada nas rotinas operacionais dos dias atuais.



**Figura 1.** Localização da área em estudo: Estado do Amapá.

A Tabela 1 apresenta o conjunto de opções do modelo em sua versão 4.2, empregada pela REMETAP/NHMET-IEPA. Dentre as opções disponíveis no modelo, as que estão em uso foram

assinaladas com a letra X, podendo haver alterações a partir do momento em que for notada variação significativa positiva.

**Tabela 1.** Resumo de categorias e opções em uso do BRAMS – NHMET/IEPA-REMETAP.

*continua*

CATEGORIA	OPÇÕES	EM USO
Equações básicas	Não-hidrostática – compressível	X
Dimensão	1 D	
	2 D	
	3 D	X
Coordenadas verticais	Cartesiana	
	Seguindo o terreno $S_z$	
	Shaved ETA	X
Coordenadas horizontais	Cartesiana	
	Estereográfica tangente ao plano	X
Grade estruturada e deslocamento	Grade C de Arakawa – uma grade (fixa)	X
	Grade C de Arakawa – múltiplas grades aninhadas (fixas)	
	Grade C de Arakawa – múltiplas grades aninhadas (móveis)	
Diferenciação finita no tempo	Centrado no tempo ( <i>Leapfrog</i> ); de 2a ordem de precisão espacial	X
	Adiantado no tempo ( <i>Forward</i> ); de 2a ordem de precisão espacial.	X
Fechamento da turbulência	Deformação K de Smagorinsky para a horizontal e Mellor e Yamada na vertical	X
	O'Brien K / Blackadar K	
	Deardorff nível 2.5	
Precipitação estável	Sem condensação	
	Condensação	
Parametrização de cumulus	Desativada	
	Kuo modificado (Tremback, 1990)	X
Microfísica explícita	Desativada	
	Microfísica para nuvens quentes	X
	Microfísica de nuvens frias - Nucleação especificada	
	Microfísica de nuvens frias - Nucleação prognosticada	
Radiação	Desativada	
	Onda Curta I – Chen	

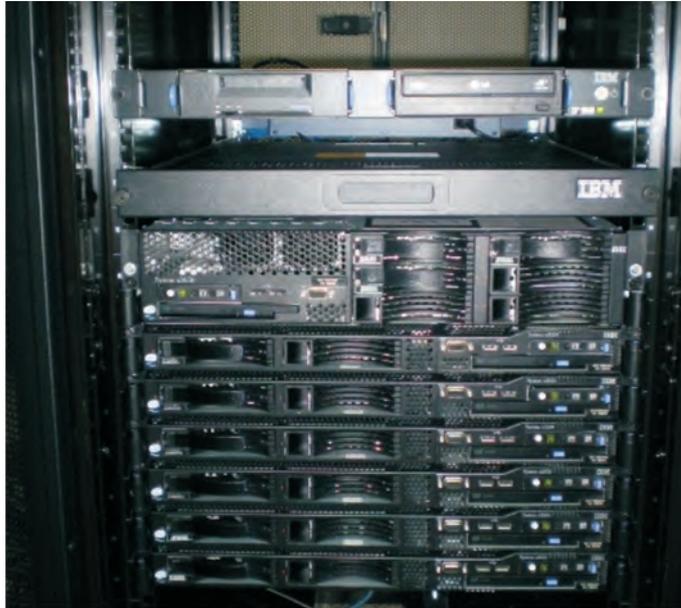
**Tabela 1.** Resumo de categorias e opções em uso do BRAMS – NHMET/IEPA-REMETAP.

		conclusão
CATEGORIA	OPÇÕES	EM USO
	Onda Curta II – Mahrer e Pielke	
	Onda Curta III – Harrington	
	Onda Curta IV – CARMA	X
	Onda Longa I – Chen	
	Onda Longa II – Mahrer e Pielke	
	Onda Curta III – Harrington	
	Onda Curta IV – CARMA	X
Camada superficial	Louis (1979)	X
Fronteira inferior	Especifica as diferenças de temperatura e umidade entre a superfície e o ar	
	Diagnostica os fluxos de umidade e temperatura baseado no modelo de solo	
	Parametrização da vegetação	X
Fronteira superior	Topo rígido	X
	Prognóstico da pressão à superfície	X
	Superfície material	
	Condição radiacional para onda de gravidade	
	Camada de fricção Rayleigh	X
Fronteira lateral	Condição de fronteira radiativa I - Orlanski (1976).	X
	Condição de fronteira radiativa II – Klemp e Wilhelmson (1978 a, b)	
	Condição de fronteira radiativa III – Klemp e Lilly (1978)	
	Condição de fronteira radiativa e MCR (Região de Compensação de Mesoescala)	
Iniciação	Horizontalmente homogêneo (HHI)	X
	HHI mais variações para forçar a iniciação de nuvens	
	Iniciação variável I – NMC ou ECMWF interpolado direto dos pontos de grade.	
	Iniciação variável II – Análise Isentrópica dos dados do NMC ou ECMWF	X
Difusão e transporte	Modulo de dispersão de partículas Lagrangeano.	

## 2.5. Estrutura computacional

A Figura 2 ilustra o *cluster* instalado e em uso no Estado do Amapá (NHMET/IEPA- REMETAP). Nota-se que ele conta com uma estrutura em *rack* expansível, permitindo ampliar sua capacidade computacional, o que representaria ganho de rendimento na execução do modelo, aumento nas

resoluções espacial e temporal, ampliação da área de interesse e/ou ainda execução de rotinas intermediárias para propósitos científicos e ou operacionais como previsões de curto e curtíssimo prazo em áreas críticas.



**Figura 2.** Cluster com seis nodos além de mais um nodo integrador (REMETAP).

O equipamento instalado conta com 36 processadores de 64bits e um total de 36Gb de memória RAM, correspondendo 1Gb por processador. Cada nodo deste sistema dispõe de um disco rígido do tipo Serial Attached SCSI (SAS) de 146Gb, enquanto o nodo integrador (master) possui um disco rígido SAS de 146Gb e dois serial ATA (SATA) de 500Gb de capacidade. O cluster ainda é dotado de um sistema de armazenamento em massa com capacidade bruta total de 16Tb, o que representa uma capacidade líquida de aproximadamente 4Tb, com um fator de redundância de 4:1. Ou seja, permite haver sinistro em até quatro discos sem que haja perda de dados.

A fim de operacionalizar este sistema, adotou-se o sistema operacional de código aberto openSUSE (<http://www.opensuse.org>). Essa opção deveu-se à simplicidade de instalação e gerenciamento aliados ao vasto conjunto de programas disponibilizados nos seus repositórios oficiais, garantindo o sucesso na operacionalização da modelagem numérica. Para tanto, está sendo usada a versão 11.0 do openSUSE, a qual apresenta notável estágio de maturidade minimizando a ocorrência de falhas, o que comprometeria a operação do modelo. Assim como o sistema operacional, os demais programas como compiladores das linguagens C, FORTRAN, gerenciadores de processos e demais bibliotecas necessárias no processo de compilação do modelo são também programas de código aberto sob

licença GNU/GPL (<http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>). Tais características minimizam os custos, de modo que o sistema se torna acessível aos grupos emergentes.

## 2.6. Descrição da operação

O BRAMS é constituído de um conjunto de vários módulos, cada um com suas características. É necessário que os parâmetros de entrada do modelo, bem como os dos modelos acoplados, estejam listados em um arquivo de entrada chamado de RAMSIN. Este arquivo é necessário para as fases de execução do modelo, ou seja, as primeiras estruturam as condições das fronteiras inferior, superior e laterais da área de estudo, e a última fase é quando o modelo é executado para gerar os prognósticos finais.

A Figura 3 resume de maneira bastante simples as etapas necessárias para a execução do modelo BRAMS. A partir do momento em que se dispõe de arquivos de iniciação do modelo oriundos do CPTEC no formato GRIB (dados processados como valores reticulares, expressos em forma binária), eles precisam ser convertidos para o formato de assimilação do BRAMS. Este processo é explicado e exemplificado nos documentos tutoriais encontrados em <http://brams.cptec.inpe.br>. Uma vez realizada esta conversão é necessário criar os arquivos que corresponderão às condições de superfície para o modelo como umidade do solo, topografia, vegetação, temperatura da superfície do mar, ndvi etc. Neste segundo passo é usado o valor MAKESFC para a variável RUNTYPE do arquivo RAMSIN (*namelist*). Em uma próxima etapa, a variável RUNTYPE existente no arquivo RAMSIN é alterada para o valor MAKEVFILE. Neste passo são processadas as condições de contorno de grade para cada tempo de integração e por final a variável RUNTYPE do arquivo de parâmetros recebe o valor INITIAL, que é usado para a última fase, isto é, a integração final do modelo. Este passo pode ser realizado de duas maneiras: em modo serial ou paralelo. O primeiro ocorre utilizando apenas um processador do computador em uso, enquanto o segundo utiliza vários processadores em um mesmo computador ou de vários computadores interligados, como é o caso aplicado neste trabalho por meio do *cluster* descrito anteriormente.

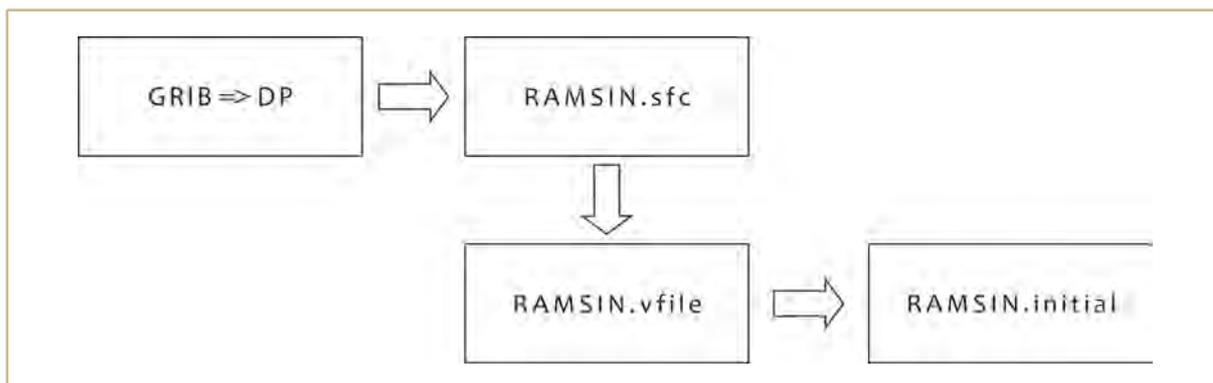


Figura 3. Modelo esquemático para execução do BRAMS.

A execução do modelo em paralelo ocorre por meio de programas de gerenciamento de processos que permitem a utilização de múltiplos processadores. Isto pode ocorrer de duas maneiras: (a) o programa a ser executado é compilado normalmente e o gerenciador de processo o distribui para os diversos processadores do *cluster*. Este procedimento permite utilizar praticamente qualquer aplicação em paralelo, porém, apresenta um custo computacional relativamente alto, uma vez que o gerenciador necessita realizar inúmeras tarefas de distribuição e reintegração a cada passo de tempo durante a execução do programa; (b) no caso do BRAMS, o código do modelo é escrito em FORTRAN 90, ou seja, é totalmente escrito em uma linguagem de programação voltada para a computação paralela, e isto o torna perfeito para a utilização em *clusters*, deixando o gerenciador de processos com menos tarefas e permitindo um baixo custo computacional. O gerenciador de processos utilizado amplamente com o BRAMS é o MPI (Message Processes Interface) e, assim como o registro acerca de sua documentação, este programa pode ser obtido em <http://www.mcs.anl.gov/mpi/mpich1>.

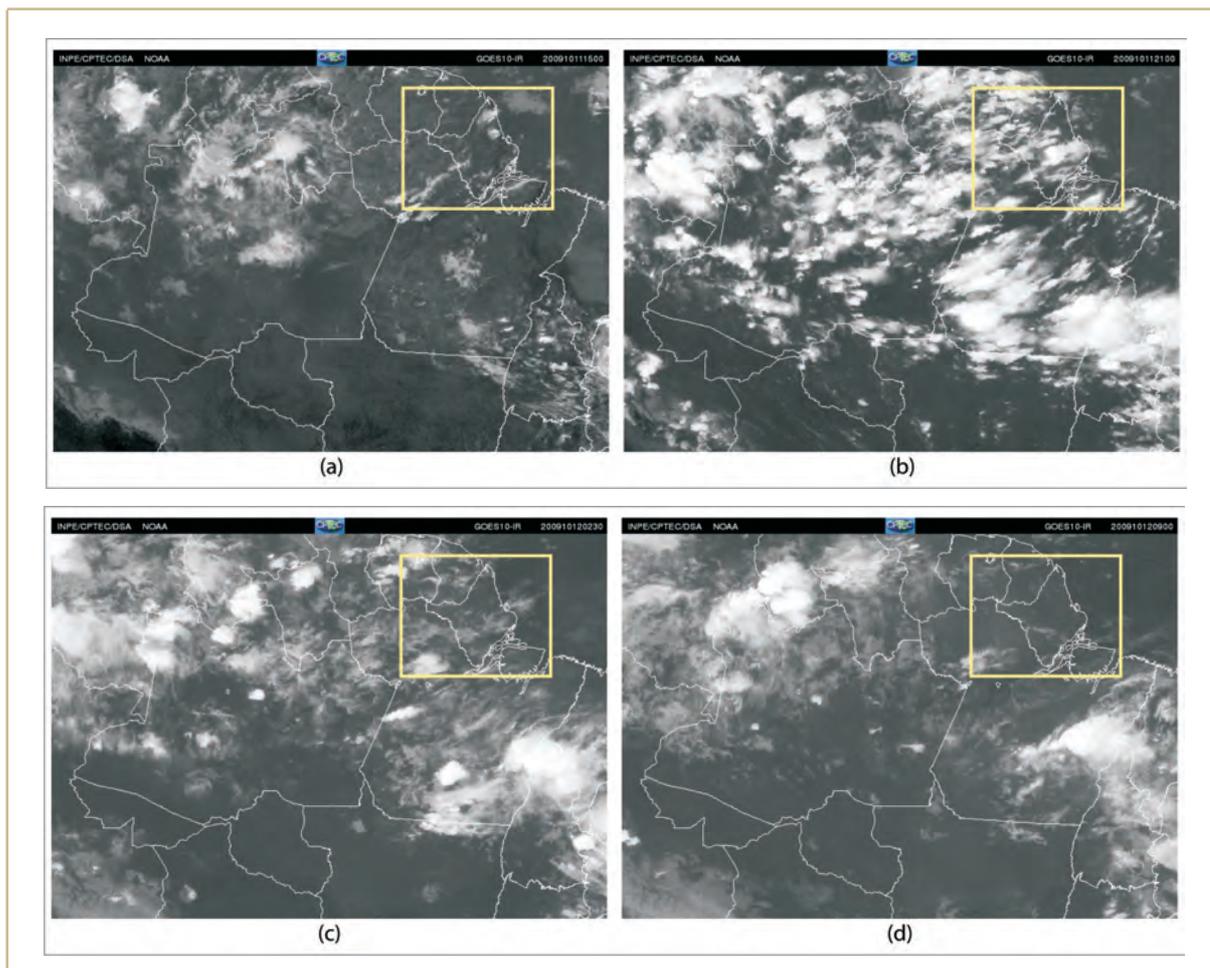
Na fase de pós-processamento, isto é, após realizadas as etapas de execução do modelo e geração dos respectivos arquivos relativos aos prognósticos, é momento de gerar os produtos finais a serem disponibilizados para a comunidade (usuários). Para a geração destes produtos em forma de campos meteorológicos é usado o programa GrADS, apropriado para trabalhar com dados científicos e amplamente empregado em pós-processamento da modelagem numérica aplicada a previsão do tempo (DOTY e KINTER, 1992). Assim como os demais aplicativos utilizados neste projeto, o GrADS também é regido pela licença GNU/GPL e pode ser obtido juntamente com sua documentação em <http://grads.iges.org>.

### 3. RESULTADOS

Neste estudo foram gerados os seguintes produtos meteorológicos apresentados de forma espacializada (campos): (a) precipitação; (b) vento em diversos níveis atmosféricos; (c) temperatura do ar em superfície; (d) umidade relativa do ar; (e) vento no nível de 925hPa associado com a precipitação. Com a ativação do modelo acoplado CATT-BRAMS, tem-se a distribuição de monóxido de carbono (CO), o CO antropogênico (COANT), aerossóis (PM<sub>25</sub>). Além dos produtos mencionados, vários outros poderão ser gerados de acordo com as necessidades operacionais e ou de investigação científica que ocorrerem, visto que há uma enorme flexibilidade no sistema implantado.

Com a finalidade de ilustrar o desempenho do modelo foram analisados campos básicos adotados na rotina operacional de previsão do tempo, isto é, precipitação associada com vento no nível de 925hPa, umidade relativa e temperatura próxima à superfície. Estes campos foram comparados com as imagens de satélite do mesmo dia (11 de outubro de 2009) com o objetivo de equiparar os resultados observados com os simulados (previsão). Deste modo, foi inicializada uma análise das imagens de satélite para o

período considerado para se obter um ponto de partida da análise de rendimento e acurácia do BRAMS. É importante observar que a data do experimento foi tomada aleatoriamente e corresponde ao período de estiagem, isto é, o “verão” amazônico.



**Figura 4.** Imagens de satélite geoestacionário GOES-W sobre a região norte no Brasil para o dia 11 de outubro de 2009: (a) 11/10/2009 -1800UTC; (b) 12/10/2009 -0000UTC; (c) 12/10/2009 -0600UTC; 12/10/2009 -1200UTC.

A Figura 4 ilustra quatro imagens de satélite oriundas do DSA/CPTEC (Divisão de Satélites Ambientais). O satélite é o GOES 10 (Geostationary Orbital Environmental Satellite). A área de abrangência do modelo é demarcada por um retângulo. Nesta área foi realizada a análise comparativa. Na primeira imagem, Figura 4a, que corresponde ao horário das 1800UTC, percebe-se a formação das primeiras nuvens formadas pelo transporte de umidade oriunda do oceano adjacente que, ao encontrar uma superfície mais aquecida, se eleva e condensa. Este fenômeno é bastante típico na região norte do Brasil, isto é, formação de linhas de instabilidade paralelas à costa, conforme é descrito nos trabalhos de Cohen (1989) e Cohen *et al.* (1995). Esta situação é iniciada nas primeiras horas da manhã e nas regiões próximas da costa provê precipitação nos horários em torno do meio-dia, podendo haver atrasos inerentes às

condições sazonais, como o deslocamento da ZCIT (Zona de Convergência Inter-Tropical). Deste modo, a sequência das imagens mostra esta situação. Ou seja, um aumento da nebulosidade ao longo do dia indicando condições de precipitação sobre grande parte do Estado do Amapá.

A seguir é mostrado um conjunto de campos meteorológicos que ilustram o prognóstico gerado pelo modelo com iniciação às 1200UTC do dia 11 de outubro de 2009. Este prognóstico foi gerado para um período de 36 horas a partir do horário de iniciação.

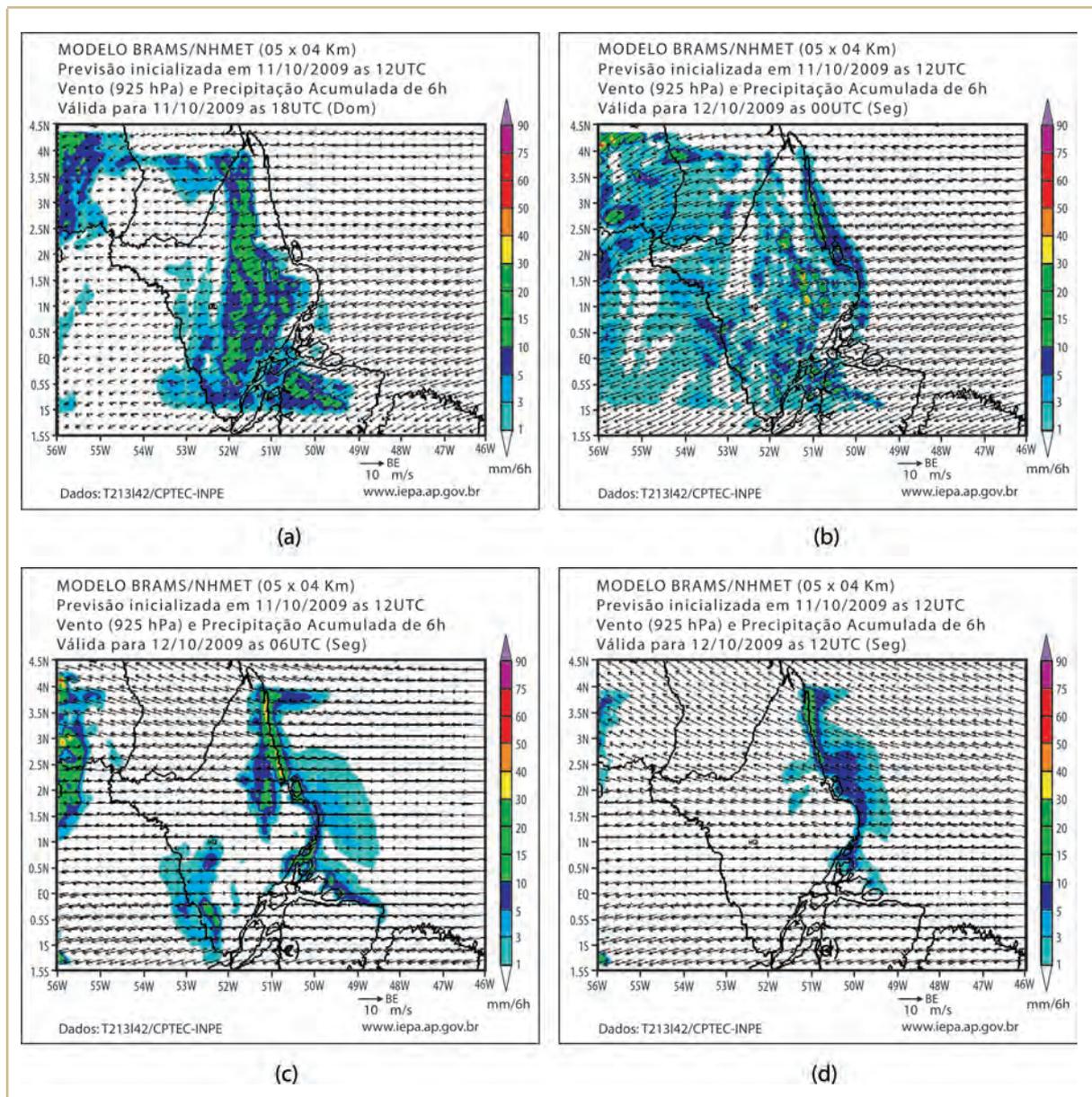
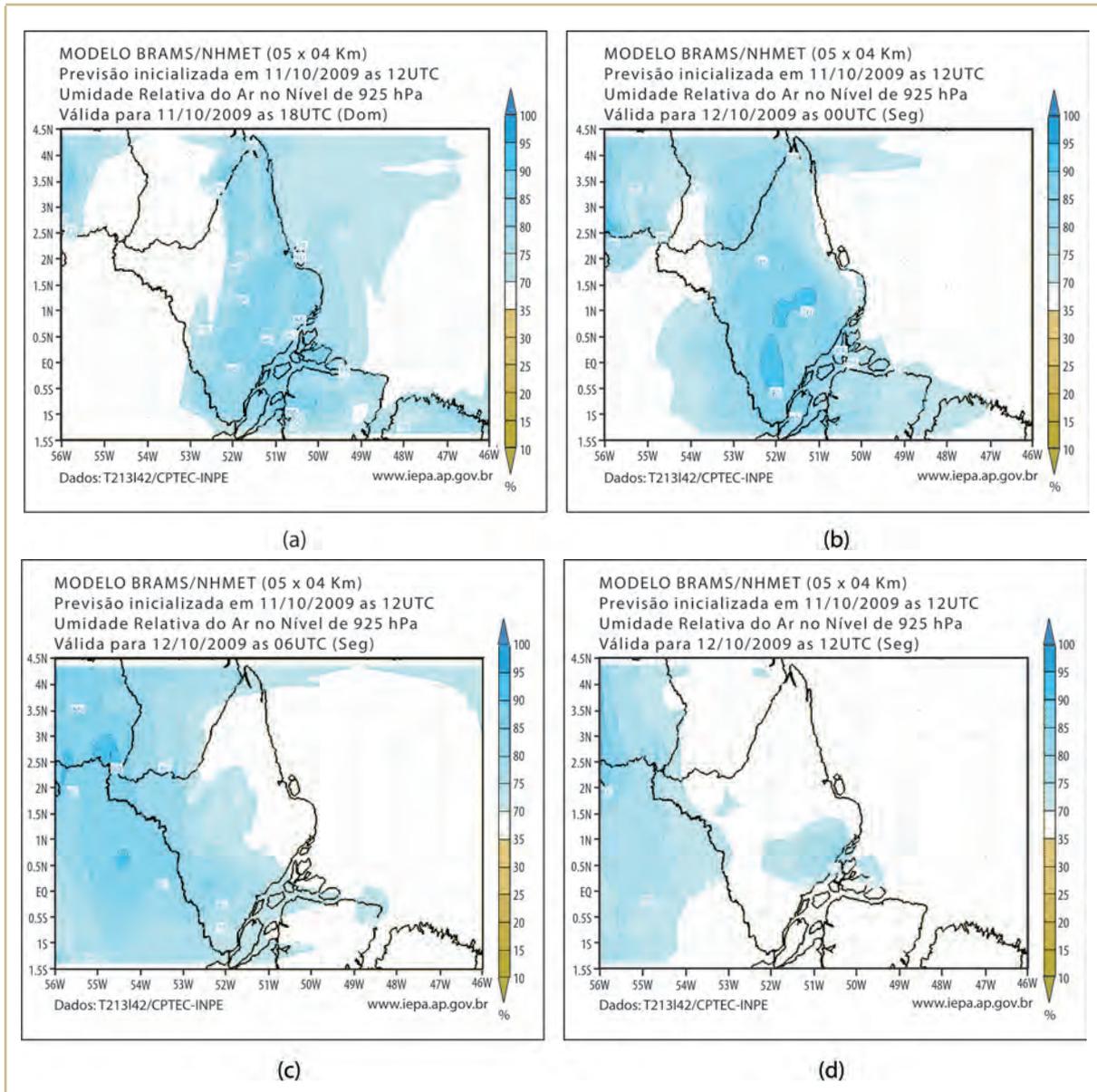


Figura 5. Campos meteorológicos de precipitação e vento no nível de 925hpa.

Na Figura 5 são mostrados os campos de precipitação acumulada de seis horas associados com vento em 925hPa, nos quais se verifica que o modelo é bastante capaz de representar o comportamento típico do regime de ventos da região. Ou seja, ventos controlados basicamente pela influência dos contrastes térmicos entre continente e a região oceânica adjacente, o que configura as situações de brisas marítima e terrestre. A Figura 5a mostra o campo de precipitação acumulada para o período entre o início da integração e às 1800UTC, o que representa 14 horas no horário local. Nesta situação se observa que o modelo prevê condições de ocorrência de chuva sobre a região central do Amapá, enquanto o campo de vento mostra a forte descontinuidade provocada pelo forte contraste térmico existente na região. A Figura 4c, relativa ao período seguinte, apresenta condições de precipitação bastante generalizada sobre o Estado, conforme pode ser observado na imagem de satélite para o mesmo período mostrado anteriormente na Figura 4d. No decorrer do período, conforme é ilustrado nas Figuras 5c e 5d, o modelo continua representando com acurácia as condições de tempo ocorridas naquele dia.

As condições de superfície na grade utilizada são bastante balanceadas, de modo que a proporcionalidade entre as áreas continentais e oceânicas foi mantida, o que permite que os processos físicos que ocorrem na atmosfera possam ser bem representados pelo modelo.



**Figura 6.** Campo meteorológico de umidade relativa.

Com a finalidade de verificar as condições favoráveis à formação de nuvens é importante analisar vários campos simultaneamente, como o de umidade relativa associado aos demais. A seguir, é realizada uma análise no campo da umidade relativa a fim de mostrar esta situação.

A importância de ter o campo de umidade relativa deve-se à compreensão de que o meteorologista tem da condição de tempo no instante em que está interessado. Sendo assim, caso a atmosfera se encontre muito seca, a probabilidade de chover será menor uma vez que existe menos vapor d'água disponível para condensar e formar nuvens.

A Figura 6 ilustra este campo meteorológico no qual se pode verificar novamente a variação da umidade relativa sobre o continente ao longo do dia e que reflete a situação ocorrida. A umidade existente em baixos níveis atmosféricos, por estar mais quente que o ar adjacente, tende a elevar-se até atingir altitudes em que o ar está mais frio, fazendo com que este ar úmido condense e forme nuvens. A situação encontrada na sequência mostrada na Figura 6a e 6d ilustra bem esta situação: conforme o aumento da umidade relativa do ar, as primeiras nuvens começam a se formar.

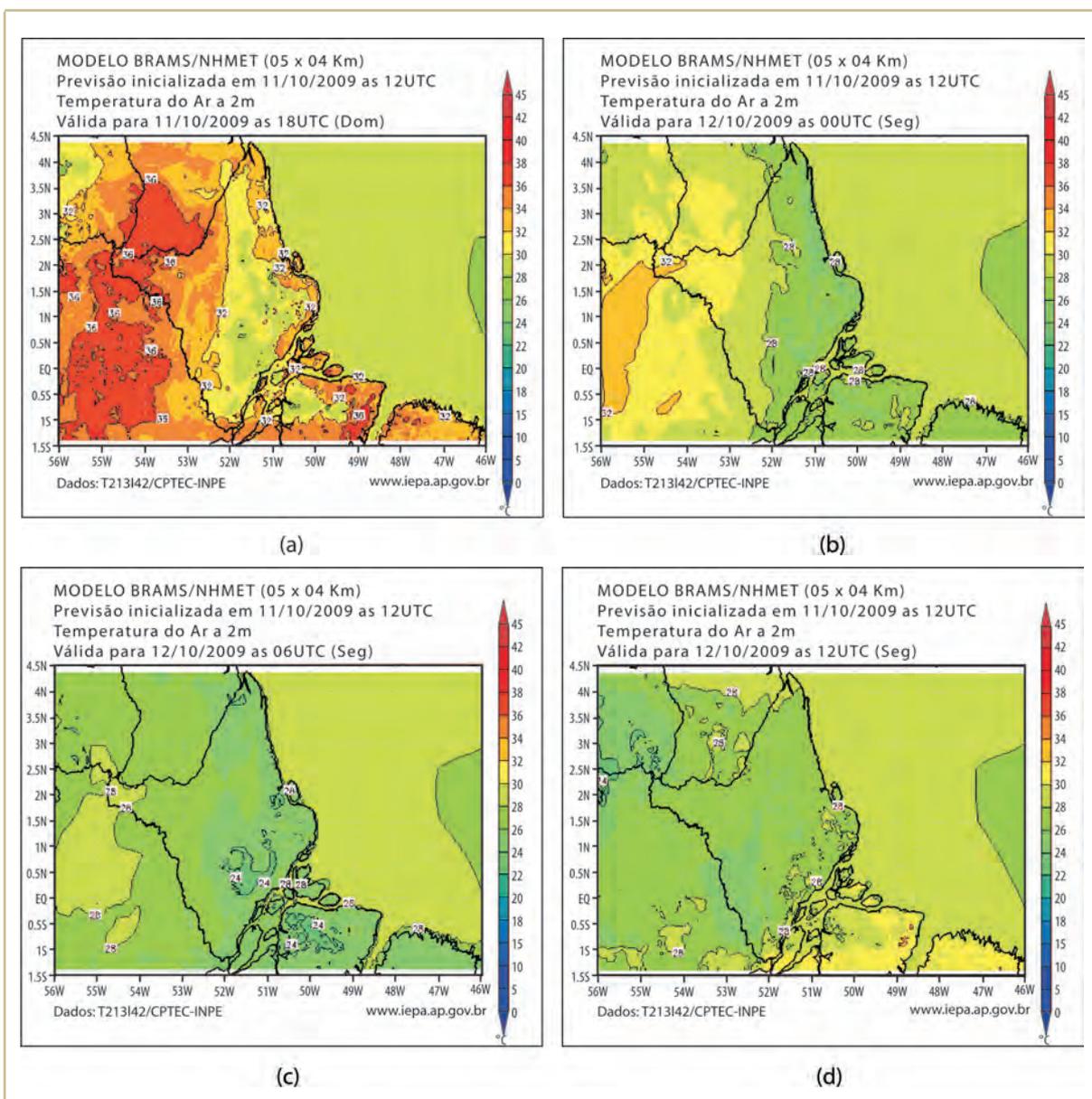


Figura 7. Campo meteorológico de temperatura do ar.

A região compreendida pela grade adotada apresenta fortes contrastes de umidade, dado que se encontra próxima de grandes rios e parte banhada pelo Oceano Atlântico. Estas características fazem com que a região seja influenciada pela oscilação da maré, que causa, em alguns casos, um fluxo contrário em alguns rios da região provocando alagamentos na várzea. Este comportamento resulta em aumento da área alagada, que ao longo do dia causa uma sensível elevação da umidade do ar. Este fato favorece o aumento das taxas de evaporação e evapotranspiração e, por consequência, o aumento de nebulosidade e respectiva precipitação.

O vapor d'água é um dos constituintes atmosféricos mais eficientes na retenção da radiação de onda longa, ou seja, calor (LIOU, K. -N, 1980; GOODY e YUNG, 1989). Baseado nesta informação e com o que foi exposto anteriormente em relação à Figura 6, é possível entender melhor o que é ilustrado na Figura 7. Ou seja, com este aumento de umidade próximo à superfície é esperado que haja também o aumento de temperatura, pois ela é dependente da concentração de umidade, tendo em vista que a região está sobre a linha do equador, recebendo um máximo de insolação e elevando a temperatura da superfície. Sendo assim, nota-se que há forte influência da umidade, que por sua vez é influenciada pelo regime de ventos da região, como pode ser observado na Figura 5.

Na Figura 7 percebe-se nitidamente um gradiente de temperatura bastante zonal, evidenciado pelo contraste térmico entre as áreas continental e marítima adjacente. Este gradiente se mantém num ciclo que varia desde as primeiras horas da manhã estendendo-se até a noite, quando ocorre a inversão da brisa – o que permite perda radiativa do continente e, portanto, diminuição da temperatura à superfície, retornando no dia seguinte. Esta característica faz com que o período do dia em que ocorrerá chuva seja conhecido, ou pelo menos seja bastante aproximado quando comparado de um dia para o outro no período de estiagem.

As características regionais oferecem desafios e benefícios simultâneos. No caso citado pode ser um benefício conhecer com relativa acurácia a ocorrência ou não de chuva. Porém, ao mesmo tempo isto pode ser um desafio, pois mecanismos de grande escala, como a ZCIT, influenciam significativamente as condições de tempo e clima na região, de modo que as chuvas deixam de ocorrer em períodos “conhecidos” passando a ocorrer a qualquer momento. E isto ainda é fonte de investigação futura.

#### 4. CONCLUSÕES

O presente texto trata da descrição técnica, passo a passo, do processo de sistematização operacional de previsão de tempo no NHMET/IEPA-REMETAP. Assim, percebe-se que o modelo BRAMS representa com relativa precisão as principais condições meteorológicas regionais, embora se tenha usado apenas um único dia para exemplificar a análise dos campos de precipitação, umidade relativa, temperatura e vento. Esta fase inicial de operação é condição fundamental para a fase seguinte de testes e de seu funcionamento operacional definitivo.

Deste ponto de partida, todavia, é possível agregar gradativamente conhecimentos adicionais com o objetivo de melhorar o desempenho do modelo, principalmente reduzindo o custo computacional. Nestes casos, quando o custo computacional é otimizado, é possível reverter o processo em direção do aumento de resolução espacial e(ou) temporal, o que definitivamente representa um ganho na capacidade de análise de variáveis meteorológicas relacionadas à previsão do tempo.

A resolução espacial utilizada na grade operacional pode ser considerada alta levando-se em conta a região referente ao projeto. Porém, deve-se ressaltar que alguns processos físicos que ocorrem na atmosfera apresentam características físicas que se ajustam bem nesta resolução, possibilitando a inclusão de sub-grades nas rotinas adotadas.

Em termos de rendimento computacional do *cluster*, foram obtidos valores otimizados bastante significativos quanto ao tempo de processamento. Foi observado que desde o momento inicial do processo de execução da rotina operacional, cujo intervalo de tempo de integração padrão é de 96 horas, o tempo total de execução foi de seis horas, 23 minutos e 52 segundos. A fase de execução de pós-processamento custou em torno de um minuto e 30 segundos. Estes períodos de tempo foram considerados ótimos, levado em conta o tipo de equipamento que se dispõe, isto é, um *cluster* com 36 processadores. A ampliação da capacidade de processamento refletiria possivelmente na redução do custo computacional.

Por fim, pode-se afirmar que a estrutura operacional instalada pela REMETAP/NHMET-IEPA pode contribuir fortemente com a sistemática de previsão do tempo com qualidade no Estado do Amapá, resultado do esforço conjunto das redes interinstitucionais regionais e nacionais, dotadas de equipes técnicas multidisciplinares envolvidas em toda a cadeia do conhecimento da previsão numérica. Estas, por sua vez, possibilitaram um avanço fantástico no estado da arte da previsão regional amapaense, principalmente porque está voltada para as condições físicas e operacionais específicas do Estado do Amapá, com foco no usuário de serviços e produtos customizados e preparados sob medida para atender amplas demandas por serviços especializados do setor.

## 5. AGRADECIMENTOS

Deve-se um especial agradecimento aos órgãos de fomento CNPq e FINEP, que possibilitam os investimentos de apoio à pesquisa no Estado do Amapá e que contribuem continuamente para o desenvolvimento científico e tecnológico no país. Ao Dr. Jairo Panetta e sua equipe pelo contínuo esforço no desenvolvimento do BRAMS que hoje é o estado da arte em computação paralela e como ferramenta operacional, ao Dr. Saulo Freitas responsável pelo desenvolvimento do CATT-BRAMS e inerentes valorosas contribuições, além dos vários pesquisadores da Rede REMETAP, RPCH, REMAM, que desde o início não mediram esforços para o melhoramento do sistema de previsão de tempo e clima na Amazônia.

## 6. REFERÊNCIAS

- BALLING, R. C., J. A. Skindlov, D. H. Philips: *The impact of increasing summer mean temperature on extreme maximum and minimum temperatures in Phoenix, Arizona*. *J. Climate*, 3, 1491-1494, 1990.
- BRAMS/CPTEC: *Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos*. Disponível em: <<http://brams.cptec.inpe.br/>>. Acessado em: 04 Set. 2009, 10:30:00.
- CHANGNON, S. A., F. A. Huff, R. G. Semonin: *METROPEX: an investigation of inadvertent weather modification*. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 52, 958-968, 1971.
- COHEN, J. C. P. *Um Estudo observacional de linhas de instabilidade na Amazônia*. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1989.
- COHEN, J. C. P., M. A. F. SILVA DIAS e C. NOBRE, 1995: *Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study*. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 3163-3174.
- CUNHA, A. C.: *Rede Amapaense de Meteorologia e Recursos Hídricos (REMETAP) e a consolidação do Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis (NHMET/IEPA)*. *A Meteorologia na Amazônia se Organiza*. São Paulo – SP. Boletim SBMET. V. 14, N. 2, p. 14-19. 2007.
- DIAS, Maria Assunção F. Silva: *Modelagem numérica da atmosfera: O papel das parametrizações*. Disponível em: <<http://www7.cptec.inpe.br/brams>>. Acessado em: 28 Set. 2008, 15:20:42.
- DIXON, P. G., e T. Mote: *Patterns and causes of Atlanta's urban heat island – initiated precipitation*. *J. Appl. Meteorol.*, 2, 1273-1284, 2003.
- DOTY, B. and J.L. Kinter III, 1992: *The Grid Analysis and Display System (GrADS): A practical tool for each science visualization*. *Eighth International Conference on Interactive Information and Procession Systems*, Atlanta, Georgia, 5-10 January, 1992.
- FAZENDA, Álvaro L. Moreira, Demerval S. Enari, Eduardo H. Panetta, Jairo. Rodrigues, Luiz F.: *First Time User's Guide (BRAMS Version 4.0)* Disponível em: <<http://www7.cptec.inpe.br/brams>> Acesso em: 28 Set. 2008, 15:30:18.
- FREITAS, S. R., K. M. Longo, M. O. Andreae: *Impact of including the plume rise of vegetations fires in numerical simulations of associated atmospheric pollutants*. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L17808, doi: 1029/2006GL026608, 2006.
- FREITAS, E., C. M. Rozoff, W. R. Cotton, e P. L. Silva Dias: *Interactions of an urban island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo*. *Boundary-Layer Meteorol.*, 122, 43-65, doi: 101007/S10546-006-9091-3, 2007.
- FREITAS, S. R., K. M. Longo, M.A. F. Silva Dias, R. Chafield, P. Silva Dias, P. Artaxo, M. O. Andreae, G. Grell, L. F. Rodrigues, A. Fazenda, and J. Panetta: *The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System) CATT-TRAMS – Part 1: Model description and evaluation*. *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 2843-2861, 2009.
- GEAVERD, R. and S. R. Freitas: *Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera. Parte 1: Descrição da metodologia e validação*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21, 3, 1-15, 2006.

- GOODY, R. M. and Y. L. Yung: *Atmospheric Radiation: Theoretical Basis*. 2.ed. Oxford University Press, New York, 1989.
- GRELL, G. and D. Deveany: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Let.*, 29(14), doi: 10.1029/2002GL015311, 2002.
- IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acessado em: 11 de outubro de 2009, 16:00.
- KHAN, S. M., e R. W. Simpson: *Effect of the heat island on the meteorology of complex urban airshed*. *Boundary-Layer Meteorol.*, 100, 487-506, 2001.
- LIOU, Kuo-Nan: *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press, New York, 1980.
- MORRIS, C. J. G., I. Simpson, e N. Plummer: Quantification of the influences of Wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. *J. Appl. Meteorol.*, 40, 169-182, 2001.
- OKE, T. R.: *Boundary layer climates*. 2ed. Rutledge, London e New York, 435p, 1978.
- ROSSATO, L. R. Alavalá, e J. Tomasella: Climatologia da umidade do solo no Brasil. *Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*. 1910-1915, 2002.
- SANTIN, M M: *Operacionalização do Modelo BRAMS Aplicado à Previsão do Tempo, Agricultura e Pesquisa*. 2006. 55f. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- SAILOR, D. J. Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover. *J. Appl. Meteorol.*, 34, 1694-1704, 1995.
- SESTINI, M., E. Reimer, D. Valeriano, R. Alvalá, E. Mello, C. Chan, e C. Nobre: Mapa de cobertura da terra da Amazônia legal para uso em modelos meteorológicos. *Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 2901-2906, 2003;
- TRIPOLI, G. and W. Cotton: The Colorado State University three-dimensional cloud-mesoscale model. Part I: General theoretical framework and sensitivity experiments. *J. Res. Atmos.*, 16, 185-219, 1982.



## Características Hidroclimáticas da Bacia do Rio Araguari (Ap)

**Msc. Met. Leidiane Leão de Oliveira**

leidianeoli@gmail.com

Doutoranda do Programa de Pós-Graduação da Biodiversidade Tropical Pós-Graduação PPGBio da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP).

**Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha**

alancunha@unifap.br

Ex-coordenador do NHMET/IEPA, coordenador do Projeto REMETAP, Prof. do curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e Programa de Pós-Graduação PPGBio/PPGDAPP-UNIFAP.

**Msc. Met. Edmir dos Santos Jesus**

edmir.jesus@iepa.ap.gov.br

Msc. em Meteorologia. Coordenador do Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis do Amapá (NHMTE-IEPA).

**Msc. Met. Naurinete Jesus da Costa Barreto**

naurinete.barreto@iepa.ap.gov.br

Msc. em Meteorologia Bolsista MCT/CNPq-DTI do Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis (NHMET-IEPA).

**Resumo.** O objetivo deste capítulo constitui-se no levantamento de parâmetros hidroclimáticos na bacia do rio Araguari, a maior e mais importante do Estado do Amapá. Trata-se de uma análise de importância estratégica relacionada à regiões geográficas vocacionadas tanto para setores ambientais (conservação da biodiversidade) quanto para atividades antropogênicas (hidrelétricas). Neste caso, foi realizada uma análise hidrometeorológica na bacia hidrográfica do rio Araguari empregando uma metodologia que consistiu na utilização de dados pluviométricos e de temperatura do ar disponíveis em uma série histórica do sítio da University of Delaware (UDEL). Parâmetros geográficos foram discretizados e georreferenciados a partir dos dados disponíveis em grade com  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  (CDC/CIRES/NOAA). A série histórica dos dados utilizados compreendeu o período entre 1979 e 2006. Uma das principais análises realizadas no estudo foi o Balanço Hídrico na Bacia Hidrográfica (THORNTHWAITE e MATHER, 1955), a partir do uso de uma planilha eletrônica do tipo “BHnorm”, elaborada por Rolim et al. (1998) e Sentelhas et al. (1999). Posteriormente foram processados os dados mensais de temperatura média do ar e da precipitação pluviométrica, as coordenadas geográficas, a altitude e o CAD (Capacidade de Água Disponível, com referência de 100 mm). Os principais resultados indicaram que o clima da região é fundamentalmente caracterizado por duas estações bem definidas: a seca (período menos chuvoso), que se estende de julho a novembro, e a chuvosa, que se estende de janeiro a junho. A deficiência hídrica anual tende a ocorrer no período seco, no qual ocorre uma efetiva diminuição das chuvas, também associada à elevada disponibilidade de energia solar que atua no processo evaporativo e ao posicionamento de sistemas de grande escala como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Estes fatores hidroclimáticos governam e limitam a oferta de água no solo. Neste aspecto, foi observado quatro meses de deficiência hídrica ao longo do ano (agosto a novembro). Como conclusão, o presente estudo pode ser considerado uma contribuição aos projetos hídricos na bacia do rio Araguari. Contudo, a efetividade de gerenciamento na bacia hidrográfica só pode ocorrer quando uma grande quantidade de dados sobre a variabilidade espaço-temporal das variáveis hidrometeorológicas estiverem disponíveis e adequadas aos objetivos de gerenciamento de recursos hídricos. Por outro lado, o resultado mais relevante deste tipo de estudo é que se pode dispor de previsões hidrológicas mais precisas e proporcionar um melhor gerenciamento global na bacia hidrográfica do rio Araguari a partir do conhecimento básico de seu ciclo hidrológico. Esse conhecimento pode ser aplicado a inúmeras soluções de problemas práticos de interesse social e ambiental.

**Palavras-Chave:** Hidroclimatologia, Balanço Hídrico, Bacia hidrográfica do rio Araguari-AP.

# 1. INTRODUÇÃO

Este capítulo constitui-se no levantamento de informações importantes de parâmetros hidroclimáticos na bacia hidrográfica do rio Araguari (AP). O objetivo principal do estudo é contribuir para a descrição mais detalhada e precisa possível para proporcionar aos interessados no tema um panorama espaço-temporal do comportamento hidroclimático na bacia, em especial para registrar algumas das características físicas mais relevantes do seu ciclo hidrológico.

Geralmente os dados de chuva disponíveis não são muito numerosos, apesar de serem relativamente mais abundantes que as demais informações hidrométricas das bacias hidrográficas, normalmente solicitadas para projetos hidráulicos, o que ocasiona erros nas avaliações realizadas por métodos estatísticos, vistos que têm de partir de pequenas amostras (HOLTZ, 1973). Neste caso, um dos estudos complementares e relevantes realizados na bacia hidrográfica foi o inventário hidrelétrico da ANEEL, executado em parceria com a Eletronorte (AP), datado do ano de 2000. Neste caso, o objetivo seria o monitoramento da UHECN e a instalação de novos aproveitamentos hidrelétricos na bacia do Araguari. Nestes termos, estudos complementares que avaliam potenciais impactos de empreendimentos hidrelétricos na variabilidade hidrológica foram realizados por Bárbara (2006); Pereira *et al.* (2006); Brito (2008); Cunha (2009).

Segundo Ávila *et al.* (1999), as grandes restrições impostas ao avanço da hidrologia dependem em grande medida da disponibilidade de dados adequados para a construção e validação de modelos hidrológicos, papel que o sensoriamento remoto pode e deve representar. Neste caso, os referidos autores apontam três razões que apoiam a aquisição de dados por meio de sensores remotos: a) habilidade de adquirir dados espacializados em lugar de observações pontuais; b) potencial para obter dados sobre o estado da superfície terrestre em grandes extensões (precipitação, umidade do solo, água subterrânea, evapotranspiração, água de superfície e características fisiográficas das bacias; e c) habilidade para, fundamentado nos registros dos sensores, permitir a reconstrução de séries históricas.

No presente estudo justifica-se uma análise hidroclimática na bacia hidrográfica obtida a partir de análises por sensoriamento remoto, principalmente no que tange ao papel do ciclo hidrológico e suas repercussões sobre as diversas atividades humanas, dentre as mais relevantes a variabilidade espaço-temporal hidroclimática (precipitação e temperatura) e suas implicações relacionadas aos estudos de impactos ambientais em trechos específicos do rio Araguari. Alguns procedimentos metodológicos podem ser úteis em subsidiar tomadas de decisões referentes simplesmente à hidrologia ou aos fatores abióticos de estudos de impactos ambientais para construção de hidrelétricas.

Neste sentido, os processos físicos de interesse estão relacionados ao ciclo hidrológico e sua complexa interação entre superfície-vegetação-atmosfera, particularmente na sua influência sobre os ecossistemas terrestres e aquáticos. Tais componentes do ciclo hidrológico podem ser representados pela transpiração e evapotranspiração, interceptação, escoamento superficial e subterrâneo etc., cujas

interações são importantes no balanço hídrico da bacia e no fornecimento atmosférico de vapor d'água. Neste aspecto, há inúmeros estudos que apontam para o importante papel da superfície vegetada, notadamente a floresta tropical, como fator regulador da hidrologia e do ecossistema da bacia, ao manter um alto fluxo de vapor d'água para a atmosfera durante todo o ano por meio da evapotranspiração (DICKINSON, 1987; BONELL e BALEK, 1993; GASH *et al.*, 1995; OLIVEIRA, 2007).

## 2. MATERIAL E MÉTODO

### 2.1. Avaliação Hidrometeorológica

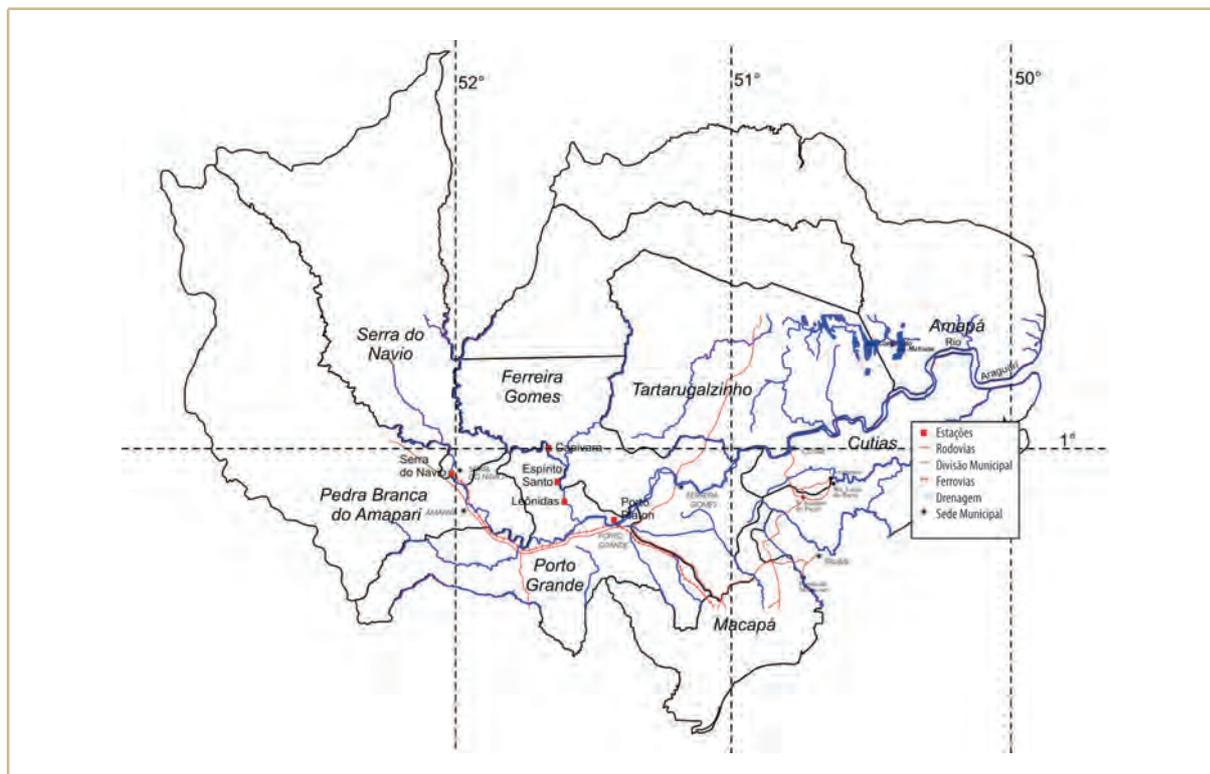
#### 2.1.1. A região de estudo

A bacia hidrográfica do rio Araguari está situada no extremo norte do Brasil, entre as latitudes de 02° e 00° N e longitudes de 53° e 49° 53'W (**Figura 1**), com uma área de aproximadamente 37.648 km<sup>2</sup>. Sua extensão aproximada é de 498 km, sendo dividida em três trechos: (1) Curso superior ou Alto Araguari (132 km); (2) Médio curso ou Médio Araguari (161 km), e (3) Curso inferior ou Baixo Araguari (205 km), onde o número de meandros aumenta, diminuindo sua velocidade de escoamento. A declividade média do canal é de 0,50 m/km e as temperaturas do ar variam entre 20,0°C e 40,1°C (CUNHA, 2009; BÁRBARA, 2006).

A bacia hidrográfica do rio Araguari encontra-se localizada, segundo a nova divisão de bacias hidrográficas do Brasil feita pela ANA, inteiramente nos domínios da Região Hidrográfica Amazônica, mais precisamente nas terras do Estado do Amapá. O rio Araguari nasce na Serra de Tumucumaque e desagua no Atlântico. Dispõe de 36 pequenas quedas d'água, entre as quais merecem destaque a presença da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes (UHECN), que fornece energia elétrica para grande parte do Estado do Amapá (BÁRBARA, 2006; BRITO, 2008) e potencial para dois novos aproveitamentos de maior porte (CUNHA, 2009).

A região do Alto Araguari apresenta uma situação de maior disponibilidade hídrica no sistema e biodiversidade ambiental preservada (Parque Nacional de Tumucumaque, Floresta Nacional do Amapá e Floresta Estadual do Amapá). Os municípios circunscritos neste trecho são Serra do Navio e Pedra Branca do Amapari, concentrando a maior parte da base econômica em termos de exploração mineral e turismo ecológico. A região do trecho do Médio Araguari apresenta uma disponibilidade hídrica variável, sendo composta pelos municípios de Porto Grande e Ferreira Gomes, concentrando a maior parte da atividade econômica na geração de energia hidrelétrica, mineração e turismo/lazer. A região do Baixo Araguari apresenta uma disponibilidade hídrica menor que as demais, sendo parte dela os municípios de Cutias, Amapá e Tartarugualzinho, cuja base econômica é representada pela exploração agropecuária e turismo.

A **Figura 1** mostra o mapa da bacia hidrográfica do rio Araguari, no qual são apresentadas as sedes municipais pertencentes à bacia, drenagem e principais rodovias e ferrovia. Os pontos vermelhos no mapa indicam a localização das Plataformas Automáticas de Coleta de Dados (PCDs) pertencentes à rede de estações da ANA, CPTEC/INPE e Eletronorte.



**Figura 1.** Mapa da bacia hidrográfica do rio Araguari e localização de algumas estações hidrológicas automáticas. Fonte: NHMET e COT – IEPA (2007).

### 2.1.2. Metodologia de análise do balanço hidroclimatológico

Para realizar as análises dos dados hidroclimáticos (precipitação e temperatura) foram utilizados dados observados de satélites (CDC/CIRES/NOAA) pluviométricos e de temperatura do ar da série histórica da University of Delaware (UDEL). Os pontos de grade foram da ordem de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  de espaçamento, e os períodos escolhidos entre 1979 e 2006. Os dados foram interpolados por Matsumura & Willmott (2009) e obtidos por meio do site <http://climate.geog.udel.edu/>. Mapas foram gerados com os dados interpolados na área que engloba toda a bacia do rio Araguari, entre as latitudes de  $0,25^\circ\text{S}$  e  $2,5^\circ\text{N}$  e as longitudes de  $53^\circ\text{W}$  e  $49,5^\circ\text{W}$ .

O cálculo do balanço hídrico foi realizado segundo a metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), por intermédio de planilha eletrônica do tipo BHnorm, elaborada por Rolim *et al.* (1998) e Sentelhas *et al.* (1999). Nesta etapa foram necessários os dados mensais de temperatura média do ar e precipitação

pluviométrica, além das coordenadas geográficas, altitude e CAD. Com as informações básicas em mãos, foi realizado o cálculo do balanço hídrico que permitiu deduzir a evapotranspiração real, evapotranspiração potencial, a deficiência ou o excedente hídrico e o total de água retida no solo ao longo do ano.

O comportamento da água no solo e a variação do armazenamento, assim como os períodos de excesso e deficiência hídrica foram avaliados pela elaboração de mapas no *software* ArcGis. Para tanto, foi utilizada uma ferramenta de interpolação denominada de Método do Inverso da Distância Quadrática (LIMA *et al.*, 2005). A interpolação é a estimativa do valor de um atributo em locais não amostrados com base em locais amostrados na mesma área, convertendo dados de observação discreta para campos contínuos a partir de um polinômio de 2.º grau. Este procedimento possibilitou a transformação de dados vetoriais em *raster* no SIG (BRAZ *et al.*, 2007).

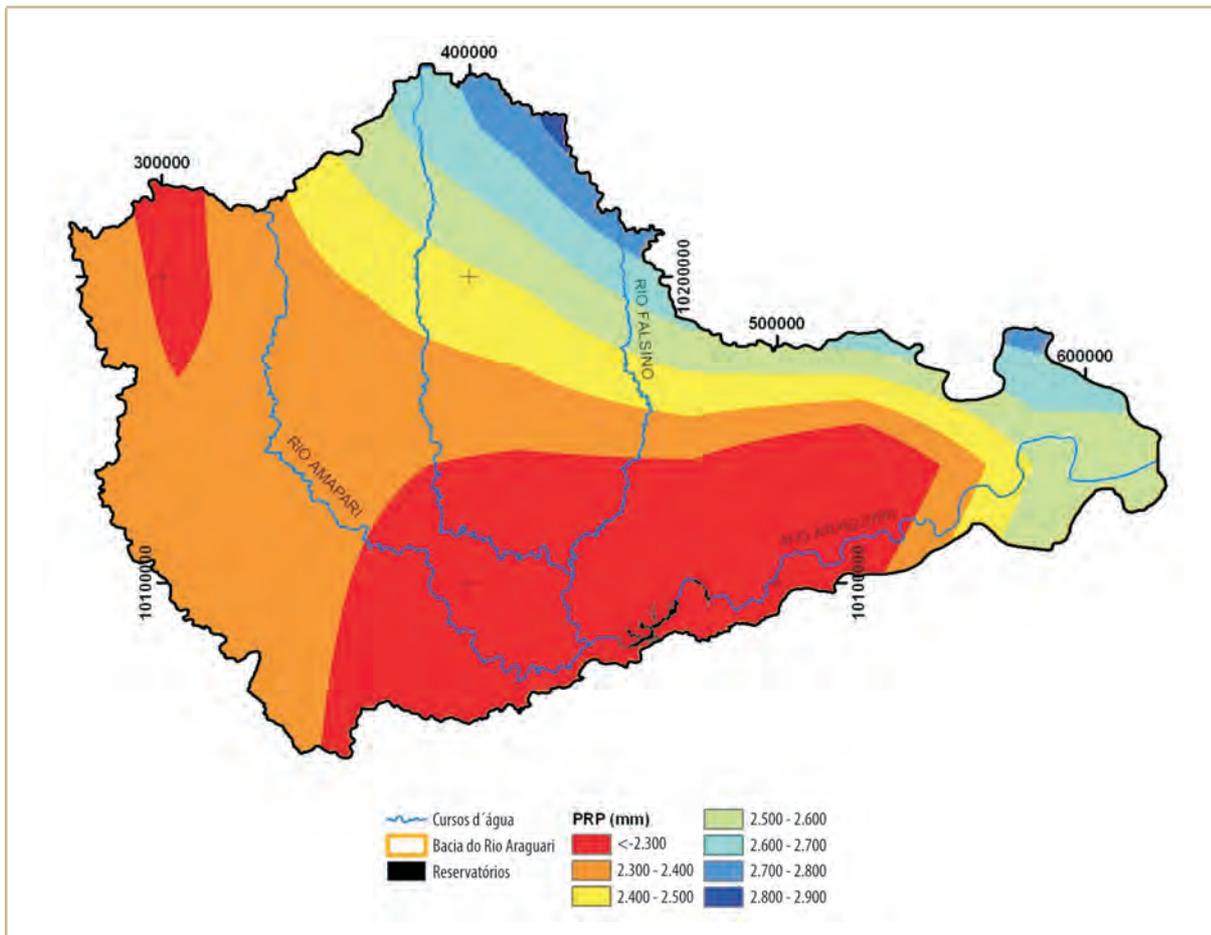
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Resultados Hidrometeorológicos

Neste tópico são mostrados os principais elementos do balanço hídrico climatológico, que é uma das principais ferramentas utilizadas para a caracterização da distribuição anual das chuvas em bacias hidrográficas. De posse desta informação, são apontados os períodos, excedentes hídricos e a deficiência hídrica no solo. Tais informações são extremamente importantes para o subsídio de gestão de recursos hídricos, infraestrutura hidráulica, tais como operação de hidrelétricas, manejo da biodiversidade, aplicações socioeconômicas, ambiental, agrícola entre outros setores.

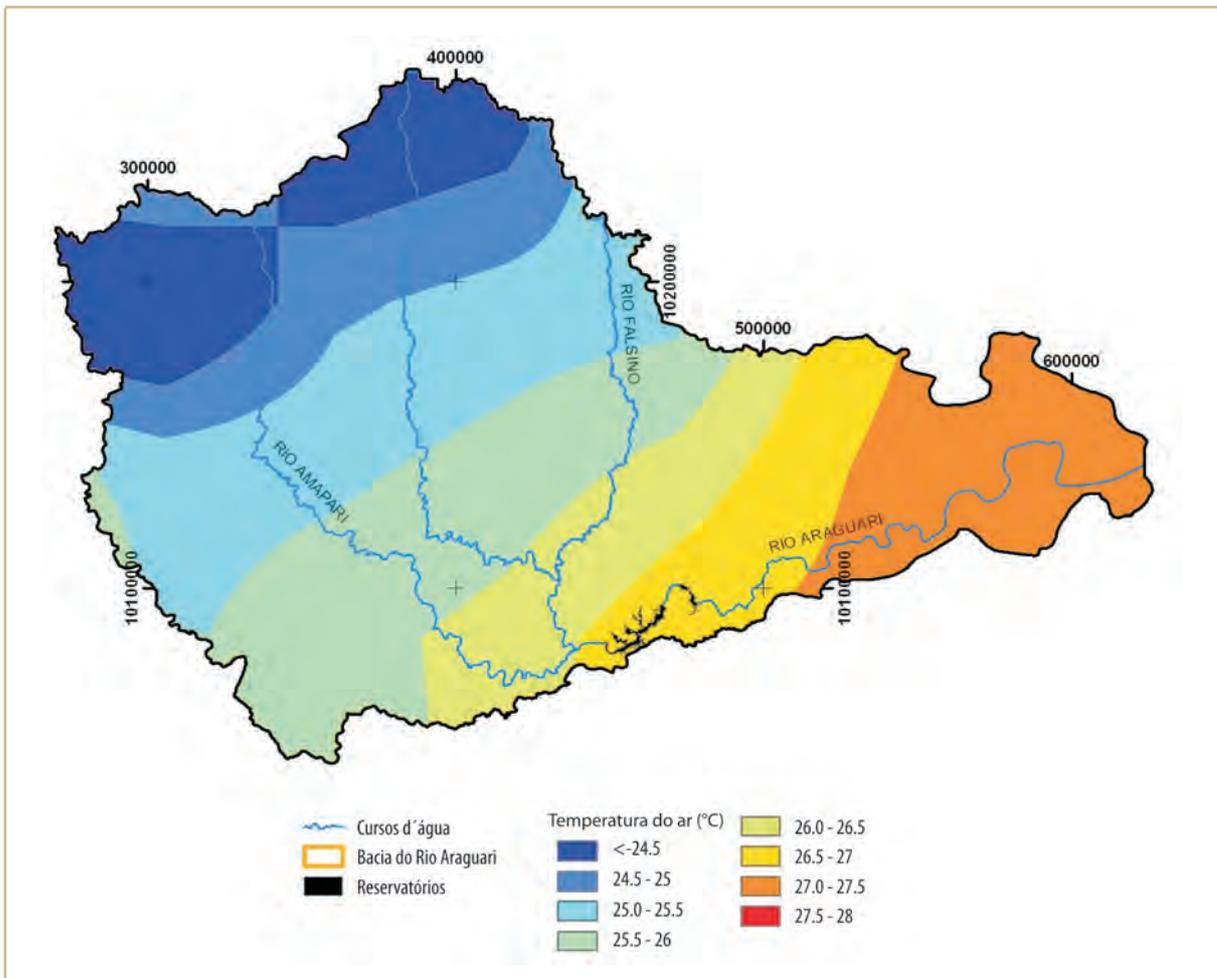
##### 3.1.1. Análise da distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica e da temperatura do ar

Na **Figura 2** a precipitação na bacia apresenta significativa variação espacial, cujos índices permanecem entre 2300 e 2900 mm anuais. Na região do extremo norte da bacia (Alto Araguari) os totais alcançam 2750 mm, diminuindo gradativamente em direção ao extremo sul da bacia (Médio Araguari), onde alcança valores inferiores a 2300 mm. Nesta análise anual da precipitação pluviométrica verifica-se que a bacia apresenta uma elevada taxa de precipitação, com uma maior concentração próxima à nascente do rio Araguari (Alto Araguari), o que proporciona a esta região um excelente potencial hídrico.



**Figura 2.** Distribuição da precipitação pluviométrica total anual da bacia do rio Araguari. Fonte: University of Delaware (1979-2006).

Na **Figura 3** é apresentada a variação anual da temperatura média do ar ao longo da bacia. Os menores valores de temperatura encontram-se na parte norte da bacia (Alto Araguari) com 24,5°C, enquanto os maiores encontram-se no extremo leste da bacia (Baixo Araguari), na faixa de 27,5°C. Os menores valores de temperatura encontrados são devido à topografia mais elevada neste trecho da bacia. A localização das montanhas de Tumucumaque no extremo noroeste da bacia proporciona menores valores térmicos, pois esses valores apresentam sensível variação com a altitude.



**Figura 3.** Distribuição da temperatura do ar média anual da bacia do rio Araguari. Fonte: University of Delaware (1979-2006).

### 3.1.1.1. Análise da distribuição espaço-temporal da precipitação pluviométrica e da temperatura do ar para o período chuvoso e seco.

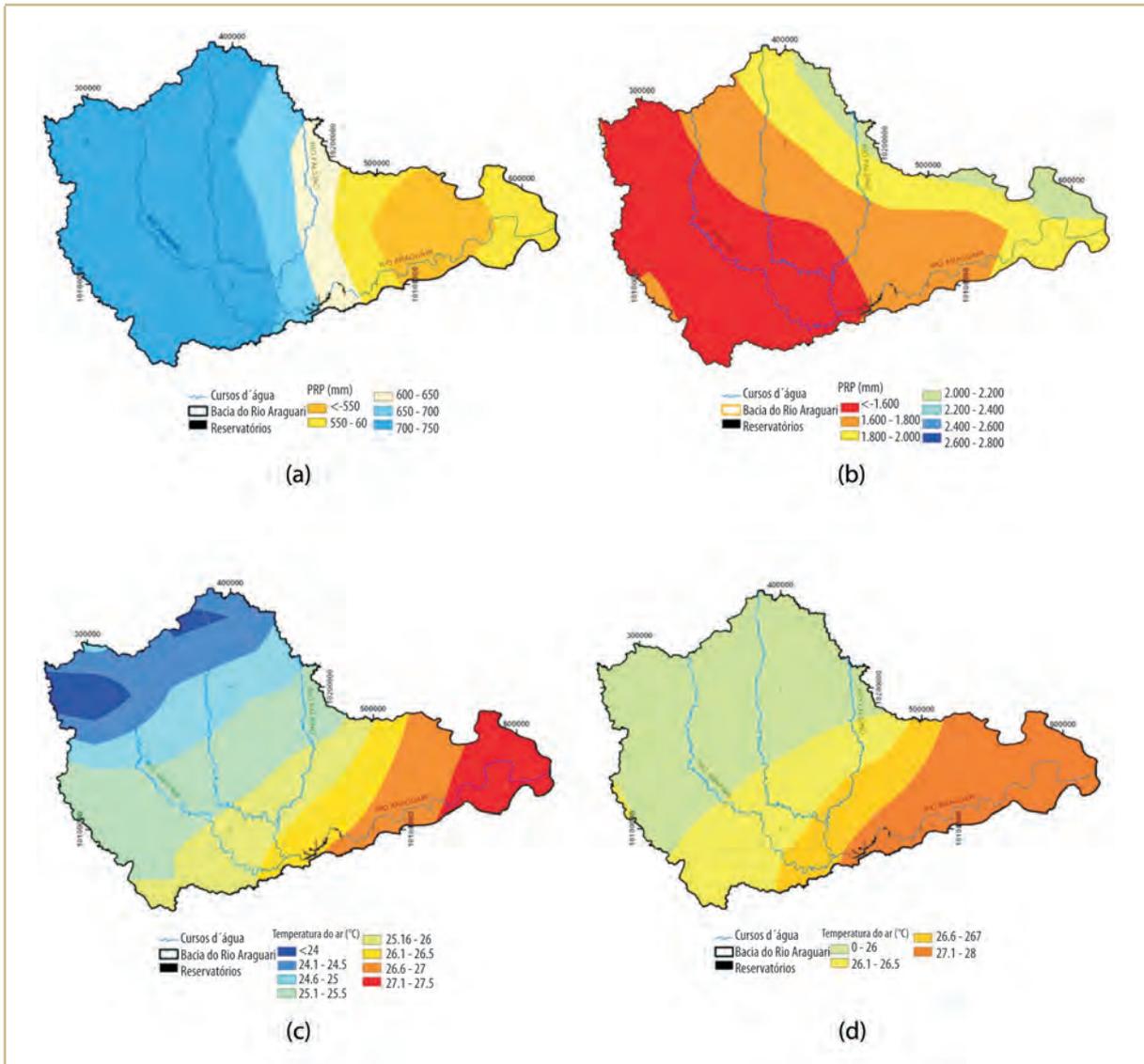
Na **Figura 4a** é indicada a distribuição da precipitação pluviométrica durante o **período chuvoso** (fevereiro a maio). Neste período é concentrado cerca de 70% do total anual de precipitação. Observa-se que o período chuvoso é mais intenso na região nordeste da bacia (Alto e Médio Araguari), alcançando um total de 2200 mm, enquanto no extremo oeste (Baixo Araguari) os valores estão na faixa abaixo de 1600 mm.

A **Figura 4b** mostra a distribuição de precipitação pluviométrica para o **período seco** (agosto a novembro). Na época seca é observada cerca de 30% da precipitação anual. A precipitação concentra-se na região nordeste e leste da bacia (Baixo Araguari), reduzindo-se gradativamente na direção oeste e sudoeste (Médio Araguari). Essa distribuição apresenta-se de modo inverso ao do período chuvoso.

Analisando as figuras observa-se que a diferença entre o período seco e chuvoso deve-se ao posicionamento da ZCIT, onde este sistema meteorológico é o causador dos altos níveis pluviométricos durante o período chuvoso, principalmente para a região norte e oeste da Bacia (Alto e Médio Araguari). No período seco as chuvas são geradas por sistemas convectivos, ou seja, conjunto de nuvens formadas pelo aquecimento diferencial local; ou linhas de instabilidades, que são aglomerados de nuvens em forma de linha que se formam ao longo do litoral.

A **Figura 4c** mostra a distribuição da temperatura do ar durante o **período chuvoso** (fevereiro a maio) no qual as menores temperaturas encontram-se na região noroeste da bacia, diminuindo na direção leste (Baixo Araguari). Este padrão de distribuição do período chuvoso é idêntico ao encontrado na distribuição anual de temperatura do ar. Apenas enfatizando que na região noroeste da bacia (Alto Araguari) a temperatura alcança valores menores que  $24,0^{\circ}\text{C}$ , provavelmente em função da topografia mais elevada daquela região.

A **Figura 4d** apresenta o padrão de distribuição da temperatura do ar durante o **período seco** (agosto a novembro). Este padrão de variação da temperatura é semelhante aos do período chuvoso e de distribuição anual. As maiores temperaturas encontram-se em torno de  $28,0^{\circ}\text{C}$  no extremo leste do Estado (Baixo Araguari). As menores temperaturas, com valores menores próximos de  $26,0^{\circ}\text{C}$ , estão localizadas na região noroeste (Alto Araguari). A amplitude térmica máxima observada no período seco (máxima) e no chuvoso (mínima) foi de aproximadamente  $4,0^{\circ}\text{C}$ .

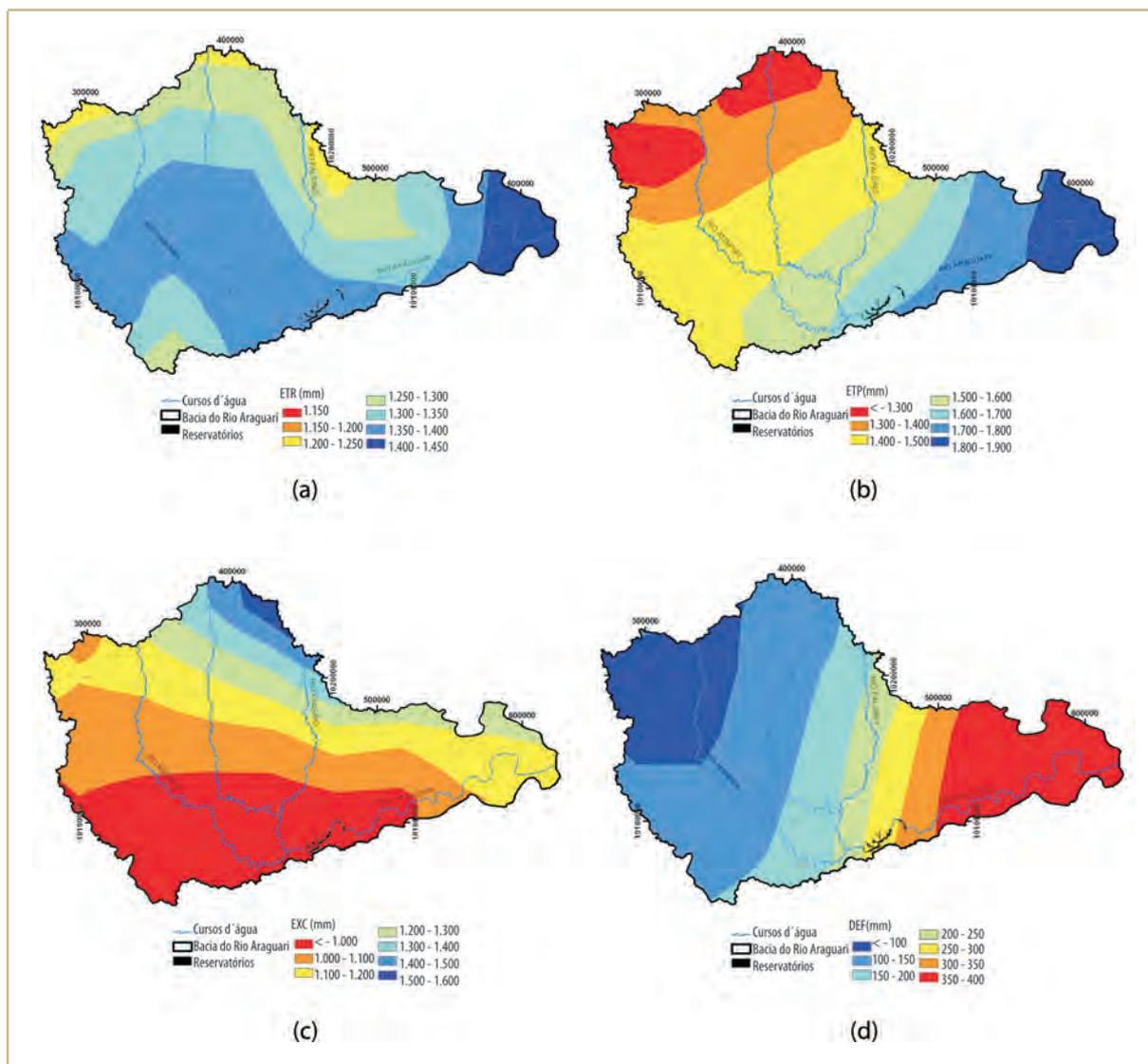


**Figura 4.** Distribuição da precipitação pluviométrica para o período chuvoso na bacia do rio Araguari (a) e período seco (b); (c) distribuição da temperatura do ar no período chuvoso (c) e no período seco (d). Fonte: University of Delaware (1979-2006).

### 3.2.1.2. Balanço Hídrico Climatológico

Na **Figura 5a** é indicada a variação espacial da evapotranspiração real (ETR) na bacia hidrográfica do rio Araguari. Esta variável representa o processo simultâneo de perda de água para a atmosfera por evapotranspiração vegetal e evaporação de superfície de água livre. A variação anual da ETR na bacia ao longo do ano segue uma tendência na qual os menores valores encontram-se na região norte (1200 a 1250 mm), com aumento na direção sul, onde são observados os maiores valores na região leste (1400 a 1450 mm).

A **Figura 5b** apresenta a variação anual da evapotranspiração potencial (ETP) na bacia do rio Araguari. A ETP é a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo, de uma superfície extensa e completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água. A variação anual da ETP na bacia ao longo do ano segue uma tendência, onde os menores valores (em torno de 1300 mm) encontram-se na região nordeste tendendo a aumentar na direção leste com os maiores valores (1800 a 1900 mm).



**Figura 5.** Distribuição da evapotranspiração real anual na Bacia do Rio Araguari (a); evapotranspiração potencial anual (b); excedente hídrico anual (c) e deficiência hídrica anual (d). Fonte: University of Delaware (1979-2006).

O excedente hídrico é resultado da grande concentração de chuvas no período chuvoso. Com base no extrato do balanço hídrico (**Figura 5c**), identificou-se que ao longo do ano são caracterizados sete meses com excedente hídrico na bacia. Neste período é observada a distribuição espacial do excedente hídrico na bacia hidrográfica. No extremo norte da bacia concentram-se os maiores valores entre 1500 e 1600 mm. No extremo sul observou-se os menores valores de excedente hídrico, em torno de 1000 mm. A variação da precipitação (de norte decrescendo para sul) da distribuição do excedente hídrico na bacia hidrográfica é diretamente proporcional à distribuição de chuvas, quando há coincidência entre a localização do sistema precipitante causador de chuvas nesta época do ano, isto é, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

Por intermédio do extrato do balanço hídrico (**Figura 5d**), verificou-se que ao longo do ano são caracterizados quatro meses com deficiência hídrica na bacia hidrográfica (agosto a novembro). Com base na deficiência registrada neste período, construiu-se a distribuição espacial da precipitação ao longo da bacia. A deficiência hídrica anual ocorre no período seco em cuja situação há uma sensível diminuição das chuvas associadas à elevada disponibilidade de energia solar que atua no processo evaporativo. Este fator limita a oferta de água no solo, influenciando, de certo modo, praticamente todas as atividades humanas na bacia hidrográfica.

#### 4. CONCLUSÕES

As aplicações de ferramentas de sensoriamento remoto associada aos aplicativos de geoprocessamento (SIG) em hidrologia ou hidrometeorologia são amplas e, em várias situações, confundem-se com a climatologia. Dentre as aplicações mais importantes neste estudo são elencadas as seguintes:

- 1) Caracterização espaço-temporal da precipitação e temperatura na bacia hidrográfica do rio Araguari, cujo potencial hídrico se apresenta como o mais importante para o setor energético do Estado do Amapá, além de uma significativa importância estratégica para o desenvolvimento econômico, social e ambiental local;
- 2) A somatória de vários esforços como o uso de ferramentas e informações tecnológicas acessíveis pela Internet permitiu a confecção de mapas de distribuição pluviométrica e térmica, além da ETR e EVP, mormente representada pela análise espacial desses parâmetros no Alto, Médio e Baixo Araguari;
- 3) Foi possível mostrar, por intermédio de ferramentas de geoprocessamento e informações de banco de dados, interpolar e analisar a distribuição de chuvas e temperatura em toda a bacia hidrográfica do rio Araguari;

- 4) A disponibilidade hídrica foi mapeada, representada pela ETR e EVP, a qual utilizou os mesmos procedimentos para a precipitação. Desta forma, o déficit hídrico hidroclimático passa a ser quantificado pela diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial;
- 5) A análise empreendida neste estudo, apesar de ser extremamente relevante para os estudos hidrológicos, carece ainda de validação espacial. Para isso, é necessária uma série de medidas observacionais empíricas e semiempíricas em toda a extensão da bacia, o que não é a realidade atual em termos de gestão de recursos hídricos na bacia do rio Araguari e em quase todo o Estado do Amapá;
- 6) A evolução do quadro legal e institucional da gestão de recursos hídricos no Estado do Amapá (Lei 0686/2002) indica que a gestão por bacia hidrográfica apresenta-se como uma tendência na qual a escala espacial de decisão tende a se intensificar. Por sua vez, esta necessidade induzirá a aplicação de ferramentas que possam auxiliar as tomadas de decisão e o acesso à informação com rapidez e flexibilidade, o que se tornará uma obrigatoriedade para os sistemas de gerenciamento de recursos hídricos nas bacias hidrográficas em um futuro próximo.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio dado pelo Projeto REMETAP financiado pela FINEP, sem o qual não seria possível a realização deste trabalho. Ao CNPQ pela bolsa de doutorado concedida à primeira autora no Programa PPGBio/UNIFAP e quarta autora financiada pelo CNPq/MCT, aos centros estaduais de meteorologia e recursos hídricos.

## 6. REFERÊNCIAS

ÁVILA, C. J. C. P. et al. Geoprocessamento da informação hidrológica. In: *O Estado das Águas no Brasil: perspectivas de gestão e informações de recursos hídricos*. MME-ANEEL/MMA-SRH e OMM. p. 187-196, Brasília-DF. 334 p, 1999.

BÁRBARA, V.F. Uso do modelo QUAL2E no estudo da qualidade da água e da capacidade de autodepuração do rio Araguari – AP (Amazônia). Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Goiás, Goiânia – GO, 174 p. 2006.

BONELL, M. and J. BALEK. “Recent Scientific Developments and Research Needs in Hydrological Processes of the Humid Tropics”. In: *Hidrology and water management in the humid tropics – Hydrological research*

issues and strategies for water management, M. Bonell, M.M. Hafs Schmidt and J. S. Gladwell, Eds., Cambridge University Press/UNESCO: 167-260, Cambridge, 1993.

BRAZ, R.L. et al. *Uso de séries históricas e técnicas de SIG no estudo da distribuição temporal e espacial da pluviosidade na bacia Barra Seca localizada no Norte do Espírito Santo*. VII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba. 2007.

BRITO, D.C. *Aplicação do Sistema de Modelagem da Qualidade da Água Qual2kw Em Grandes Rios: O Caso do Alto e Médio Rio Araguari – AP*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amapá. 2008.

CUNHA, A. C. *Uso do sistema de modelagem Qual2e (Qual2kw) para o estudo de impacto ambiental na qualidade da água causado por barragem e cidades ribeirinhas no Alto e Médio Rio Araguari – Amapá*. Relatório Final de Projeto. NHMET/IEPA. Processo CNPq (Edital Universal), No. 479405/2006-9. 147 p. 2009.

DICKINSON, R. E. "The Geophysiology of Amazonia. Vegetation and Climate Interactions", Wiley-The United Nations University: 273-296, New York, 1987.

GASH, J.H.C.; LLOYD, C.R.; LACHAUD, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, vol. 170, p.79-86, 1995.

HOLTZ, A. C. T. Precipitação. In: *Hidrologia Básica*, Cap. 2, p.7-35, 1973.

JESUS, E.S., GONÇALVES, P.H.L., OLIVEIRA, M.C.F. A variabilidade dos elementos meteorológicos associados ao fenômeno El Niño na Cidade de Macapá-AP. X Cong. Bras. de Meteorologia. Rio de Janeiro. *Anais de congresso 2000*.

LIMA, A.M.M et al. Ilha do Marajó: revisão histórica, hidroclimatologia, bacias hidrográficas e proposta de gestão. *Revista Holos environment*. v.5, n.1 p. 68. 2005.

MATSURA, K. & WILLMOTT, C.J. *Terrestrial Air Temperature: 1900-2008 Gridded Monthly Time Series (Version 2.01)*, interpolated and documented. Site <[http://climate.geog.udel.edu/~climate/html\\_pages/Global2\\_Ts\\_2009/README.global\\_t\\_ts\\_2009.html](http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2_Ts_2009/README.global_t_ts_2009.html)>. 2009.

LOMBARDO, M.A. *A Ilha de Calor nas Metrópoles*. O exemplo de São Paulo. SP, Ed. Hucitic, 1985.

OLIVEIRA, L. L. *Avaliação da interceptação da precipitação pela vegetação na floresta nacional de Caxiuanã, Pará*. 2007. 123f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande. 2007b.

OLIVEIRA, L. L.; *Desenvolvimento de sistema de suporte à decisão a partir de características hidroambientais e climáticas da bacia do rio Araguari-AP como mecanismo de implementação de instrumentos de gestão*. Proposta inicial de tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical – PPGBio. 2007a. 32 p.

PEREIRA, R. M., Brasil Jr, A.C.P, Cunha, A.C. *A stabilized finite element method for unsteady pollution in rivers*. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT)*. Brazilian Society of the Mechanical Sciences and Engineering (ABCM). Curitiba – Brasil. Paper N. CITO6-0951, December, 2006.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de*

*Agrometeorologia*, Santa Maria, v.6, p.133-137, 1998. SENTELHAS, P.C.; BORSATTO, R.S.; MINAMI, K. Transmissividade da radiação solar em estufas cobertas com filmes de PVC azul e transparente. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, RS, v. 7, n. 2, p. 157-162, 1999.

SUDAM, PROJETO DE HIDROLOGIA E CLIMATOLOGIA DA AMAZÔNIA. *Atlas Climatológico da Amazônia Brasileira*. Belém, 1984 (publicação, 39).

THORNTON, C.W., MATHER, R.J. *The water Balance*. New Jersey: Laboratory of Climatology, v. 8, 104 p. (Publication in Climatology), 1955. University of Delaware (UDEL). Terrestrial Precipitation: 1979-2006 Gridded Monthly Time Series. Interpolated and documented by Kenji Matsuura and Cort J. Willmott (with support from IGES and NASA). Site <[http://climate.geog.udel.edu/~climate/html\\_pages/download.html#P2009](http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/download.html#P2009)>. Acessado em 23/06/2009.

## Aplicação do Sistema Hidrológico IPHS1 no Estudo de Chuva-Vazão em Aproveitamentos Hidrelétricos na Bacia Hidrográfica do Alto e Médio Araguari

**Lic. Fis. Leandro Rodrigues de Souza**

leandro.souza@iepa.ap.gov.br

Bolsista DTI CNPq/MCT do NHMET/IEPA

Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis (NHMET), Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Amapá (IEPA).

**Dr. Eng. Alan Alan Cavalcanti da Cunha**

alancunha@unifap.br

Ex-coordenador do NHMET/IEPA, coordenador do Projeto REMETAP, Prof. do Curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e Programas de Pós-Graduação PPGBio/PPGDAPP-UNIFAP.

**Msc. Met. Naurinete de Jesus da Costa Barreto**

naurinete.barreto@iepa.ap.gov.br

Bolsista DTI CNPq/MCT do NHMET/IEPA

Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis (NHMET), Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Amapá (IEPA).

**Msc. Daímio Chaves Brito**

daimiobrito@gmail.com

Msc. em Biodiversidade Tropical. Aluno de Doutorado do PPGBio Da UNIFAP.

Prof. de Química da Secretaria de Estado da Educação do Estado do Amapá.

**Resumo:** O objetivo deste estudo foi avaliar o ciclo hidrológico da bacia do rio Araguari (AP) e sua aplicação em análise e estudos de impactos ambientais relacionados à construção de barragens para geração de energia hidrelétrica. Duas abordagens principais foram utilizadas: uso de séries históricas de dados hidrológicos de estações hidrometeorológicas no trecho de interesse do rio e a aplicação de modelo IPHS1 para estudos de previsão chuva-vazão. O IPHS1 opera como modelo concentrado no qual se utiliza séries hidrológicas de estações pluviométricas e fluviométricas originadas de monitoramento de variáveis hidrometeorológicas que representam parte do ciclo hidrológico entre a pluviometria e o escoamento superficial. O modelo descreve a distribuição espacial da precipitação, perdas por interceptação, evaporação, fluxos superficial e sub-superficial na bacia. A metodologia da pesquisa consistiu principalmente na análise detalhada do comportamento chuva-vazão em cinco estações de monitoramento ao longo do trecho superior da bacia (Porto Platon, Leônidas, Capivara, Ramos e Serra do Navio) e o comportamento de respostas hidrológicas modeladas pelo IPHS1 para futuros empreendimentos hidrelétricos. Nesta análise, foi permitido comparar espacial e temporalmente períodos em que o modelo realiza previsões compatíveis com dados observados. O principal resultado foi a obtenção de curvas chuva-vazão modeladas que permitem obter diferentes níveis de respostas causadas por perturbações hidrológicas na bacia do rio Araguari na perspectiva da inserção de dois novos aproveitamentos hidrelétricos no seu médio curso. Além disso, foi observado que, com a inserção dos novos empreendimentos no trecho próximo à UHECN, a simulação indica que ocorre o amortecimento dos picos de vazão (cheias), o qual pode ser configurado como efeito “positivo” da regularização da vazão com bons resultados. Contudo, foram também observados breves discrepâncias entre os valores dos fluviogramas observados e os simulados na bacia, decorrentes da ausência de dados físicos em algumas localidades na bacia hidrográfica, tais como geomorfologia, características hidráulicas do canal etc. Como conclusão, o estudo dispõe das bases fundamentais de conhecimento hidrológico sobre a bacia, as quais possibilitam a elaboração de cenários futuros que relacionem as grandezas físicas chuva-vazão na presença e ausência de novos empreendimentos hidrelétricos, considerados como economicamente estratégicos para o Estado do Amapá. Compreender as respostas hidrológicas é fundamental para avaliar dois tipos de cenários na bacia hidrográfica: a evolução e consequências das variações hidrológicas naturais da bacia segundo uma perspectiva de longo prazo e principalmente os efeitos da operação simultânea de reservatórios em rios da Amazônia, sobre os quais há pouca informação disponível.

**Palavras-chave:** Rio Araguari(AP), hidrelétricas, chuva-vazão, séries hidrológicas, modelagem, simulação, IPHS1.

# 1. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica pode ser considerada como um sistema físico, por meio do qual uma variável de entrada, como precipitação, infiltração, área da bacia etc., é transformada em uma variável de saída (vazão) por diversos processos do ciclo hidrológico. Uma das maneiras de representar esse processo é por intermédio de um hidrograma resultante relacionando a vazão média no intervalo de tempo.

Silveira *et al.*, (2005) afirmam que, apesar do Brasil possuir uma rede hidrometeorológica básica de mais de cinco mil estações monitoradas pela Superintendência de Informações Hidrológicas ANA, tanto a quantidade quanto a densidade não são as ideais. A maior deficiência, afirmam os autores, são quanto às estações evaporimétricas que apresentam baixíssima densidade ponto/área, sendo o quadro menos grave para as estações sedimentométricas e de qualidade da água, mas que também precisam de incremento por unidade amostral.

Por esta razão, entender a evolução temporal de eventos hidrológicos em uma bacia para construir novas hidrelétricas é tema de relevância para a Amazônia. Primeiro, porque permite **estudar a sensibilidade das variações hidrológicas** das bacias hidrográficas com diferentes características e realizar um dimensionamento inicial dos fenômenos físicos envolvidos. Segundo, porque possibilita o seu planejamento e a análise de consistência de séries históricas e preenchimento de falhas (TUCCI, 1998; VIEGAS *et al.*, 2004).

Silveira *et al.*, (2005) informam que as avaliações hidrológicas inseridas no contexto de um inventário de recursos hídricos – com a visão de instruir estudo de seleção ambiental de barragens – cumprem objetivos diversos, tais como: a) avaliação de vazões de segurança necessárias para garantir a proteção do empreendimento e do ambiente; b) a estimativa de vazões disponíveis para o consumo em seus diferentes usos (como observa a Lei Estadual de Recursos Hídricos, 686/2002). Os autores asseveram ainda que ambas as variáveis (vazões de segurança e vazões de consumo) referem-se ao escoamento de rios e igarapés, produto dos complexos fenômenos biofísicos que ocorrem na bacia hidrográfica pela dinâmica do ciclo hidrológico (vazões máximas de segurança da barragem e vazões mínimas ou ecológicas para a manutenção dos ecossistemas aquáticos são bons exemplos). Outro exemplo são as vazões máximas com elevada importância para o estudo da frequência de inundações e para o dimensionamento de dispositivos de proteção de obras hidráulicas, como vertedores de barragens e enseadeiras (SILVEIRA *et al.*, 2005).

No presente estudo, a análise tem sido útil para subsidiar uma série de informações técnicas que permitirão a avaliação e estudo de futuros barramentos à montante e à jusante da usina hidrelétrica de Coaracy Nunes (UHECN) existente na região (CUNHA, 2004; BRITO, 2008; ECOTUMUCUMAQUE, 2008; ECOTUMUCUMAQUE, 2009).

A barragem da UHECN, construída há pelo menos 32 anos na bacia do rio Araguari, promoveu desde então a regularização de sua vazão. Mas as reais consequências ambientais deste processo são

virtualmente desconhecidas. Somente com estudos mais aprofundados sobre as modificações ecológicas dos sistemas aquáticos é que se pode lançar luz sobre os efeitos causados pelos empreendimentos hidrelétricos e suas consequências ambientais (BÁRBARA, 2006; BRITO, 2008).

No inventário da ANEEL (1999) foi realizada uma análise ambiental relativamente superficial na qual o foco estava mais direcionado à divisão de quedas dos trechos dos principais rios afluentes (ECOTUMUCUMAQUE, 2008) e do próprio rio Araguari (ECOTUMUCUMAQUE, 2009) do que em propósitos ambientais de âmbito mais ecossistêmico (CUNHA, 2004).

Por outro lado, torna-se necessário registrar a deficiência de informações de interesse essencialmente hidrológico-ambiental para a bacia do rio Araguari, o que limita as análises de interesse essencialmente hidroambiental na bacia. Apesar das limitações de séries históricas de longo prazo no local, estudos anteriores se apresentam como fundamentais e de grande importância como ponto de partida para aprofundamentos específicos que também demandaram informações de suas séries hidrológicas (CUNHA 2004; BÁRBARA, 2006, BRITO, 2008; ECOTUMUCUMAQUE, 2008).

Portanto, a escolha do sistema hidrológico IPHS1 visa suprir algumas lacunas de informações técnicas discutidas acima. Trata-se de um software de livre acesso (software livre) e de fácil aplicabilidade para este tipo de análise de comportamento hidráulico em bacias, com número reduzido de dados físicos sobre a bacia além dos hidrológicos.

Com o uso do sistema IPHS1 foi possível avaliar o comportamento da variação de cotas e vazões em cada uma das principais sub-bacias do rio Araguari, em especial as estações onde existem séries históricas hidrológicas (Serra do Navio, Bambu, Capivara e Porto Platon). Como resultados, foi possível simular com razoável precisão as respostas a eventos extremos e suas repercussões no comportamento da chuva-vazão em trechos importantes ou com potencialidades ao aproveitamento hidrelétrico. As análises consideraram tanto a ausência quanto a presença dos futuros empreendimentos hidrelétricos inseridos na bacia hidrográfica.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

O rio Araguari apresenta uma extensa rede hídrica configurando-se como o principal e maior rio do Estado do Amapá, com aproximadamente 617 km de comprimento e com índice de drenagem da ordem de 0,955/km (CUNHA, 2004). Ele nasce na região noroeste da bacia hidrográfica, ao longo das regiões de topografias mais elevadas, cerca de 450 m acima do nível do mar, notadamente em áreas de conservação ambiental, como as Montanhas do Tumucumaque, onde se encontram o segundo maior parque ambiental do mundo e o maior do Brasil, o Parque Nacional das Montanhas do Tumucumaque (PARNA), com 3.867.000 ha de área.

Além do PARNA do Tumucumaque, o rio Araguari banha outras áreas de proteção, tais como a Floresta Nacional do Amapá, com 412.000 ha e a Floresta Estadual do Amapá, com 2.369.400 ha. Com isso, a importância ecológica do rio aumenta, pois engloba ecossistemas de áreas de proteção ambiental que precisam ser preservados e simultaneamente são objeto de interesse de aproveitamento hidrelétrico (ELETRONORTE, 1999; CUNHA, 2004).

Segundo Eletronorte (1999) a bacia do rio Araguari localiza-se a cerca de 90 km ao norte da cidade de Macapá (em linha reta) e deságua diretamente no Oceano Atlântico, ligeiramente ao norte da foz do rio Amazonas (Figura 1). A área de interesse da bacia é delimitada pelo polígono definido pelas latitudes 0° 30' N e 1° 30' N e longitudes 51° 00' W e 52° 30' W, com cerca de 41.000 km<sup>2</sup>, conforme estabelecido na Portaria DNAEE 596/95.



**Figura 1.** Bacia hidrográfica do rio Araguari ocupando aproximadamente 1/3 da área total do Estado do Amapá (617 km de comprimento e índice de drenagem de 0,955/km). Fonte: Ecotumucumaque, 2009.

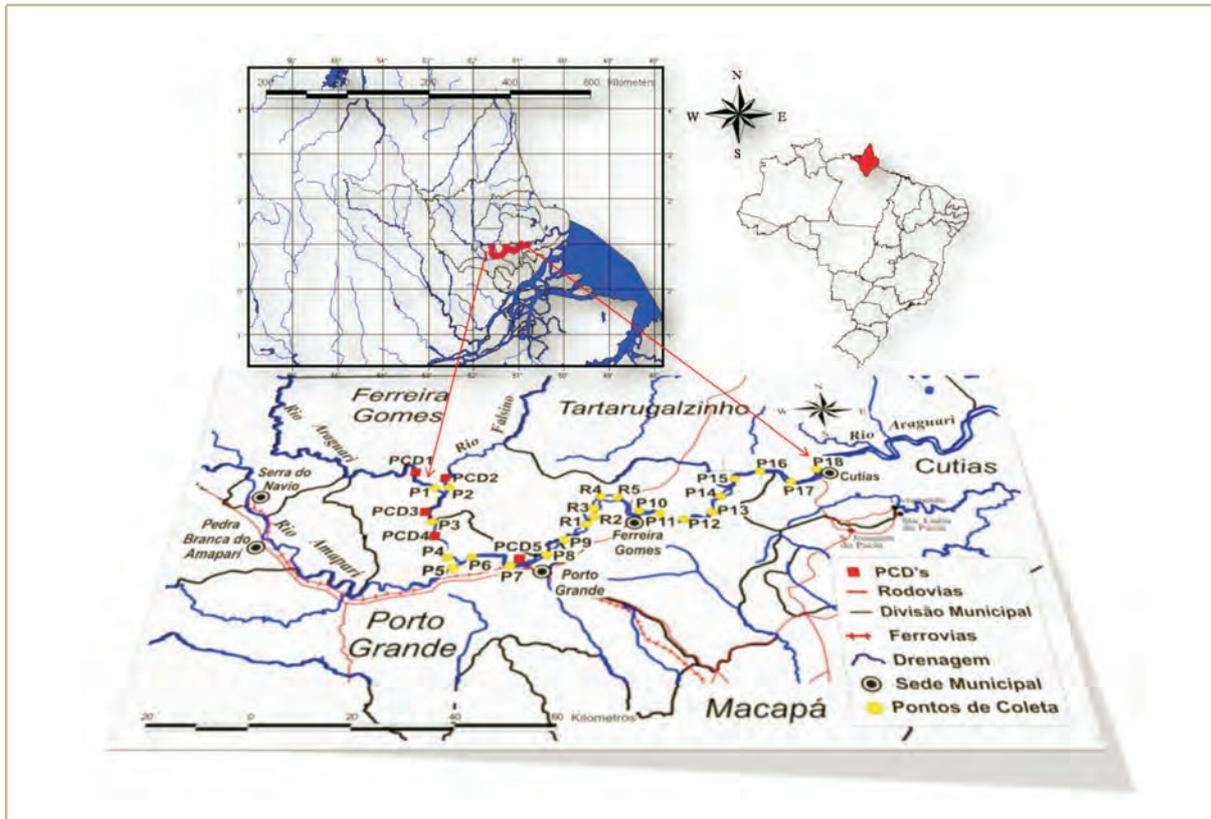
O rio Araguari apresenta três trechos distintos, com os seguintes gradientes hidráulicos (ELETRONORTE, 1999): **a) Trecho Superior:** compreendido entre a localidade de Porto Grande e a confluência do rio Tajauí, situada no final do trecho de interesse. Apresenta-se como um trecho geologicamente senil, que apresenta um desnível de 40,5 m em 191 km, com o gradiente de 0,212 m/km; **b) Trecho Médio:** compreendido entre as localidades de Ferreira Gomes e Porto Grande, é um trecho juvenil, com muitas corredeiras. O desnível total desse trecho é de 54,40 m em 42 km, o que resulta num gradiente médio de 1,297 m/km; **c) Trecho Inferior:** está compreendido entre a foz e a localidade de Ferreira Gomes e é sujeito à influência das marés, conhecida como região fluvio-marinha. Esse trecho apresenta um desnível de somente 1,0 metro em 224 km, sendo seu gradiente de somente 0,0004 m/km.

Para simular a hidrologia da bacia do Araguari foi necessário conhecer várias de suas características morfológicas, tais como taxa de infiltração, níveis de precipitação, aspectos estatísticos da vazão, além de imagens geoprocessadas para quantificar as distâncias entre os trechos e as respectivas declividades, fundamentais para simular cenários hidrológicos (pois representam a energia potencial e cinética do sistema).

## **2.2. Avaliação Hidrometeorológica e aplicação do IPHS1 na bacia do Araguari**

Neste sub-tópico são apresentadas as principais características hidrometeorológicas da área de estudo. Além disso, são descritos como algumas das etapas de aplicação do sistema de simulação e modelagem hidrológica do modelo IPHS1 (TUCCI, 1998). A amplitude da série de dados fluviométricos obtidos se estendeu de 1931 até 2006. Os dados foram processados com a utilização de um software denominado “Microsistema de Dados Hidrometeorológicos – MSDHD, V4.03, de 1996”, da Coordenadoria Geral de Recursos Hídricos – CGRH/ANEEL.

Foram registrados cinco postos fluviométricos de interesse na bacia do rio Araguari, sendo três instalados no rio principal (Porto Platon, Leônidas e Capivara), um no rio Amapari (Serra do Navio) e um no rio Falsino (Ramos) (Figura 2).



**Figura 2.** Localização dos principais postos fluviométricos (PCDs, destacados em vermelho) na bacia do rio Araguari. Em amarelo são as estações de coleta de amostras para análise de qualidade da água (BRITO, 2008).

O posto fluviométrico com o período mais prolongado de observação é o Porto Platon. Ele está localizado no rio Araguari na área de influência direta de futuros empreendimentos hidrelétricos e próximos do reservatório da Usina Hidrelétrica Coaracy Nunes da Eletronorte (UHECN).

O posto Leônidas, localizado imediatamente à montante da confluência do rio Amapari com o rio Araguari, registrou 14 anos de observação e foi desativado em 1986. O posto Ramos, localizado no rio Falsino, registrou um período muito curto de observação, de apenas três anos, e foi desativado em 1982. Os postos Porto Platon, Capivara e Serra do Navio continuam a operar até a atualidade normalmente.

### **Variabilidade Hidrometeorológica**

Na presente análise foi utilizada a estação fluviométrica de Porto Platon, cujos dados foram consistidos nos níveis mensais de vazões, precipitação e cotas médias a partir do Inventário das Estações Fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA, 2008). Os totais de precipitação mensal são oriundos de um conjunto de reanálises em grade de  $0.5 \times 0.5 \text{ km}^2$ , fornecido por grupo de estudos climáticos da

Universidade de Delaware. Na Tabela 1 encontram-se os registros das médias anuais das variáveis hidrológicas em Porto Platon. Nesta região o total anual de chuva em média obtido foi de 2.389 mm, com máximo observado de 2.962 mm e mínimo de 1.831 mm. A cota média máxima anual observada foi de 673 cm. A média foi de 566 cm e mínima de 435 cm; vazão média de 946 m<sup>3</sup>/s, máxima é 1.569 m<sup>3</sup>/s e mínima de 319 m<sup>3</sup>/s. Tais valores indicam que o regime hidrológico sofre significativa variação ao longo das séries históricas.

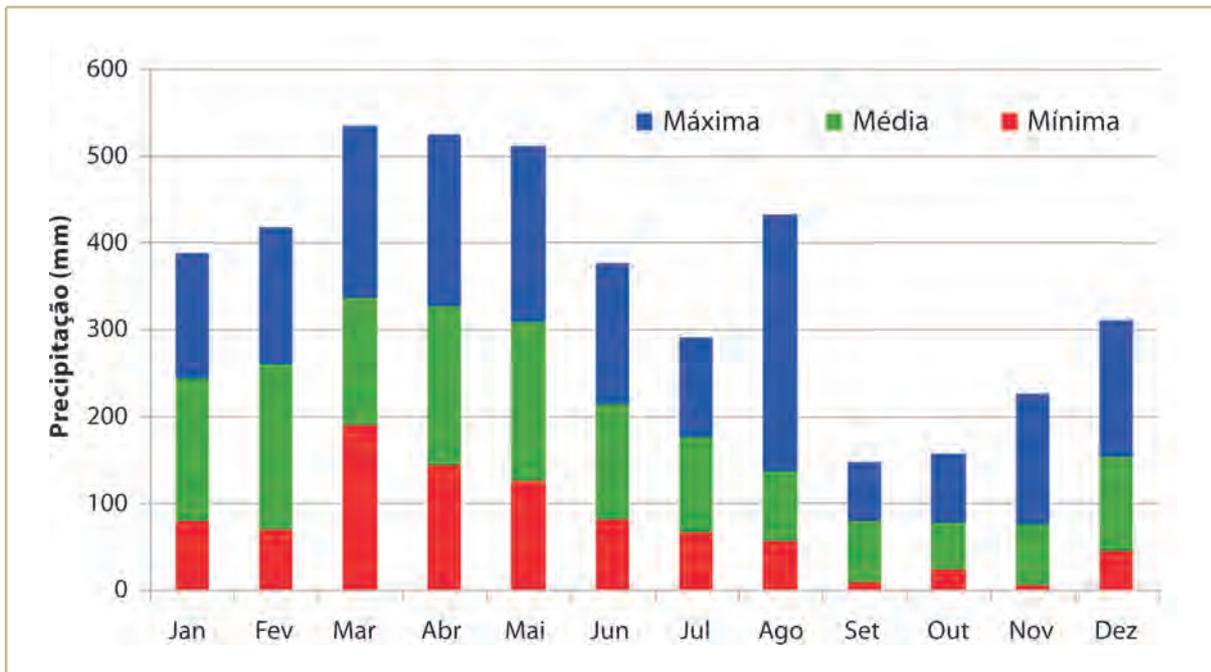
**Tabela 1.** Valores médios anuais das variáveis hidrológicas no médio rio Araguari.

Porto Platon	Precipitação (mm)	Cota (cm)	Vazão (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
Média	2.389,2	566.4	946,7
Máxima	2.962,1	673.5	1.569,8
Mínima	1.831,6	435.2	319,8

Em termos de valores anuais, a vazão máxima é cerca de 65% acima da média, enquanto a vazão anual mínima é 66% abaixo. Em relação a cota, observa-se que a anual máxima é cerca de 18% acima da cota anual média e a cota mínima apresenta-se 23% abaixo.

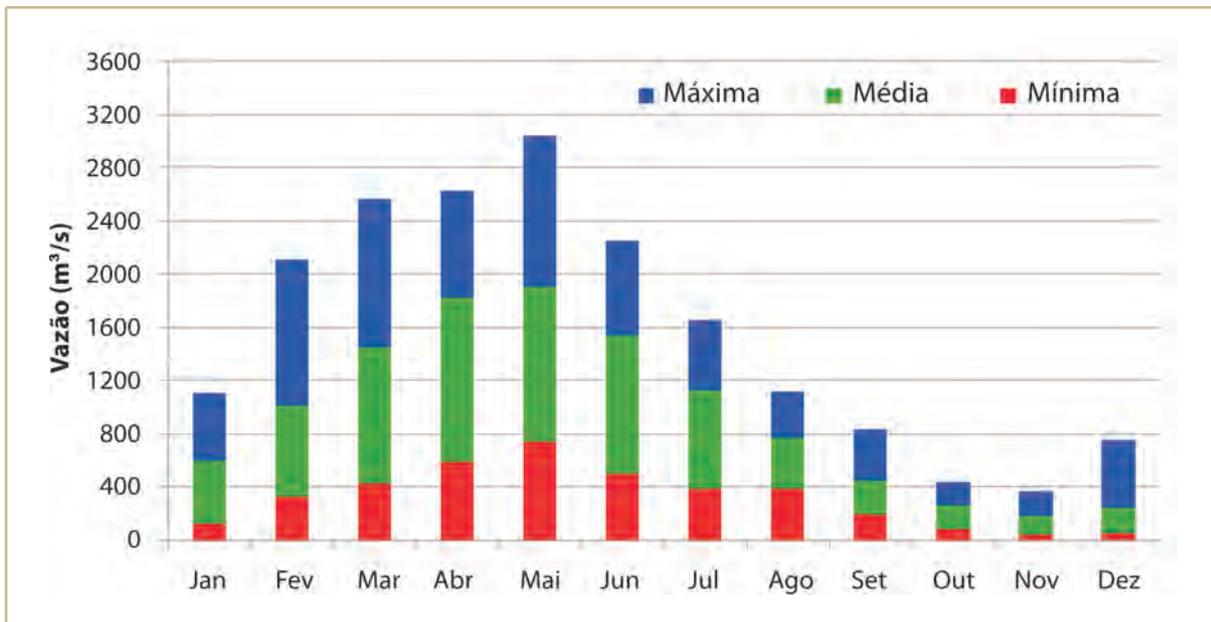
### **Média mensal**

Por intermédio de dados obtidos da Agência Nacional de Águas foi possível calcular as médias mensais de vazão, cota e precipitação. As Figuras 3, 4 e 5 apresentam suas variações mensais. Observa-se que os meses mais chuvosos ocorrem em março, abril e maio e os menos chuvosos em setembro, outubro e novembro. Os meses de junho a agosto e dezembro a fevereiro são considerados como período de transição. Nota-se que os máximos observados nos meses de março, abril e maio superam os 500mm/mês, enquanto que os mínimos neste período ficam abaixo dos 200mm/mês. Na época de seca os máximos registrados ficam abaixo dos 250mm/mês e os mínimos inferiores a 100mm/mês.



**Figura 3.** Climatologia mensal de chuva média, máxima e mínima. Porto Platon.

A Figura 4 apresenta a variação mensal de vazão com suas respectivas médias máximas, médias e mínimas que são significativamente importantes no estudo hidrológico, qualidade da água e sedimentologia na bacia hidrográfica.



**Figura 4.** Vazão média mensal da máxima, média e mínima da média de 1973 a 2006. Porto Platon.

A Figura 5 apresenta detalhes da variação mensal da cota. Os meses mais chuvosos foram março, abril e maio, os quais apresentam cotas maiores do que os menos chuvosos: setembro, outubro e novembro. Os valores mínimos foram de 600 cm a 700 cm, os médios de 800 cm a 900 cm e os máximos de 1.000 cm a 1.100 cm de MAM. No período de SON observa-se um máximo de 600 cm, média de 450 cm e mínimo de 400 cm.

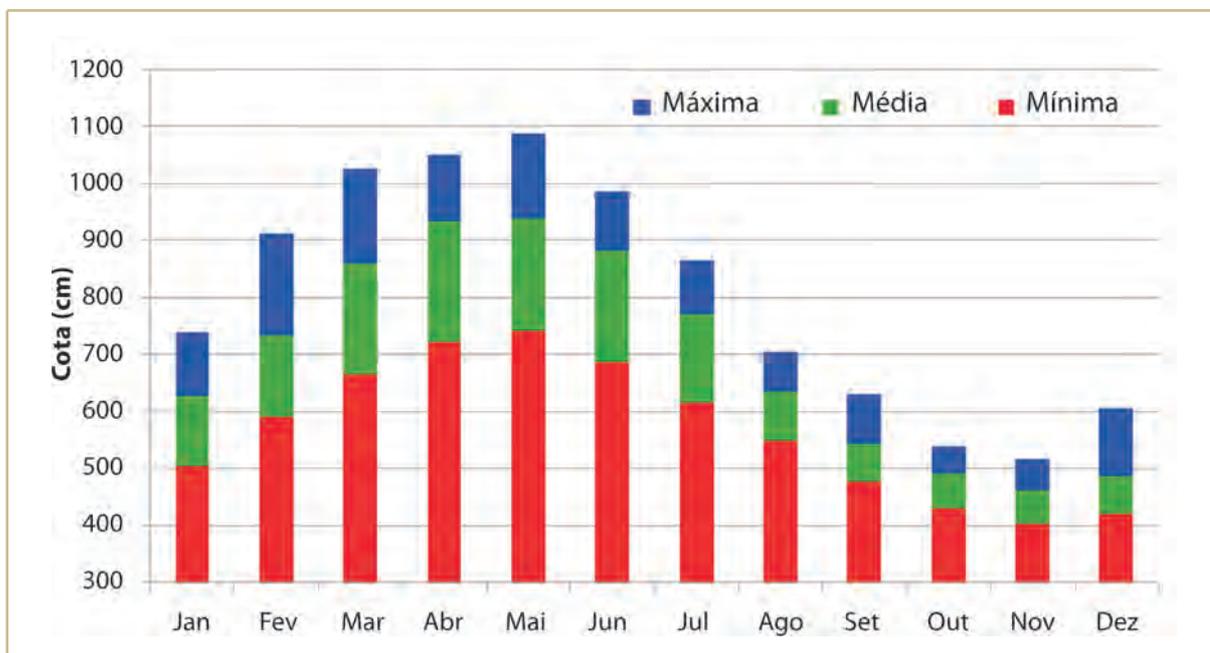


Figura 5. Cota média mensal da máxima, média e mínima de 1973 a 2006. Porto Platon.

### Uso do sistema computacional hidrológico IPHS1

Devido à facilidade de operação e custo é normal existirem séries históricas mais longas de precipitação do que vazão. Portanto, por meio do modelo, é possível, após ajustes, a extensão da série de vazão com base na precipitação, além de analisar a consistência das curvas-chaves.

Para o estudo da propagação de cheias (chuva x vazão) faz-se necessária a disponibilidade de séries hidrológicas de vazão, que segundo Tucci (1998) e Viegas *et al.* (2004) normalmente são mais curtas que as séries de precipitação. Os modelos de precipitação-vazão representam parte do ciclo hidrológico entre a pluviometria e o escoamento superficial. Os modelos hidrológicos descrevem a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, o fluxo através do solo pela infiltração, percolação da água subterrânea, escoamento superficial e sub-superficial (BRUN, 1999). Assim, os modelos chuva-vazão permitem simular a parte do processo do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão, sendo possível completar períodos desconhecidos das últimas, além de estimá-las para diferentes cenários nas bacias e prever a ocorrência de cheias ou outros eventos extremos. Dentre os

modelos de chuva-vazão, há aqueles específicos que podem ser usados para diversos fins, dependendo dos parâmetros/características da bacia (GERMANO, 1998).

No IPHS1 estão acoplados vários tipos de modelos hidrológicos, com destaque ao IPH2 (parametrizado na Tabela 2). O IPH2 gerou resultados satisfatórios para o objetivo deste estudo. O modelo IPH 2 é do tipo concentrado (uniforme), aplicado para projetos de engenharia em bacias rurais e urbanas. Sua principal vantagem, nestes casos, é que necessita de poucos parâmetros e se baseia em metodologias consagradas e conhecidas.

**Tabela 2.** Parametrização do modelo IPH 2.

Modelo IPH 2	Parametrização
Io (mm/h)	13
Ib (mm/h)	0.23
H	0.86
Rmáx (mm)	12

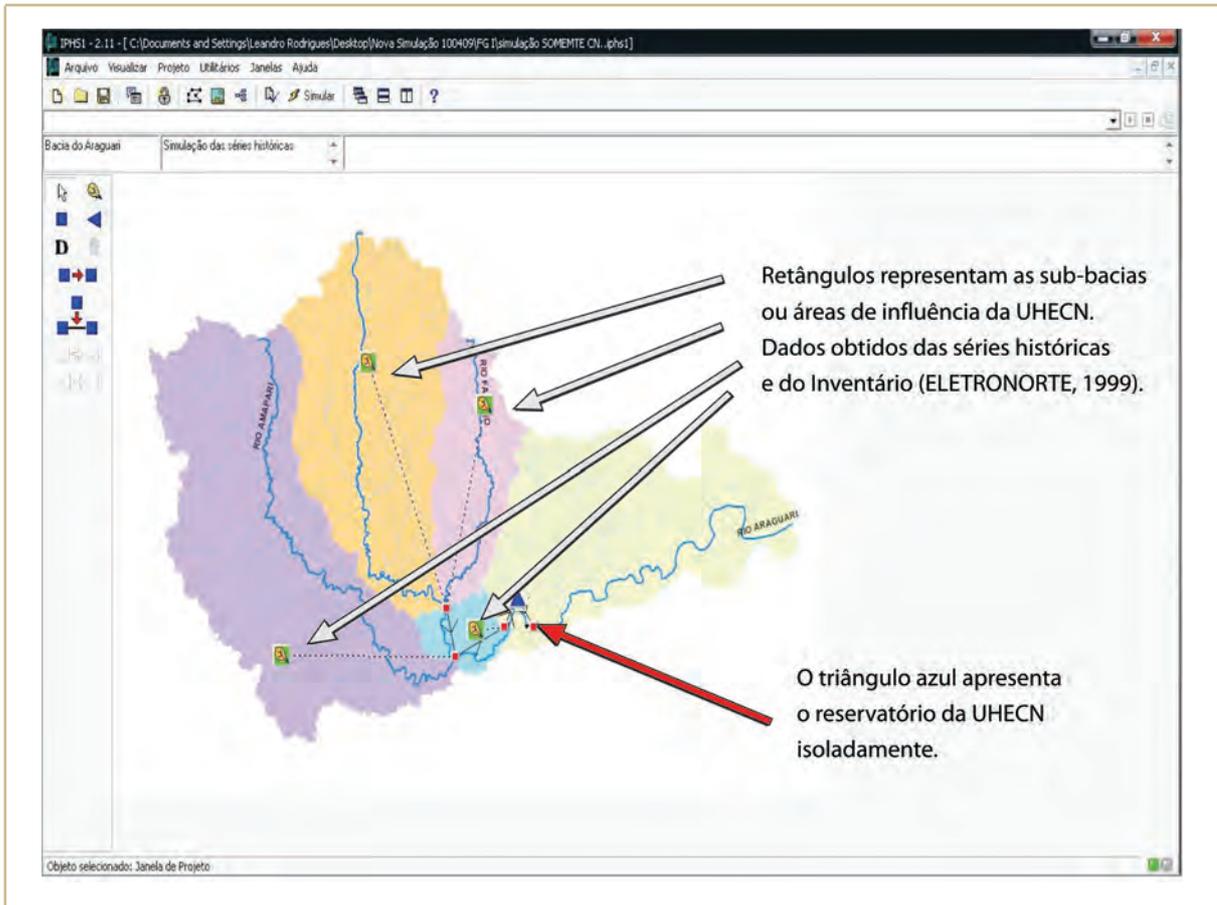
Onde

- Io = capacidade de infiltração máxima do solo
- Ib = capacidade de infiltração mínima do solo
- h = parâmetro de decaimento da infiltração no solo
- Rmáx = capacidade máxima do reservatório de interceptação

O IPHS1 possibilitou a realização das simulações para um período de um ano considerando suas respectivas médias diárias. Foram consideradas as informações hidrológicas de chuva-vazão, chuva-cota e outras características físicas da bacia, além da inserção de características físicas do reservatório da UHECN e os dois futuros aproveitamentos hidrelétricos (AHEs), um situado à montante e o outro à jusante da UHECN, conforme demonstrado pela Figura 6.

Na Figura 6 observam-se as principais sub-bacias e alguns símbolos do sistema IPHS projetados no mapa da bacia, com destaque para as sub-bacias do rio Amapari e do rio Falsino. As diferentes cores foram utilizadas para facilitar a visualização esquemática da formulação do modelo IPH2, presente no IPHS1. O triângulo azul representa a UHECN no médio rio Araguari. Os retângulos verdes com desenhos de uma bacia armazenam os dados físicos característicos da bacia, como área, declividade, capacidade de infiltração, capacidade máxima do reservatório etc. As linhas retas pontilhadas representam as características do trecho do canal em estudo na sub-bacia ou no canal principal.

A seguir, são mostrados os resultados da análise do estudo, considerando em análise posterior os dois novos aproveitamentos potenciais e seus efeitos de amortecimento sobre o regime hidrológico nas seções de estudo escolhidas: seção de análise de Porto Platon, UHECN e os AHEs Cachoeira Caldeirão e Ferreira Gomes.



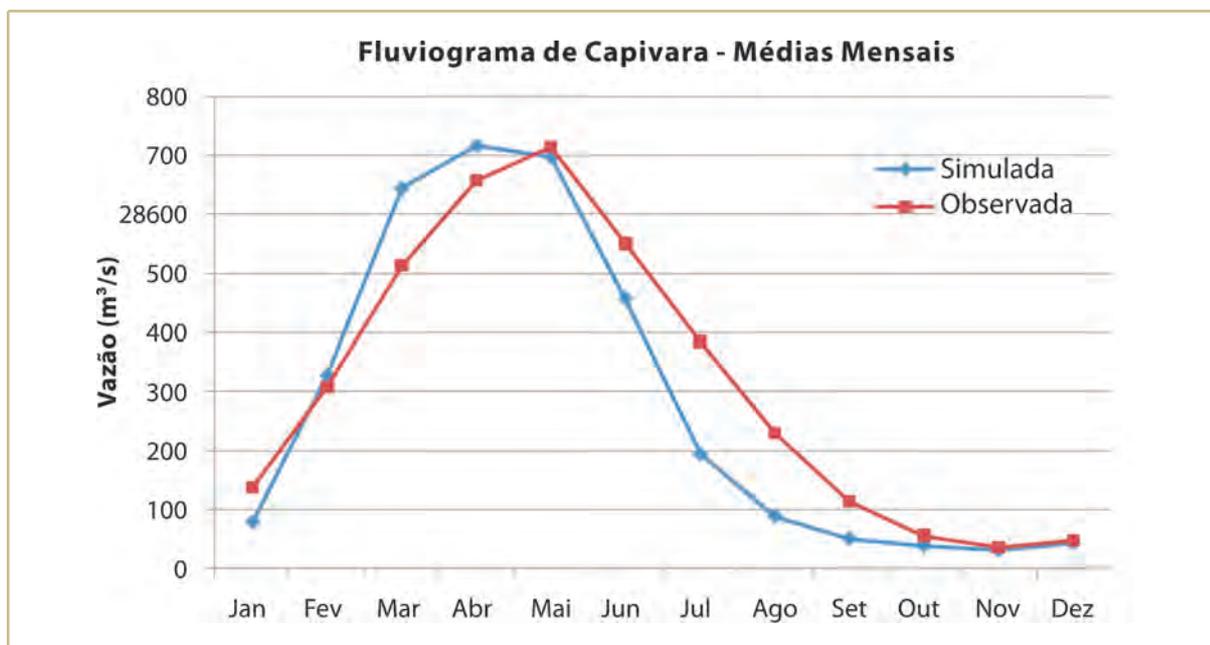
**Figura 6.** Ambiente gráfico do IPHS1 representando a bacia do Araguari. Destaque para a UHECN (indicada pela linha vermelha). Fonte: Ecotumucumaque (2009).

### 3. RESULTADOS

Nesta unidade são apresentados e discutidos os resultados obtidos pelos levantamentos dos dados concernentes à hidrologia durante a elaboração do estudo de acordo com a metodologia descrita, tanto da coleta dos dados do inventário da Eletronorte (1999), que serviram como parâmetros de entrada do modelo IPHS1, quanto do uso da previsão numérica para simulação e modelagem hidrológica da área de influência direta dos futuros AHEs.

As áreas de influência direta dos futuros empreendimentos podem ser aquelas onde serão formados os reservatórios e onde haja potencial formação de remansos para direção de montante e outros efeitos hidrológicos, porém significativos, tais como o amortecimento das ondas de cheias.

Observam-se as saídas gráficas do modelo IPHS1 nas estações localizadas na área de influência da futura PCH Capivara (rio Amapari) comparando com os resultados observados e simulados das séries históricas (Figura 7 e Tabelas 1 e 2).

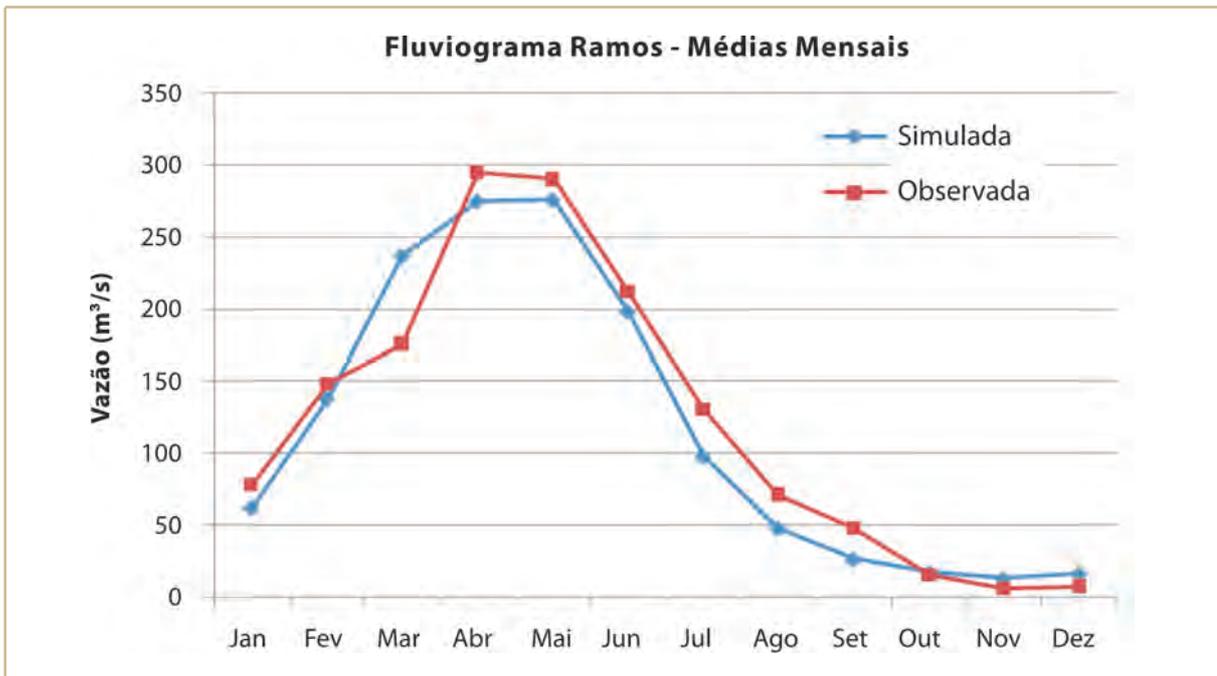


**Figuras 7.** Análise comparativa entre saída observacional e simulada do hidrograma em Capivara – médias mensais.

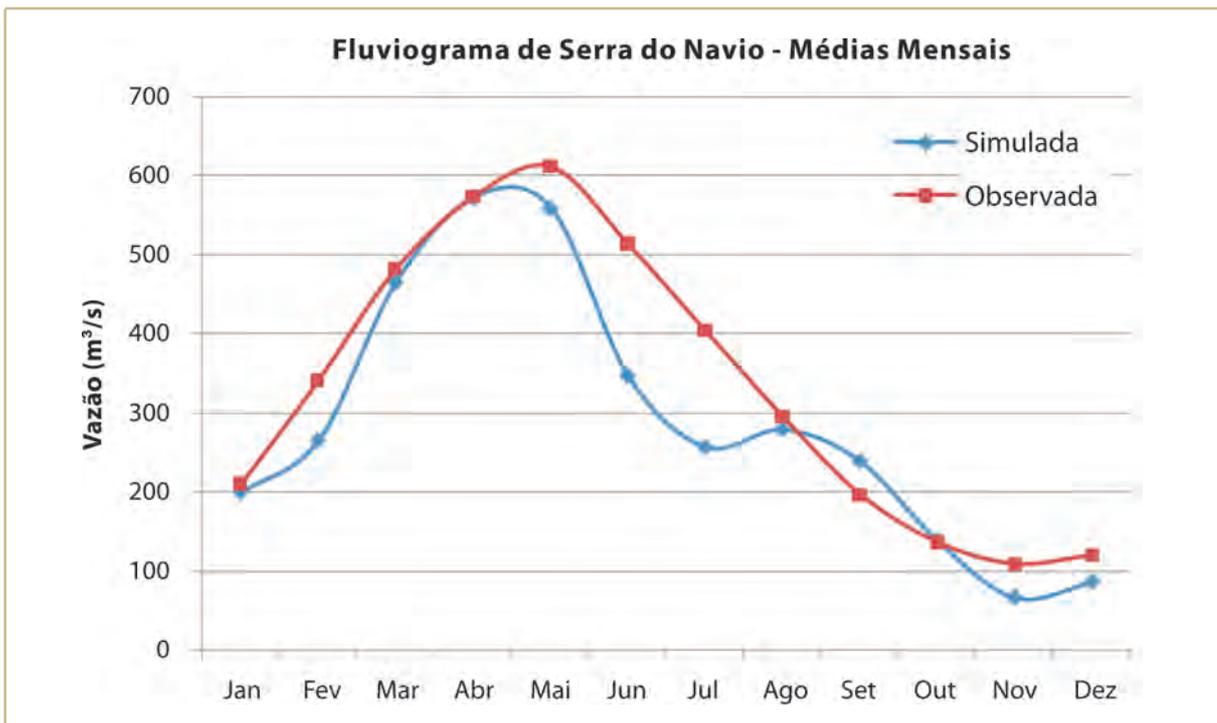
Note os valores comparativos entre o hidrograma real da PCD Capivara (em vermelho) e o hidrograma simulado gerado pelo modelo IPH<sub>2</sub> (em azul). A estação hidrometeorológica de Capivara está localizada na região do Alto Araguari (Figura 6). Observa-se que os resultados da série histórica de vazão apresentam uma boa resposta física ao longo da simulação quando comparada com os dados observados da estação fluviométrica. Contudo, os valores simulados apresentam-se levemente subestimados no período de transição entre maio e agosto (fim do outono e inverno). Já nos demais períodos o modelo tende a superestimar levemente, melhorando sua capacidade de acerto entre outubro e fevereiro (meio da primavera, verão e início do outono).

Na Figura 8 observa-se o fluviograma da estação de Ramos localizada na bacia do rio Falsino com boa correlação entre os resultados observados e simulados. Contudo, com uma pequena discrepância ao longo do período estudado. Observa-se que o fluviograma observado tende a ser levemente superior ao simulado a partir de abril até setembro, com comportamento inverso nos meses de março novembro e dezembro.

Na estação de Serra do Navio observou-se uma razoável aderência apenas para alguns períodos simulados e os observados, apresentando uma discrepância no período de transição entre maio e julho (Figura 9).



**Figura 8.** Análise comparativa entre saída do fluviograma em (médias mensais). Note os valores comparativos entre o fluviograma real da estação e o fluviograma simulado gerado pelo modelo IPH2.



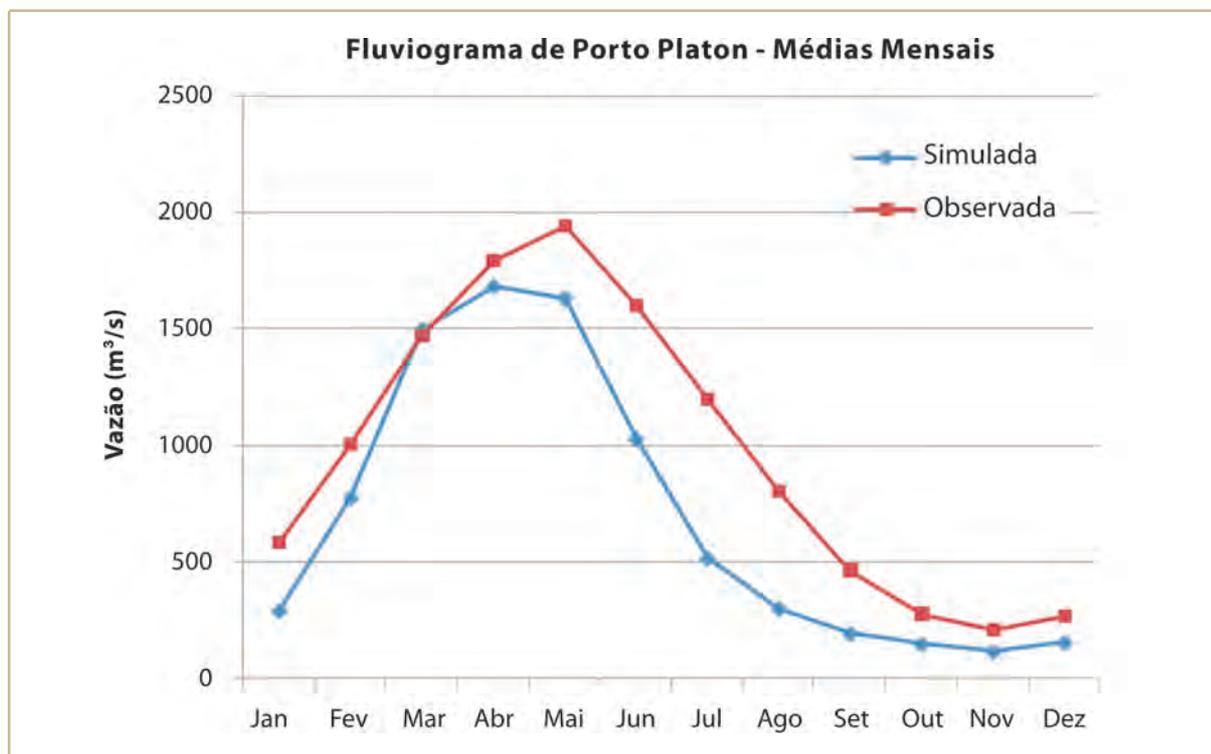
**Figura 9.** Fluviograma da estação de Serra do Navio localizada na sub-bacia do rio Amapari.

Vale ressaltar que a estação de Serra do Navio está localizada no rio Amapari que, por sua vez, corresponde a um terço da vazão do rio Araguari, sendo o seu principal afluente.

O posto fluviométrico de Porto Platon foi considerada a principal estação analisada, não só pela sua localização, mas devido a sua extensa série histórica de dados que eleva a confiabilidade dos resultados.

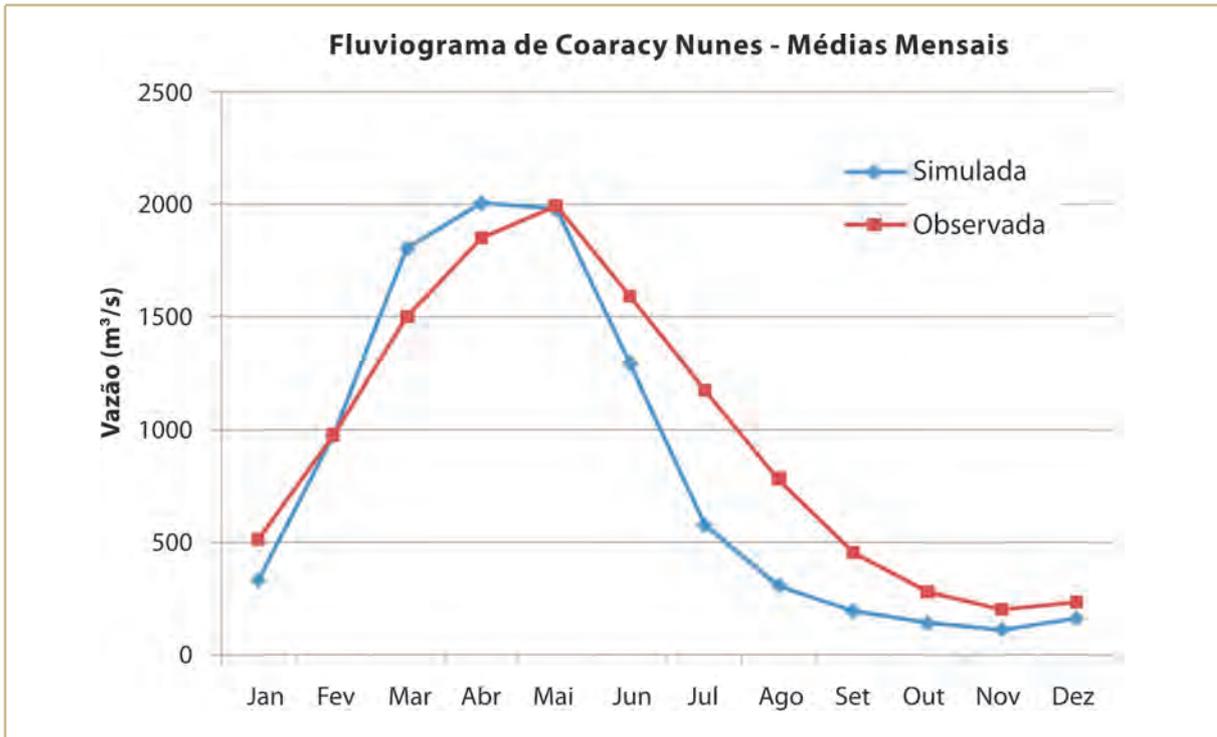
Ao analisar a Figura 10 percebe-se um ajuste razoável entre os resultados no período chuvoso (janeiro, fevereiro, março, abril e aproximadamente em maio) e seco (outubro, novembro e dezembro), subestimando os valores observados nos demais períodos. O modelo IPH 2 não respondeu bem e de forma satisfatória no intervalo de transição do período de maio e setembro. A principal razão talvez tenha sido devido às limitações do modelo IPHS1 e provavelmente aos erros de estimativas de alguns parâmetros hidrológicos daquela região específica.

Na Figura 11 o fluviograma dos resultados observados e simulados apresenta-se com comportamento satisfatório em alguns intervalos do período analisado. Porém, apresenta discrepâncias no período de transição do período chuvoso (junho a setembro).



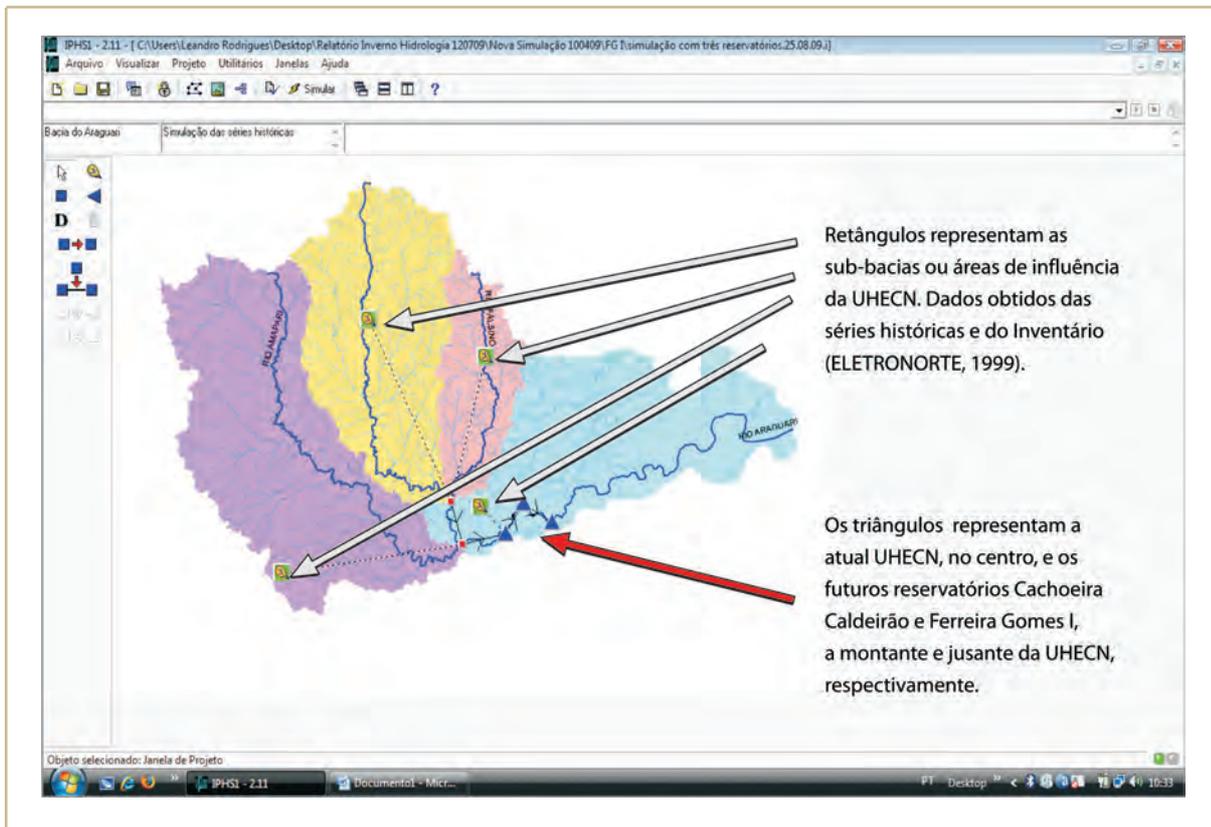
**Figura 10.** Fluviograma da estação de Porto Platon localizada na bacia do rio Araguari.

Na simulação de cenário atual, considerando-se somente a presença do reservatório da UHECN, foram obtidos os resultados da Figura 11. Percebe-se uma boa correlação entre os resultados simulados e observados.



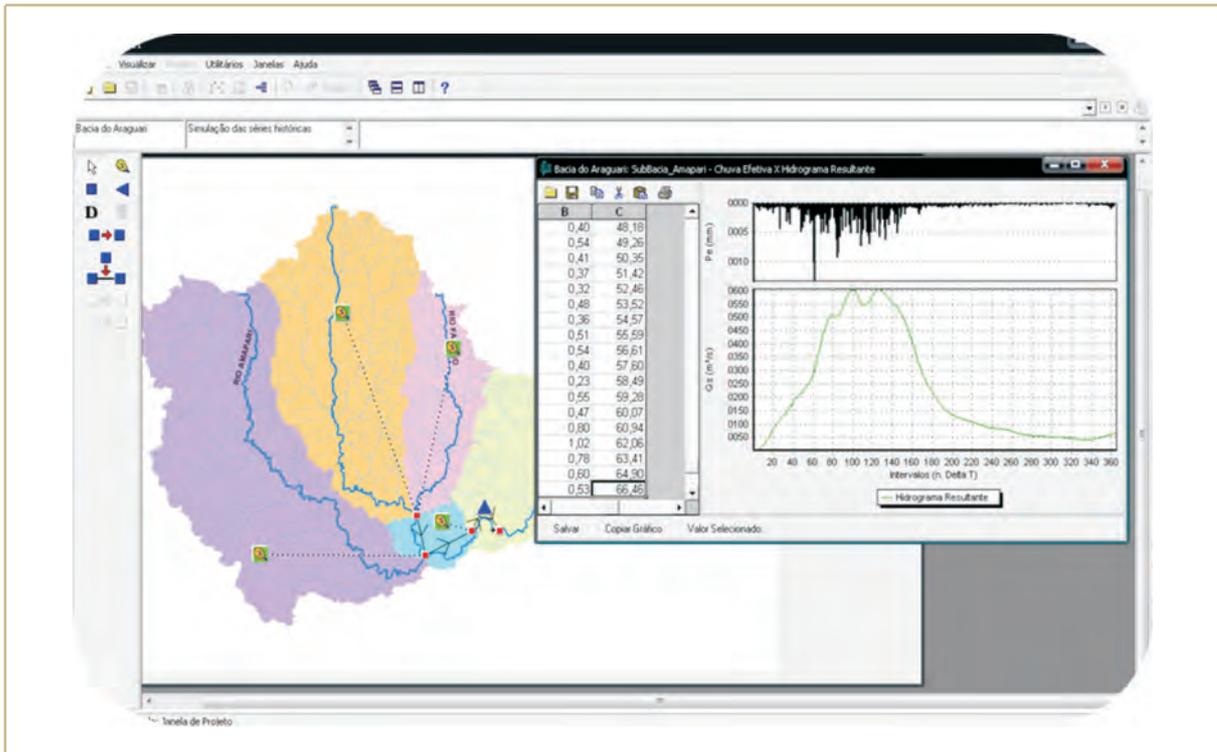
**Figura 11.** Fluviograma da série histórica da UHECN, cuja estação é denominada de Coaracy Nunes (rio Araguari).

A análise do comportamento chuva x vazão em estações de controle pode ser visualizada pela Figura 12. Observa-se a representação das sub-bacias do Amapari, Falsino e trechos superiores e médios da bacia do rio Araguari. Por meio destas sub-bacias indicadas foi possível simular a propagação de cheias no canal principal até o trecho de potencial instalação dos AHEs Cachoeira Caldeirão e Ferreira Gomes I.



**Figura 12.** Ambiente gráfico do IPHS1 representando a bacia do Araguari com destaque para os reservatórios futuros Cachoeira Caldeirão e Ferreira Gomes I (indicado pela linha vermelha). Fonte: Ecotumucumaque (2009).

As simulações da propagação das cheias indicam que deverão ocorrer influências de amortecimento dos picos de vazão, alterando o comportamento hidrológico do trecho em decorrência dos futuros AHEs. Por meio das respostas hidrológicas analisou-se o fluviograma observado e o simulado de cada sub-bacia, inclusive em um posto de observação na UHECN. Desta forma, foi possível avaliar com certa aproximação o comportamento das vazões em qualquer trecho da sub-bacia do rio Araguari, de forma que permitiu-se avaliar posteriormente a influência dos referidos AHEs. O comportamento da curva chuva-vazão é indicado na parte superior direita da Figura 13.

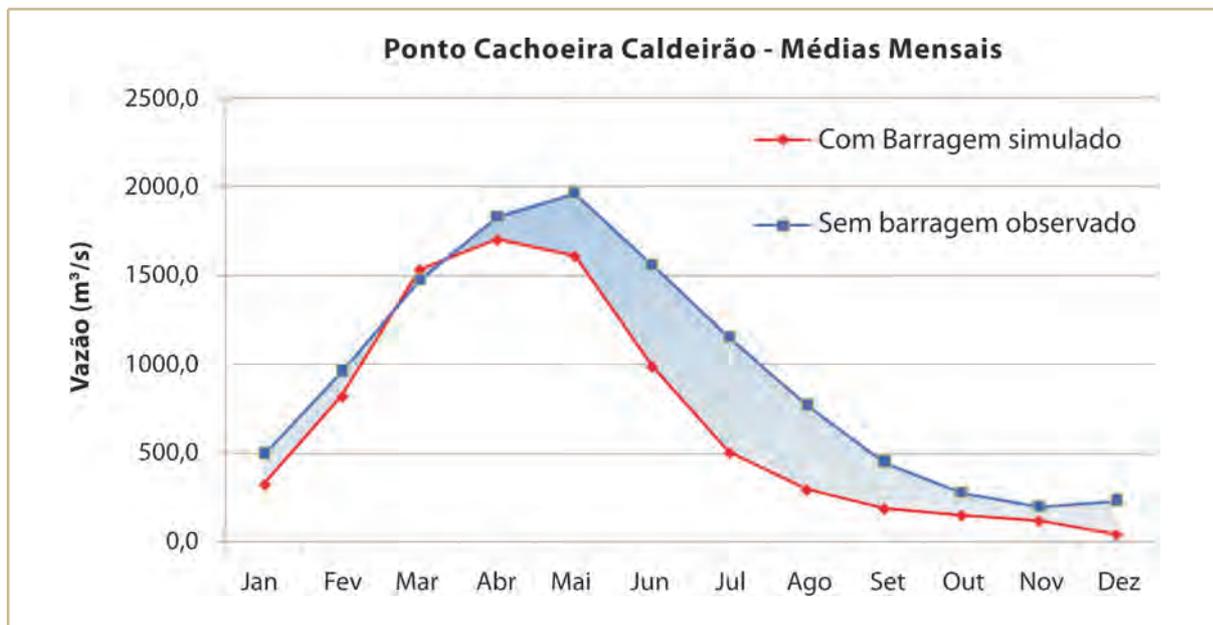


**Figura 13.** Análise da propagação de cheias – chuva x vazão com as médias diárias de precipitação média diária (1973-2006).

Na Figura 13 observa-se a representação das sub-bacias do Amapari, Falsino e partes superiores e médias da bacia do rio Araguari. Por meio da subdivisão em sub-bacias foi possível simular a propagação de cheias e suas influências diretas na seção da barragem de Coaracy Nunes e futuros AHEs. Por intermédio das respostas hidrológicas analisou-se o fluviograma observado e o simulado, inclusive na UHECN, verificando-se que o modelo IPH2 respondeu razoavelmente bem para algumas situações, como na parte superior da bacia e sub-bacias do Amapari e Falsino. Por outro lado, respondeu razoavelmente bem para os trechos médios da bacia, onde se encontram os atuais e futuros empreendimentos.

A seguir, são apresentados os resultados finais das alterações do comportamento hidrológico em estações onde serão construídos os AHEs Cachoeira Caldeirão e Ferreira Gomes I.

Na análise, observa-se o comportamento hidrológico do curso d'água considerando a intervenção dos empreendimentos nesse regime, bem com sua influência nos demais usos desse recurso (Figura 14 e 15). A presença da nova barragem amortece significativamente a curva chuva-vazão, principalmente após o período de transição e estiagem.



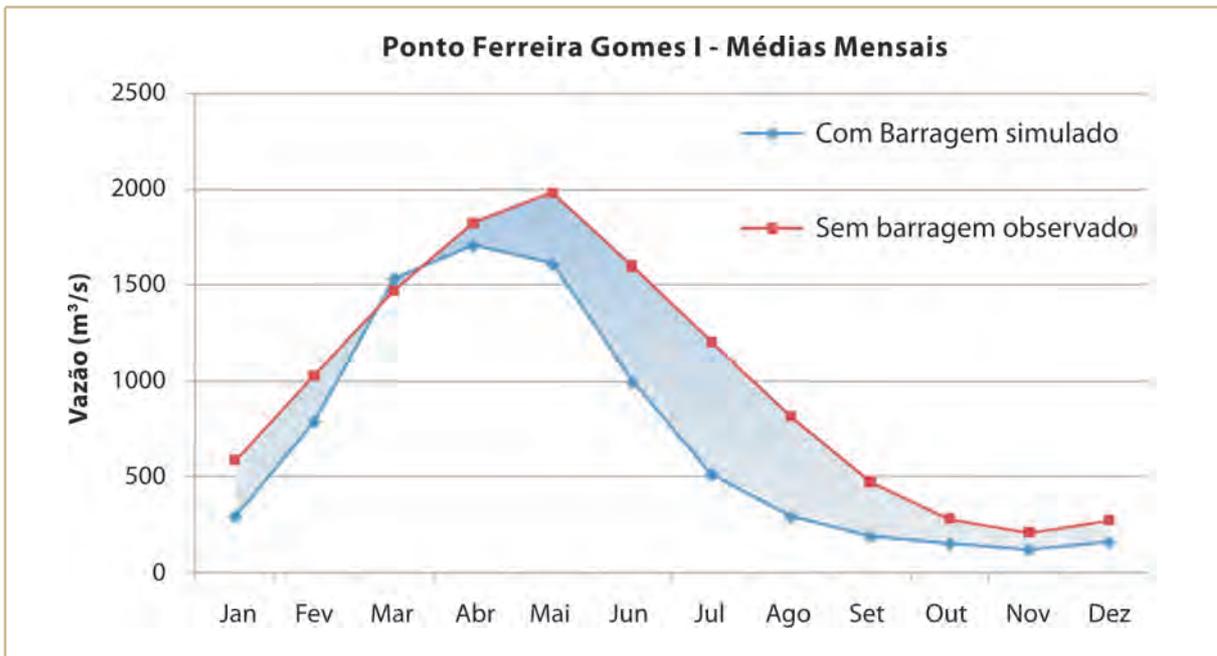
**Figura 14.** Hidrograma de vazão **com** e **sem** reservatório do AHE de Cachoeirão Caldeirão.

A diferença significativa entre a vazão de entrada e de saída do reservatório de Cachoeira Caldeirão (área em azul) pode ser avaliada porque após o barramento ocorrerá maior retenção de água da vazão de entrada, ocasionando a formação de área alagada.

A construção do AHE Cachoeira Caldeirão será muito importante para o controle fluviométrico local, pois poderá ser uma alternativa de acúmulo hidráulico para elevar o tempo de permanência da energia firme da UHECN localizada à jusante de Cachoeira Caldeirão (especialmente a UHECN e AHE Ferreira Gomes I).

No entanto, percebeu-se também que, quando se comparam as vazões de entrada do AHE de Cachoeira Caldeirão e da barragem de Coaracy Nunes, os dados são praticamente iguais. Isto pode ser explicado por dois fatores: 1) potencial falha de valores físicos da bacia hidrográfica ou insuficiência de dados da série histórica fluviométrica na qual foi feito um preenchimento de dados por comparação; 2) a distância entre os reservatórios é de apenas 8,6 km, muito pequena, não proporcionando contribuição lateral na vazão entre os postos e por não haver afluentes com contribuições significativas entre eles.

Na Figura 15 o AHE Ferreira Gomes I influenciará o comportamento hidrológico local, o qual deverá reduzir os picos de cheia de forma significativa quando comparados às situações com e sem o empreendimento, contudo com menor intensidade, pois esta será operada a fio d'água.



**Figura 15.** Hidrograma de vazão **com** e **sem** reservatório do AHE de Ferreira Gomes I.

Além disso, na Figura 15 se observa um comportamento similar entre os resultados simulados e observados. As duas curvas do hidrograma estão relativamente próximas durante todo o período chuvoso (JFMAM) e no fim do período seco (OND), afastando-se no período de transição (JJAS). É importante observar que a distância entre os reservatórios da UHECN e Ferreira Gomes I é de aproximadamente 11 km. Isto é, considerada relativamente pequena, de sorte que não proporciona contribuição lateral significativa a ponto de causar variação na vazão entre os empreendimentos. Além disso, entre a UHECN e Ferreira Gomes I não existem rios afluentes com vazões significativas para alterar essa condição. Esses fatores fazem com que, tanto em Cachoeira Caldeirão quanto em Ferreira Gomes, as respostas dos hidrogramas sejam semelhantes, mas não necessariamente iguais.

#### 4. CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento do ciclo hidrológico na bacia do rio Araguari com uso de dados médios diários das vazões em trechos de interesse de aproveitamento hidrelétrico.

Os resultados da análise apontam para o fato de que ainda é necessária a construção de uma base teórica mais robusta para auxiliar estudos e projetos de geração de energia elétrica, em especial quando se consideram outros parâmetros necessários para os estudos de impactos ambientais futuros na bacia, como os trechos de jusante aos empreendimentos atuais e futuros. Dentre os parâmetros de maior interesse encontram-se a vazão potencial ambiental (ecológica) normalmente não bem definida apenas

por parametrização hidrológica, necessitando de outras variáveis ecológicas como qualidade da água, avaliação de espécies aquáticas endêmicas, valores culturais associados aos usos múltiplos e relação dos usos culturais com o interesse econômico.

Contudo, neste trabalho avaliou-se apenas um dos aspectos mais relevantes considerados nos empreendimentos hidrelétricos: comportamento hidrológico na bacia de forma que se relacionem os processos físicos de chuva-vazão com outras informações como parâmetros geográficos, hidráulicos, características do solo, cobertura e vegetação, entre outras importantes.

Neste aspecto, o modelo IPH2 foi capaz de simular com razoável coerência as principais respostas gerais concernentes às perturbações hidrológicas de entrada na bacia do rio Araguari (chuva), apresentando razoáveis respostas (vazão) quanto ao fenômeno de propagação das ondas de cheias. Estes resultados podem ser considerados como iniciais, mas relevantes na análise de diagnósticos e prognósticos ambientais na bacia hidrográfica. Além disso, apresentam-se como um indicativo do atual comportamento hidrológico na bacia, necessitando, naturalmente, de aprofundamentos para estudos futuros.

A análise desta pesquisa, apesar de pouco profunda, apresenta-se como um norte para discutir lacunas de conhecimentos sobre a bacia, observando quais parâmetros são necessários estudar com maior precisão. Por exemplo, por que as sub-bacias do rio Amapari e do rio Falsino apresentaram melhores respostas quando comparados os dados observados e simulados do que para o médio rio Araguari (Porto Platon ou Serra do Navio), onde estão localizados os futuros AHEs e a atual UHECN?

Somente com maior número de informações e melhora da qualidade dos dados hidrológicos será possível o obter respostas a esses questionamentos, os quais devem ser complementados sistematicamente com novos dados. A consequência deverá ser o aumento da confiabilidade das séries, de forma que os parâmetros utilizados ou obtidos proporcionem uma melhora sistemática das respostas do modelo neste trecho da bacia, melhorando a previsibilidade de eventos hidrológicos (cheias ou secas) na bacia hidrográfica do rio Araguari.

Nestes termos, podemos resumir as principais contribuições descritas a seguir:

- 1) Foi realizada uma breve análise sobre as informações geradas pelo inventário da ANEEL e de séries históricas disponíveis em conjunto com a abordagem da simulação computacional. Ambas trabalhadas conjuntamente apresentam vantagens técnicas na análise de diagnósticos e prognósticos ambientais;
- 2) Foi gerada uma série de novas informações sobre as características hidrológicas da bacia do rio Araguari, em especial para a elaboração da caracterização física das principais sub-bacias e da rede hidrográfica da parte superior e média onde ocorrerão os principais impactos ambientais decorrentes de construção de novos AHEs. Para tanto, as análises de séries históricas de dados foram utilizadas para os principais cursos d'água na bacia do rio Araguari (Porto Platon, Leônidas, Ramos, Serra do Navio, Capivara);

- 3) A simulação computacional hidrológica mostrou seu potencial para avaliar a propagação dos efeitos chuva-vazão ao longo de um período anual do ciclo hidrológico com e sem os empreendimentos hidrelétricos. Neste aspecto, foi possível estimar respostas realísticas (apesar de limitadas) da interação chuva-vazão relevantes aos aspectos operacionais de hidrelétricas e suas correlações com aspectos ecológicos, tais como potencial de vazão ambiental, muito utilizado para determinar parâmetros de gestão de recursos hídricos à jusante de barragens;
- 4) O comportamento hidrológico na bacia apresentou uma forte relação com o potencial hidrelétrico nos trechos estudados, considerando os aspectos físicos da bacia hidrográfica como precipitação, escoamento superficial, vegetação, geomorfologia, escoamento sub-superficial, evapotranspiração etc.;
- 5) Deu-se início a uma abordagem em que se consideram os aspectos hidrometeorológicos nos estudos de impacto ambiental, nos quais é possível avaliar os impactos da inserção de novos AHEs na bacia, considerando aspectos de pré-análise, tais como pré-calibração e validação futura de modelos desta natureza;
- 6) A relevância do tema é confirmada pela política nacional do meio ambiente ao promulgar estudos preliminares para avaliar impactos ambientais que podem ser causados pela construção de empreendimentos hidrelétricos, os quais alteram significativamente a dinâmica do regime hidrológico inserido no ecossistema local;
- 7) A presente análise pode fazer parte fundamental de uma das etapas necessárias para a elaboração de um diagnóstico ambiental direcionado a novos AHEs na bacia hidrográfica, indicando possíveis discrepâncias entre valores dos fluviogramas observados e os simulados;
- 8) Somente com a geração e disponibilização de novos dados em outras localidades na bacia hidrográfica é que será possível elaborar novas hipóteses sobre o funcionamento hidrológico da bacia. Assim, uma análise preditiva quanto mais eficiente for para a análise do comportamento hidrológico da bacia, maior será sua utilidade para estudar trechos impactados pelos AHEs, de sorte que se objetive sempre a maximização dos múltiplos usos dos recursos hídricos na bacia.
- 9) As curvas representativas dos hidrogramas de vazão (observada e simulada) são indicativos excelentes que, apesar das simulações serem baseadas em poucos dados físicos da bacia, servem como ponto de partida para estudos mais profundos da hidrologia local.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos projetos REMETAP (FINEP/CNPq - MCT) e REMAM (FINEP/CNPq - MCT).

## 6. REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas. *Site Hidroweb*. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acessado em: 04 de abril de 2009.
- BÁRBARA, V. F. *Uso do Modelo QUAL2E no Estudo da Qualidade da Água e da Capacidade de Autodepuração do Rio Araguari – AP (Amazônia)*. 2006. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente), Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2006.
- BRITO, Daímio C. *Aplicação do Sistema de Modelagem da Qualidade da Água Qual2kw em Grandes Rios: O Caso do Alto e Médio Rio Araguari – AP*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amapá, 2008.
- BRUN, G. W. *Previsão Contínua em Tempo Real do Volume de Afluência do Reservatório: Ernestina, RS*. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999. 95 p.
- CUNHA, A. C. *Determinação do Coeficiente de Reaeração no Modelo QUAL2E Utilizando as Características Hidráulicas de Canais Abertos para Estudos de Impactos Ambientais no Rio Araguari – AP*. Projeto de Pesquisa CPAQ/IEPA e SETEC/CNPq. Programa Primeiros Projetos. Relatório CNPq. Macapá, AP, 2004. p. 20.
- ECOTUMUCUMAQUE. *Estudo de Impacto Ambiental Pequena Central Hidrelétrica Capivara*. Amapá, 2008.
- ECOTUMUCUMAQUE. *Diagnóstico Meio Físico para o EIA/RIMA de Cachoeira Caldeirão e Ferreira Gomes*. No prelo, com Permissão. Amapá, 2009.
- ELETRONORTE, *Inventário Hidrelétrico*, CD-ROM. Macapá-AP, 1999.
- GERMANO, A.; Tucci, C. E. M. et al. Estimativas dos Parâmetros do Modelo IPH2 para algumas Bacias Urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 3, n. 4, 1998. p. 103-120.
- SILVEIRA, G. L., CRUZ, J. C. SILVERIA, A. L. L. Avaliações hidrológicas: In: SILVEIRA e CRUZ (Orgs.). *Seleção ambiental de Barragens: análise de favorabilidade ambientais em escala de bacia hidrográfica*. Rio Grande do Sul: Editora UFSM/ ABRH, 2005. p 103-150.
- TUCCI, C. E. M.; Zamanillo, E. A. et al. *Sistema de Simulação Precipitação-Vazão IPHS1*. Porto Alegre: IPH-UFRGS, 1989. 66p.
- SOUZA, L.R. *Experimentação, Modelagem e Simulação Hidrológica Aplicadas ao uso de Energia Hidrocinética na Bacia do Rio Maracá*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Amapá, 2009.
- TUCCI, C. E. M.; Zamanillo, E. A. et al. *Sistema de Simulação Precipitação-Vazão IPHS1*. Porto Alegre: IPH-UFRGS, 1989. 66p.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. ABRH. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998. 669 pp.
- VIEGAS FILHO, C. E. M, TUCCI, VILLANUEVA, A, G. ALASIA., TASSI, T., & R. C. F. DAMÉ. *Manual do usuário IPHS1 para Windows*, v. 2.11 – PDF. IPH/UFRGS, Porto Alegre/RS, 2004.46 p.

## Variabilidade Hidrológica da Bacia do Rio Jari (AP): Estudo de Caso do Ano de 2000

**Msc. Met. Edmundo Wallace Monteiro Lucas**

edmundo.lucas@inmet.gov.br

Msc. Meteorologia. Técnico de Nível Superior do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Brasília – DF

**Msc. Met. Naurinete Jesus da Costa Barreto**

naurinete.barreto@iepa.ap.gov.br

Meteorologista e Bolsista DTI Nível II, CNPq/MCT do NHMET/IEPA.

**Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha**

alancunha@unifap.br

Ex-coordenador do NHMET/IEPA, coordenador do Projeto REMETAP, prof. do curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e PPGBio/PPGDAPP-UNIFAP.

**Resumo.** Este trabalho apresenta uma contribuição aos estudos de modelagem hidrológica estocástica aplicada a bacia hidrográfica do rio Jari, no Estado do Amapá, cuja ênfase é dada aos eventos extremos climáticos com potencial capacidade de causar prejuízos e danos econômicos e sociais locais. Inicialmente foi avaliada a variabilidade climática do período chuvoso na região da bacia do rio Jari (AP), na qual se observou que o regime apresenta forte sinal interanual, com intercalação entre anos secos, normais e chuvosos. A metodologia consistiu na seleção do ano de estudo, considerando como situação significativamente anômala para a variável precipitação o período chuvoso de 2000. O ano de 2000 foi selecionado devido às nítidas alterações no regime hidrológico na bacia do rio Jari. Para tanto, foi realizada uma análise das séries históricas das componentes hidrológicas, com destaque para as cotas e as vazões em uma única estação da bacia hidrográfica. Adicionalmente foi aplicado o modelo estocástico Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) utilizado para simular as vazões e cotas mensais (médias, mínimas e máximas) para o referido ano hidrológico, caracterizado como de anomalia positiva de chuva. A conclusão do estudo foi disponibilizar os resultados por intermédio de uma ferramenta eficaz na prevenção e monitoramento de eventos hidrológicos extremos. As simulações apresentaram excelente correlação com valores observados das séries históricas, nas quais o modelo ARIMA apresentou melhores resultados na simulação das cotas e vazões médias e máxima mensais durante o período seco.

**Palavra-chave:** ARIMA, modelo estocástico, precipitação pluviométrica, cotas e vazões, bacia do rio Jari (AP).

## 1. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Jari está situada na fronteira entre os Estados do Pará e Amapá. Está localizada na região sul do Estado do Amapá e extremo Norte do Pará, a qual proporciona uma condição climática de extrema vulnerabilidade a eventos extremos naturais, principalmente enchentes e alagamentos urbanos de grandes proporções (MARQUES e CUNHA, 2008). Apesar desta região ser de alta vulnerabilidade climática, atualmente existem poucos dispositivos que promovam o eficiente monitoramento de superfície. Talvez uma das razões que causam efeitos adversos à região, em especial à cidade ribeirinha de Laranjal do Jari, seja devido às alterações sofridas no canal do leito do rio, as quais podem intensificar os efeitos adversos causados pelos eventos extremos. A enchente ocorrida em 2000 reflete bem essa realidade, mas também descortina a fragilidade do sistema de prevenção no Estado do Amapá.

A importância das atividades de monitoramento de eventos extremos, além de caracterizar sua natureza, foi registrada por Marques e Cunha (2008) ao analisarem os impactos negativos da grande enchente no rio Jari ocorrida em 2000. Este evento ocorreu no período de 14 de abril a 14 de julho de 2000 e seus malefícios causaram consequências sociais, econômicas e ambientais que repercutem até os dias atuais. Os referidos autores asseveram que, ao analisarem a Avaliação de Danos da Defesa Civil do Amapá (AVADAN), a ordem dos prejuízos gerais causados pelo evento extremo superou em várias vezes o orçamento municipal. Isto é, apenas um único evento destas proporções provocou o caos naquele município e um prejuízo a ponto de praticamente inviabilizá-lo financeiramente.

Neste sentido, o monitoramento hidrológico torna-se extremamente necessário para conhecer o padrão climático da região, atribuições fundamentais de qualquer estudo para implantar instrumentos técnicos que possam elevar os níveis da confiabilidade da informação na prevenção desse tipo de evento. Em especial, porque nesta bacia hidrográfica há uma carência enorme de informações, tanto no contexto climático como no que diz respeito aos aspectos hidrológicos. No contexto da climatologia de precipitação, sabe-se que a Amazônia Oriental (principalmente Pará e Amapá) apresenta basicamente dois períodos característicos: um regime de chuva que se processa durante o verão e outono austral, ou seja, inicia-se em dezembro e se estende até maio, e o período de estiagem que ocorre durante o inverno e primavera do hemisfério sul (SOUZA & AMBRIZZI, 2003; SOUZA *et al.*, 2009).

Estudos com enfoque sobre a Amazônia Oriental indicam que a variabilidade da chuva sazonal durante a estação chuvosa é dependente diretamente dos mecanismos climáticos de grande escala que se processam nos dois oceanos tropicais adjacentes: o Oceano Pacífico e o Oceano Atlântico (SOUZA *et al.*, 2004) e que a ZCIT é o principal sistema meteorológico indutor de chuva nesta região quando da sua posição climatológica mais para sul, que define a qualidade da estação chuvosa, principalmente nos Estados do Amapá e Pará, incluindo a bacia do rio Jari (SOUZA *et al.*, 2000; SOUZA *et al.*, 2009). Estes

estudos indicaram que sobre a região há uma elevada variabilidade no total de chuva entre um ano e outro, evidenciando a alta variabilidade climática interanual.

Em relação à hidrologia, sabe-se que a mesma é basicamente modulada por alterações no regime de chuva, sendo possível a realização de previsão hidrológica principalmente por intermédio de dois tipos de abordagem: uso de modelos determinísticos do tipo chuva-vazão e uso de modelos estocásticos (probabilísticos).

Na primeira abordagem, os modelos objetivam a representação dos processos físicos de transformação de chuva em vazão, enquanto os modelos estocásticos se baseiam na análise da estrutura de dependência temporal das séries de aflúências. As previsões de vazões para o planejamento de médio e curto prazo tendem a ser feitas por intermédio de modelos estocásticos e as previsões para curtíssimo prazo podem ser realizadas por meio de modelos físicos determinísticos.

Neste contexto, o presente estudo visa especificamente identificar os anos hidrológicos extremos e simular as vazões mensais (média, mínima e máxima) e cotas (média, mínima e máxima), na bacia hidrográfica do rio Jari. Para atender a estes objetivos foi utilizado o método de projeção Box-Jenkins (1976), representado por intermédio dos modelos ARIMA. A avaliação de desempenho do modelo também foi discutida, de forma que ele possa ser usado como ferramenta decisiva na prevenção de acontecimentos hidrológicos extremos e no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos da região em estudo. Atualmente, esta ferramenta está cotada como de extrema utilidade para a inserção de novos estudos regionais, a exemplo do projeto de pesquisa aplicado sobre o comportamento hidrometeorológico e ambiental na bacia hidrográfica do rio Jari (CUNHA, 2008).

## 2. MATERIAS E MÉTODOS

Foi selecionada para este trabalho a estação fluviométrica e pluviométrica de São Francisco, localizada na bacia hidrográfica do rio Jari, no Estado do Amapá, região da Amazônia Oriental (Figura 1). Além do destaque da estação de São Francisco, a Figura 1 também mostra a localização das sedes municipais e área de drenagem direta do canal principal. Observa-se que nesta estação localiza-se à montante da sede municipal de Laranjal do Jari, de tal forma que os eventos registrados nesta estação possivelmente proporcionam registros importantes no nível do rio Jari no trecho próximo da cidade de Laranjal do Jari, mas com uma defasagem temporal devido a resposta do rio aos eventos. Desta forma, esta estação funciona como o mais importante posto de monitoramento da região e principalmente para atender aos objetivos desta pesquisa, que é a análise estatística das séries hidrológicas históricas.

Os dados desta estação compreendem um período de mais de 30 anos (1974-2008), sendo que sua consistência permitiu a utilização dos registros mensais de vazões (máxima, mínima e média) e cota mensal (máxima, mínima e média) do rio Jari além da precipitação pluviométrica mensal (ANA, 2009).

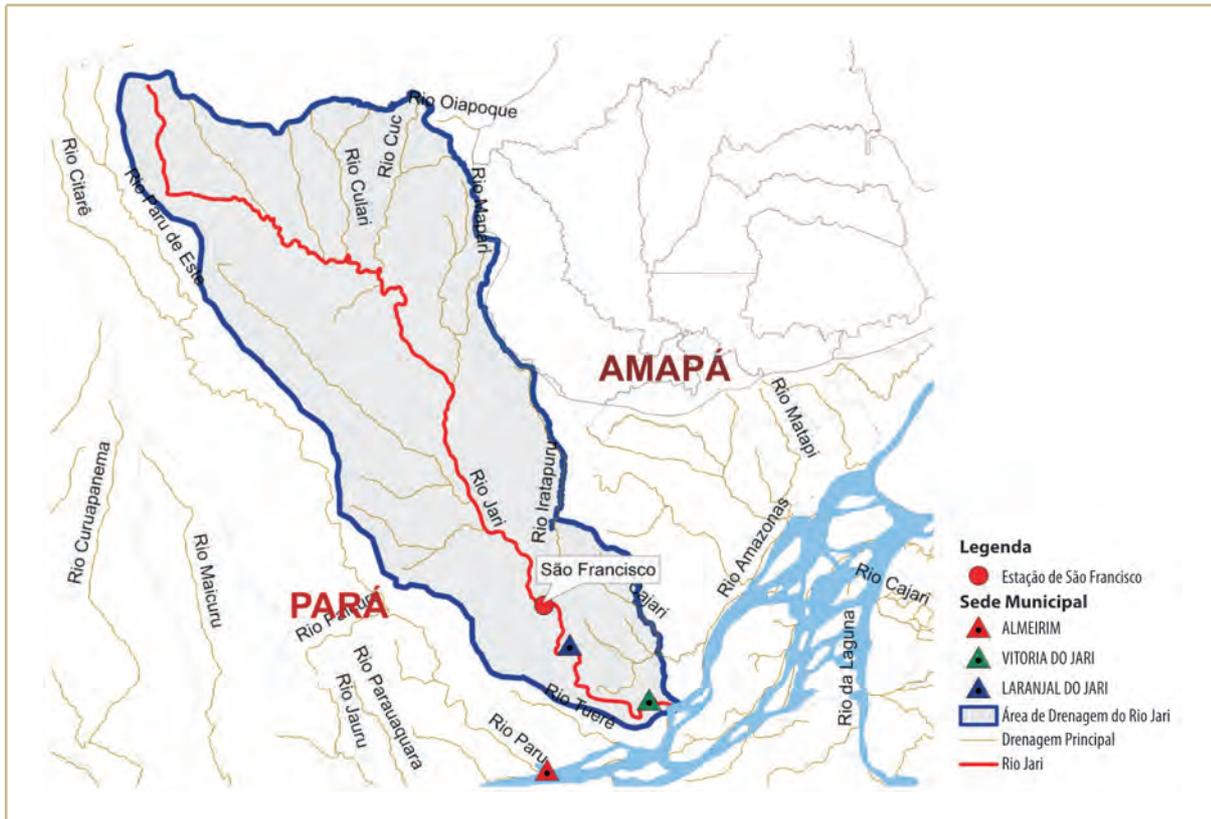


Figura 1. Localização da estação fluviométrica de São Francisco na bacia do rio Jari, no Estado do Amapá.

## 2.1. Seleção dos eventos

Os dados de precipitação foram distribuídos em classes para caracterizar os períodos de acordo com a intensidade do evento utilizando a técnica de quantis, de forma que o conjunto de dados mensais de chuva para o período foi associado com uma probabilidade  $p$  univocamente para cada valor mensal (XAVIER, 1999). Conforme Lopes (2009), esta técnica consiste na distribuição em ordenamento crescente de uma série amostral, de maneira que a série temporal pode ser ordenada da seguinte forma:  $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ , onde  $x_1$  representa o menor valor e  $x_n$  o maior valor da série. O índice  $n$  constitui o tamanho da amostra. Em seguida, calculam-se os quantis, particularmente os percentis, visto que a divisão considera cinco categorias ou classes de precipitação. Em seguida são obtidas as ordens quantílicas e a classificação em grupos a partir da série histórica. Este trabalho reservou algumas ordens quantílicas-chave, notadamente,  $q_{0,15}$ ;  $q_{0,35}$ ;  $q_{0,65}$  e  $q_{0,85}$  para estabelecer as seguintes classes com relação aos valores mensais observados ( $x_i$ ) de precipitação:

**Tabela 1.** Classes de precipitação utilizada na análise das séries.

Classes de Precipitação	Critério
Muito abaixo do normal	$x_i \leq q_{0,15}$
Abaixo do normal	$q_{0,15} < x_i \leq q_{0,35}$
Normal	$q_{0,35} < x_i < q_{0,65}$
Acima do normal	$q_{0,65} \leq x_i < q_{0,85}$
Muito acima do normal	$x_i \geq q_{0,85}$

As classes indicadas pela Tabela 1 permitem, portanto, selecionar de forma objetiva e rápida os eventos climáticos anômalos e de interesse para estudo em um determinado mês  $i$ , tais como episódios de extremos secos e chuvosos, bem como o padrão normal. Como o foco é centrado no período chuvoso da região (março a maio) a técnica de quantis foi aplicada no período de dezembro a maio. Ou seja, da pré-estação chuvosa (dezembro a fevereiro) até a estação chuvosa propriamente dita (março a maio). O ano extremo selecionado foi o que apresentou sinal muito acima e acima do normal persistente por mais de cinco meses. Desta forma, o período extremo selecionado foi de dezembro de 1999 a novembro de 2000.

Após esta etapa metodológica, foram estimadas as vazões e cotas (médias, mínimas e máximas) mensais para o ano hidrológico identificado com anomalia positiva de chuva (ano de cheia) com o uso do modelo estocástico ARIMA.

## 2.2. Modelo ARIMA

Para aplicação de um modelo estocástico é necessária a compreensão de alguns conceitos estatísticos. Dentre os mais importantes encontram-se a análise de séries temporais (estacionárias e não estacionárias), função de autocorrelação (ACF) e função de autocorrelação parcial (PACF) descritas abaixo.

Séries temporais referem-se a conjuntos de observações de uma dada variável ordenada no tempo, podendo ser descrita por características básicas como tendência e sazonalidade. As séries temporais devem apresentar uma dependência entre as variáveis. As observações de uma série temporal  $Z_t$ , em que  $t = 1, 2, 3, \dots, n$ , podem ser decomposta da seguinte forma:

$$Z_t = T_t + S_t + a_t \quad (1)$$

$T_t$  e  $S_t$  representam tendência e sazonalidade da série, respectivamente, e  $a_t$  é uma variável aleatória de média zero e variância constante, também denominada de resíduo da série.

Séries temporais estacionárias representam processos com variância e covariância que se apresentam em torno de uma média. Isto é, os dados das variáveis analisadas se comportam de forma mais equilibrada, sem grandes variações. Por outro lado, as séries temporais não estacionárias representam dados que não possuem uma aproximação de valores entre as amostras das variáveis analisadas, podendo variar abruptamente ao longo do tempo.

A ACF mede o grau de dependência entre os valores de uma série temporal em diferentes períodos. Os valores dos coeficientes de autocorrelação medem ainda a memória do processo estocástico. Por outro lado, a PACF pode ser definida como a sequência de correlações de uma série temporal  $(Z_t \text{ e } Z_{t-1})$ ,  $(Z_t \text{ e } Z_{t-2})$ ,  $(Z_t \text{ e } Z_{t-3})$  e assim por diante, com os efeitos de defasagens anteriores sobre  $Z_t$  constantes. A PACF é aplicada aos resíduos da série.

O modelo estocástico de série temporal ARIMA é uma generalização dos modelos autorregressivo (AR) e médias móveis (MA) (BOX e JENKINS, 1976). Diante de uma série temporal sazonal não-estacionária, para que um modelo ARIMA seja empregado é necessário remover os efeitos da sazonalidade da série e transformá-la em estacionária efetuando uma diferenciação sazonal. Contudo, ocasionalmente é necessária na aplicação do modelo mais do que uma única diferenciação na série, cujo objetivo é atender aos requisitos do processo de modelagem. Portanto, é dotada de uma diferenciação na parte simples (d) e outra na parte sazonal (D).

Para aplicação de modelos dos tipos AR e MA a uma série temporal deve-se atender o requisito de estacionariedade nessa série. Ou seja, média, variância e autocorrelação constantes. Essa estacionariedade pode ser analisada pelos gráficos de autocorrelograma ACF e PACF. Os modelos supracitados incluem os termos de defasagem autorregressiva **AR(p)** e de médias móveis **MA(q)**. Dada a necessidade de tomar diferenças na série, o modelo é dito autorregressivo integrado de médias móveis – ARIMA (p, d, q). Para uma série temporal que apresenta sazonalidade, o modelo ARIMA é do tipo (p, d, q) (P, D, Q) para as partes simples e sazonais, respectivamente.

Uma metodologia empregada para atender os requisitos de aplicação do modelo estocástico ARIMA é transformar a série de dados em uma distribuição normal. Este processo pode ser obtido por meio da transformação Box-Cox (BOX e COX, 1964).

O modelo original de Box e Jenkins envolve três estágios interativos para seleção do modelo: **(i)** identificação do modelo; **(ii)** estimação do modelo e **(iii)** verificação de diagnósticos. A fase de identificação do modelo é a mais delicada do processo. Nessa fase analisa-se inicialmente a série e posteriormente analisa-se a ACF e PACF para identificar a ordem dos termos (p, d, q) e (P, D, Q). Outro ponto de avaliação é a quantidade de parâmetros, pois quanto mais parâmetros no modelo, maior o erro incorporado no processo. Com base no princípio da parcimônia, deve-se tentar ajustar a parte autorregressiva (**AR**) e das médias móveis (**MA**) do modelo com o menor número de ordens possível. Portanto, deve-se evitar ajustar mais que duas ordens em ambas as partes do modelo. Feita a análise da série e identificado o tipo de modelo ARIMA a ser usado, o próximo passo é a fase de estimativa dos parâmetros.

Na modelagem ARIMA essa estimativa é feita por meio da função de máxima verossimilhança. A última fase é a da verificação do diagnóstico, que é feita pelo termo do erro (resíduo), que deve constituir um processo de ruído branco, ou seja, apresentar uma distribuição normal com média zero, variância constante e sem correlação serial entre eles. A análise dos resíduos é importante para verificar se o modelo captura a dinâmica da série temporal em estudo. Executado os três processos com sucesso, a previsão pode ser feita. Caso contrário, deve-se reiniciar o ciclo novamente (LUCAS, 2007).

Galvêncio *et al.* (2002) simularam a vazão mensal na bacia hidrográfica do alto São Francisco por meio de dois modelos estocásticos: autorregressivo (**AR**) e médias móveis (**MA**) de ordem 1 para o período de 1978 a 1983. Os autores observaram que o modelo **MA** não representou bem os valores extremos para algumas estações. Entretanto, o modelo **AR** representou bem os valores extremos das vazões mensais. Contudo, não geraram de forma adequada os valores intermediários de vazões. Em ambos os modelos a persistência da série histórica foi preservada.

Lucas (2007) aplicou o modelo hidrológico determinístico mensal de dois parâmetros desenvolvido por Xiong e Guo (1999) e o modelo estocástico ARIMA, cuja metodologia foi descrita anteriormente onde foi citado por Box e Jenkins (1976) na simulação da vazão mensal das sub-bacias da região hidrográfica do Xingu no Estado do Pará.

O objetivo principal da referida análise foi simular a vazão mensal por meio dos modelos e comparar os seus resultados. O modelo hidrológico determinístico aplicado possuía uma estrutura simples e apresentou bons resultados. Porém, mostrou-se muito sensível a eventos extremos de precipitação. O modelo estocástico ARIMA capturou a dinâmica das séries temporais, apresentando resultados satisfatórios na simulação da vazão mensal nas estações apresentadas da bacia.

### 2.3. Teste de desempenho

A qualidade do desempenho do modelo foi testada por duas funções objetivas: o coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970) das vazões calculadas e observadas ( $R^2$ ). O valor esperado deve sempre ser próximo de 1 quando se tratar de uma simulação da série de vazão observada. E a diferença entre os volumes calculados e observados ( $\Delta V$ ) deve se aproximar de zero para uma boa simulação das vazões observadas representadas pelas equações 2 e 3:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{\sum (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2)$$

$$\Delta V = \frac{\sum (Q_{cal}(t)) - \sum (Q_{obs}(t))}{\sum (Q_{obs}(t))} \quad (3)$$

onde

- $Q_{obs}(t)$  é a vazão observada no intervalo de tempo ( $t$ )
- $Q_{cal}(t)$  é a vazão calculada no intervalo de tempo ( $t$ ),
- $\overline{Q}_{obs}$  é a média da vazão observada.

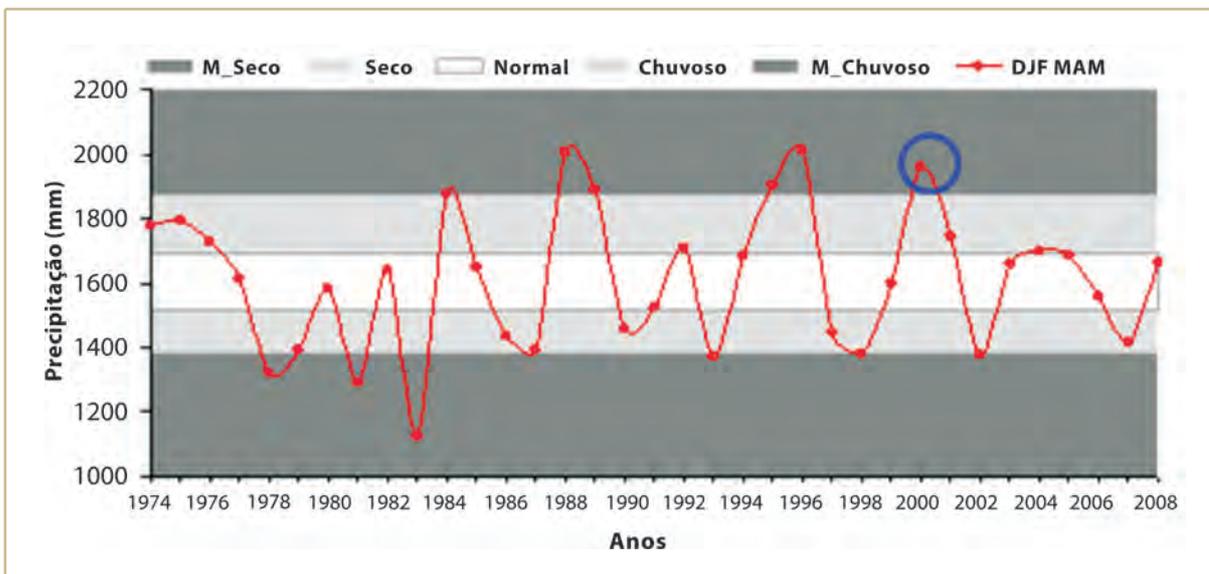
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Seleção dos eventos

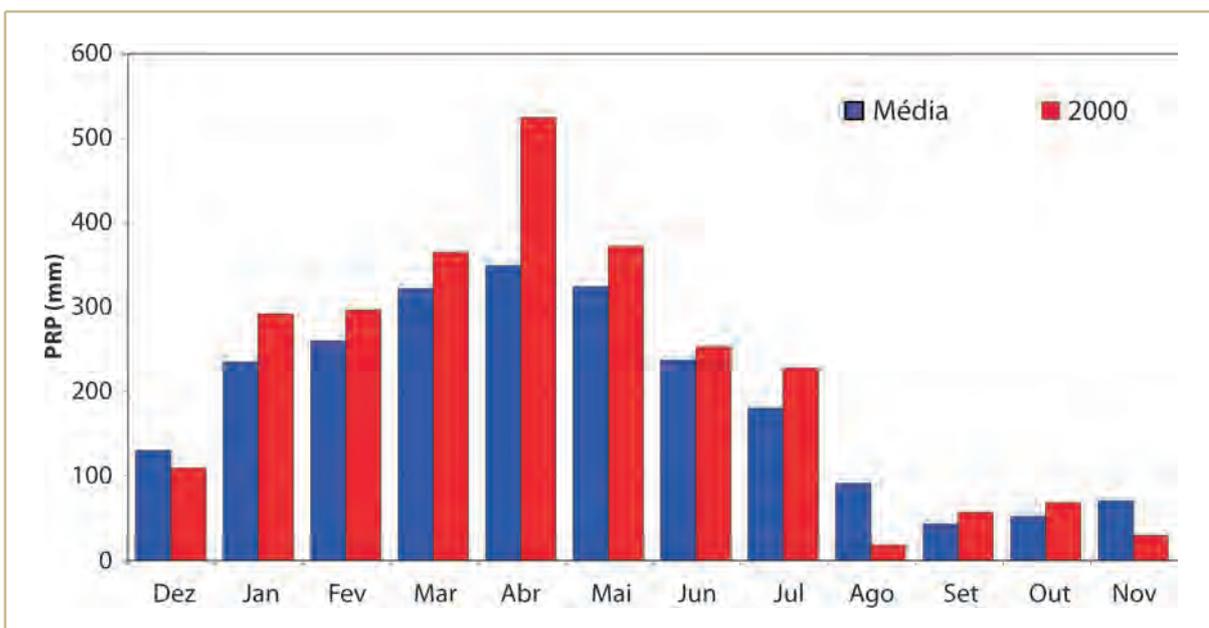
A Figura 2 apresenta a variabilidade do total de precipitação para os meses de dezembro a maio. As áreas em tom cinza escuro são os anos considerados extremos positivos e negativos, isto é, anos cujo regime de chuva durante o semestre de dezembro a maio foi classificado como muito seco ou muito chuvoso, conforme resultados obtidos pelo método dos percentis. As áreas em cinza mais claro são anos de extremos menos intensos e a faixa branca representa o intervalo de normalidade. Os maiores totais de precipitação nesta região ocorrem de dezembro a maio, o que corresponde a aproximadamente 75% do total anual. Observa-se na Figura 2 que o regime de chuva apresenta uma variabilidade interanual marcante, pois os períodos de normalidade são intercalados de períodos anômalos. Nota-se que a partir de 1984 até final da década de 1990 ocorreram menos eventos extremos negativos. Neste período, verificou-se uma oscilação entre anos normais, chuvosos e secos com maior ocorrência de anos muito chuvosos, com intervalo aproximado de quatro a cinco anos entre os eventos extremos.

Por se tratar de Laranjal do Jari, decidiu-se avaliar apenas um ano considerado como de extremo climático. Para tanto foi selecionado o ano de 2000. As razões foram decorrentes da manutenção de padrões de chuva acima do normal durante cinco dos seis meses de maior precipitação (permanência do fenômeno extremo). Segundo Marques e Cunha (2008), a enchente que ocorreu em Laranjal do Jari no ano de 2000 foi considerada a maior registrada na história da região.

Na Figura 3 são apresentadas as médias mensais ao longo do ano da precipitação climatológica (média 1974-2006) e do ano de 2000. Comparando a precipitação climatológica com a observada em 2000, observa-se que o regime das chuvas apresentou anomalias positivas, ou seja, predomínio de precipitação acima do padrão normal em praticamente todos os meses do ano. Ressalta-se o mês de abril quando o total mensal foi superior à climatologia em aproximadamente 200 mm. Os meses cujo período estudado não atingiu o nível de valor normal foram agosto, novembro e dezembro, com diferenças pouco significantes, exceto em agosto, bem abaixo do esperado.

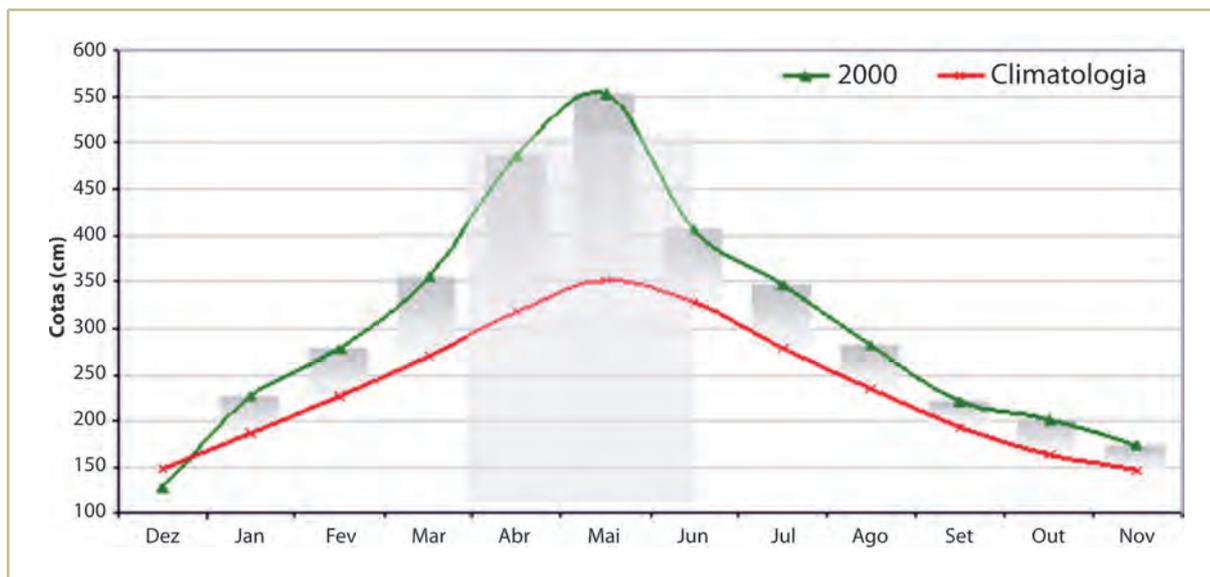


**Figura 2.** Série temporal dos totais sazonais de precipitação (dezembro a maio) na estação de São Francisco. O círculo em azul destaca a chuva muito acima do normal ocorrida no ano de 2000, evento estudado no presente trabalho.



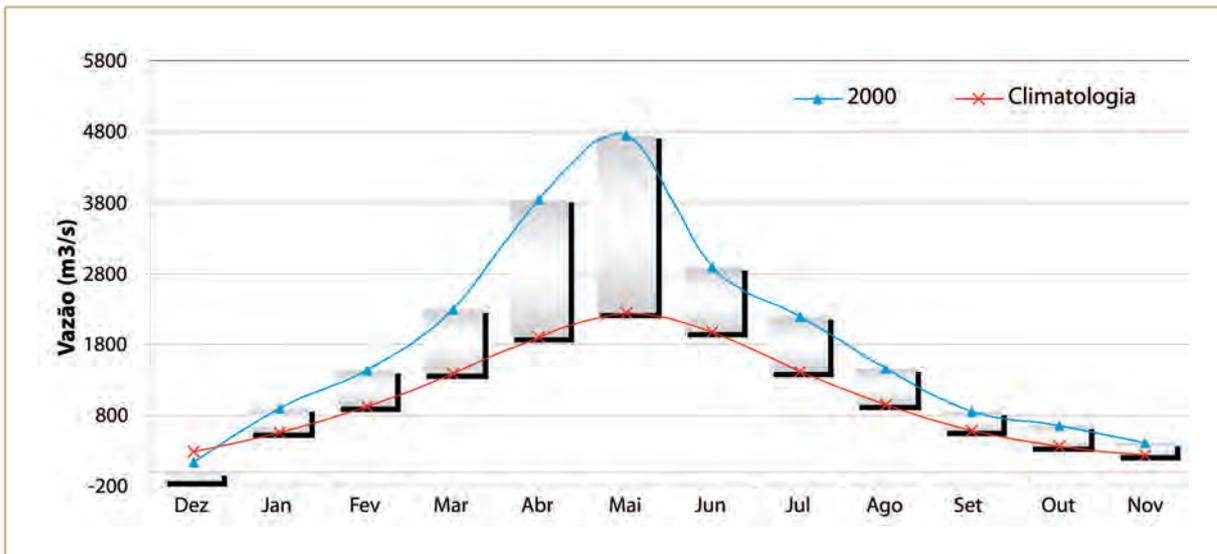
**Figura 3.** Comparação entre a climatologia e o evento extremo selecionado; a) precipitação pluviométrica (mm/mês<sup>-1</sup>) em São Francisco no Estado do Amapá. Fonte: ANA, 2009.

A Figura 4 apresenta a diferença de cotas entre os valores climatológicos e os valores médios observados para o ano de 2000. Em relação à estação de São Francisco foi observado que, durante o ano de 2000, as cotas médias mensais ficaram acima da média histórica ao longo de todos os meses. Nota-se ainda na Figura 4 que os valores máximos ocorreram durante os meses de março, abril e maio, com as cotas próximas de 50% acima dos níveis normais. Um exemplo foi o mês de abril, cuja média foi de 350 cm e o observado foi de 550 cm.



**Figura 4.** Comparação entre a climatologia e o evento extremo selecionada; cota média mensal (cm) em São Francisco no Estado do Amapá. Fonte: ANA, 2009.

A Figura 5 apresenta a diferença de vazão entre as médias climatológicas e os valores médios observados no ano de 2000 na estação de São Francisco. Observa-se nesta figura uma mesma configuração dos padrões observados na análise anterior das vazões, tanto em cota como em chuva, confirmando o padrão anômalo do ano de 2000.



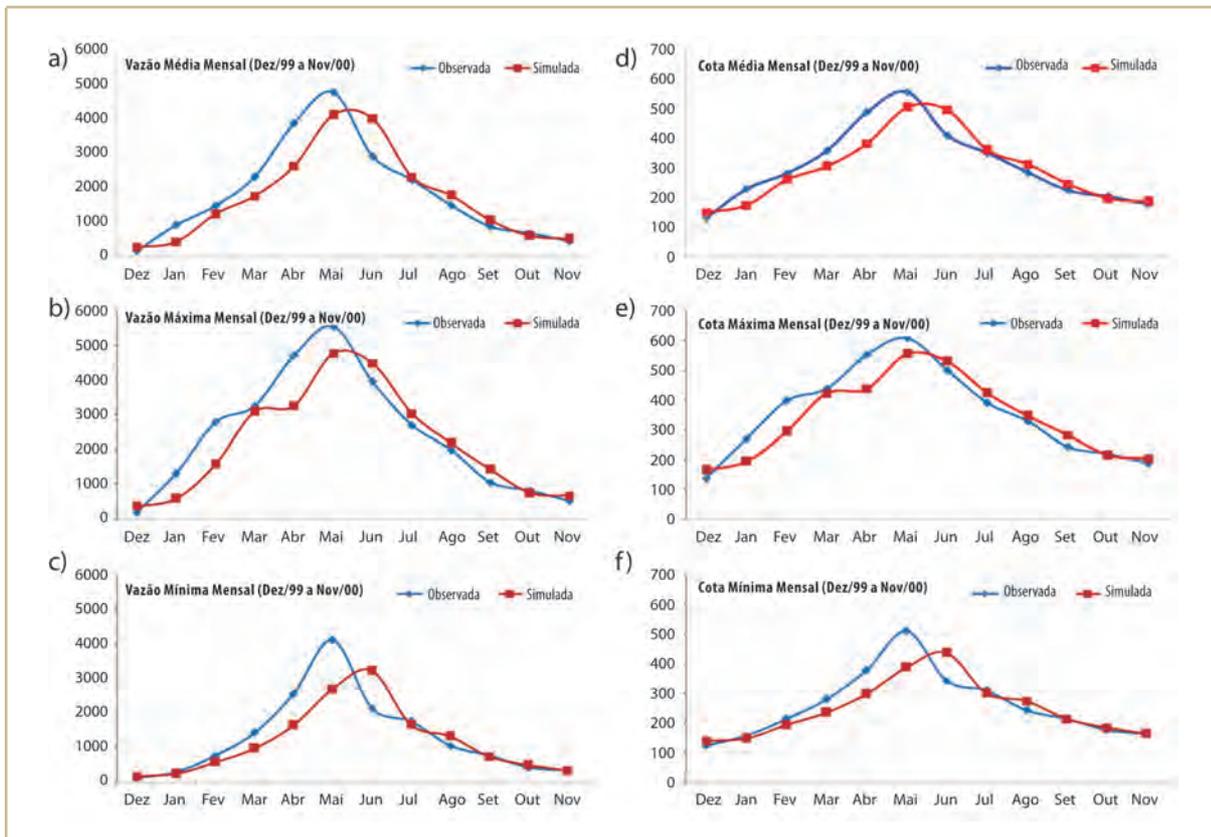
**Figura 5.** Comparação entre a climatologia e o evento extremo selecionada; vazão média mensal ( $m^3.s^{-1}$ ) na estação de São Francisco no Estado do Amapá.

### 3.2. Modelo ARIMA

Foi aplicado o modelo estocástico ARIMA para simular as vazões e cotas médias, máximas e mínimas. O intuito foi aplicar a ferramenta estatística e elaborar uma simulação de eventos hidrológicos extremos. Na modelagem estocástica ARIMA aplicada na estação em estudo foram executados os seguintes passos: análise visual da série, análise das funções ACF e PACF e análise dos resíduos, nos quais foram identificadas as ordens dos termos (p, d, q) (P, D, Q), para as componentes simples e sazonais, respectivamente, do modelo.

Na aplicação em estudo não foram necessárias mais do que duas diferenças nos termos AR e MA para a parte simples do modelo e apenas uma diferença para a parte sazonal. Assim, optou-se pelas ordens dos termos (2, 2, 2) (1, 1, 1). Nesse sentido, a modelagem atende ao princípio da parcimônia na aplicação do modelo estocástico ARIMA. Os resultados das simulações realizadas são apresentados abaixo.

Na Figura 6 é mostrada a comparação entre as cotas e vazões observadas e simuladas pelo modelo ARIMA concernentes ao período extremo de chuva entre dezembro de 1999 e novembro de 2000. Neste período, a bacia do rio Jari apresentou valores de vazões e cotas acima do normal. Nota-se que com relação às simulações das vazões médias, máximas e mínimas (Figura 6 a, b, c), o modelo subestimou os valores das vazões médias e máximas. Porém, apresentou uma boa sensibilidade em relação aos valores durante os meses de dezembro a maio. Estes meses foram considerados como chuvosos na região (junho a novembro). Nesta época houve redução da chuva e foi observado que o modelo superestimou os dados observados, principalmente nos dois primeiros meses da época seca.



**Figura 6.** Vazões e cotas mensais simuladas e observadas em São Francisco no ano chuvoso de 2000.

Na simulação da vazão mínima, notou-se o mesmo padrão entre o observado e o simulado. Ou seja, nos meses chuvosos o modelo superestimou os valores e nos meses secos os subestimou. Entretanto, o pico de mínima, que em 2000 ocorreu antecipadamente, não foi representado com satisfação pelo modelo. De qualquer modo, as simulações das vazões mínimas durante o período seco foram mais bem representadas na simulação do que as vazões médias e máximas.

Também nas Figuras 6d, 6e e 6f foram apresentados os resultados simulados das cotas (médias, máximas e mínimas) comparadas com os valores observados. Do mesmo modo que as vazões simuladas, observaram-se valores de cotas subestimados na época chuvosa. Para valores médios e máximos, o modelo mostrou-se sensível à alteração ao aumento e diminuição das cotas mensais e apresentou valores superiores ao observado durante o período de transição, entre o período seco e chuvoso e no período seco propriamente dito.

De forma geral o modelo apresentou melhor sensibilidade nos período seco. Para a estação chuvosa, o modelo apresentou sensibilidade à sazonalidade, apesar de registrar valores subestimados principalmente no pico máximo e sensibilidade defasada nas vazões e cotas mínimas.

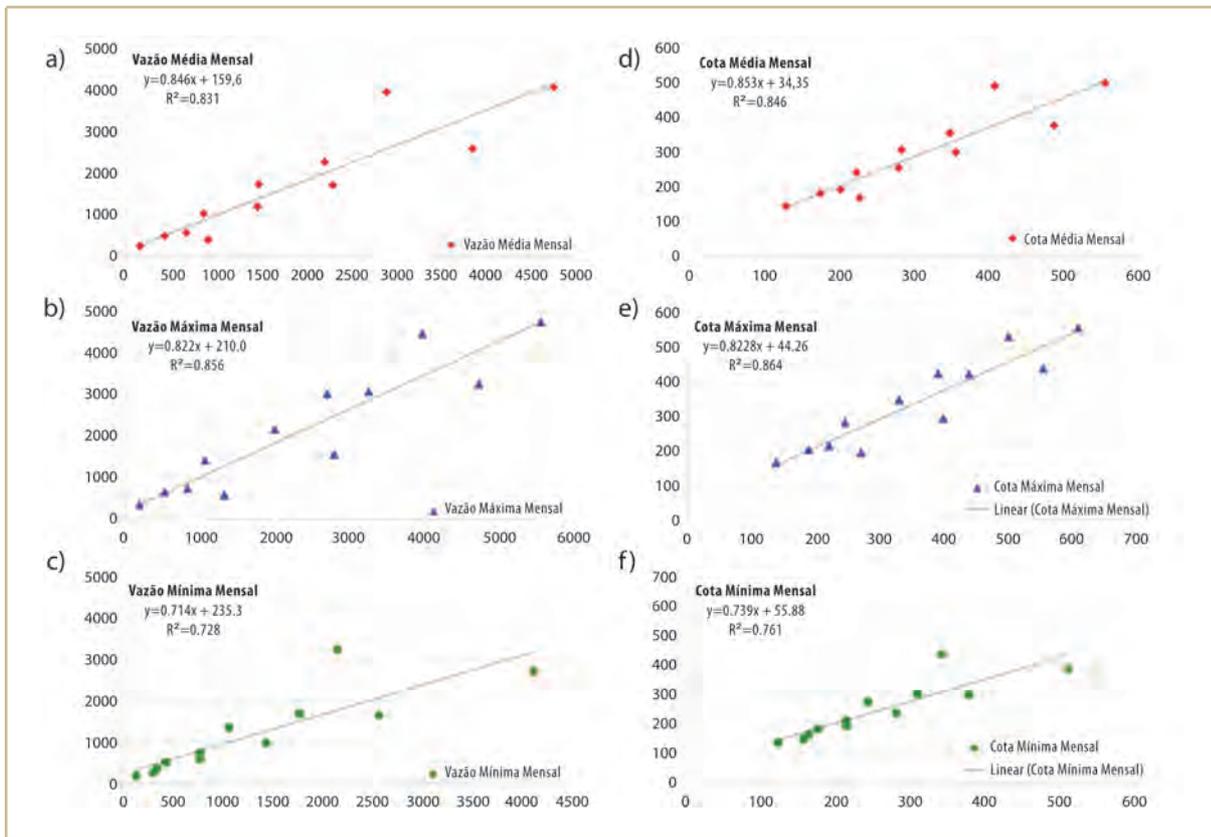
### 3.3. Teste de desempenho

Na Tabela 2 são apresentados os valores de  $R^2$  e  $\nabla V$  na avaliação de desempenho do modelo para a simulação das vazões e cotas mensais (média, máxima e mínima) do evento de cheia do ano 2000. Para o evento de cheia estudado, analisando as simulações como um todo, o modelo ARIMA simulou de forma satisfatória os volumes das vazões e cotas médias e máximas, apresentando os melhores resultados nos valores de  $R^2$  e  $\nabla V$ , conforme Tabela 2.

**Tabela 2.** Valores de  $R^2$  e  $\nabla V$  na simulação das vazões e cotas pelo modelo ARIMA no evento de cheia em 2000.

Estações / Modelos	Vazões		Cotas	
	$R^2$	$\nabla V$	$R^2$	$\nabla V$
Média	0,832	-0,066	0.846	-0.034
Mínima	0,729	0,106	0.762	-0.045
Máxima	0,856	-0,090	0.864	-0.047

A Figura 7 apresenta o diagrama de dispersão e reta de regressão linear entre os dados observados e simulados das vazões e cotas (média, máximas e mínimas respectivamente) para o evento de cheia analisado. Na comparação das vazões observadas e simuladas (Figuras 7a, 7b, 7c), os coeficientes de determinação em todos os casos apresentaram valores maiores que 0.7, destacando os resultados encontrados na simulação das vazões máximas, com o valor do coeficiente de determinação igual a 0,85. Nota-se, na comparação das cotas observadas e simuladas (Figura 7d, 7e, 7f), que os coeficientes de determinação em todos os casos também apresentaram valores maiores que 0.7. Destaque é dado aos resultados encontrados na simulação das cotas máximas com o valor do coeficiente de determinação igual a 0,86.



**Figura 7.** Diagrama de dispersão e reta de regressão linear das vazões e cotas mensais simuladas e observadas em São Francisco no período de cheia do ano de 2000.

De um modo geral, o modelo estocástico ARIMA aplicado simulou de forma eficiente as vazões e cotas mensais médias e máximas na estação de São Francisco. A aplicação do modelo apresentou excelentes resultados na simulação durante os meses de mínimos volumes escoados (outubro, novembro e dezembro) quando comparados às simulações nos meses de máximos volumes escoados (abril, maio e junho). Os resultados encontrados na simulação das vazões nos meses de abril, maio e junho pelo modelo ARIMA podem estar associados a incertezas nas medições. Mas, no geral, isso ocorreu provavelmente devido à forte aleatoriedade das vazões de picos, geralmente vinculados a eventos extremos de precipitação. Essa é uma característica peculiar dos modelos estocásticos, os quais devem ser aplicados com cautela no período chuvoso, visto que a maior parte dos eventos extremos de precipitação e consequentemente vazões de pico ocorrem nesse período.

#### 4. CONCLUSÕES

Avaliando a variabilidade da precipitação na região do rio Jari com base na série histórica dos últimos 30 anos, foi possível observar que esta localidade apresenta um forte sinal de variações pluviométricas

interanuais durante o período chuvoso. O estudo de caso para o ano de 2000, o qual apresentou anomalias positivas de chuva ao longo de cinco dos seis meses no período chuvoso, impactou o regime hidrológico e representou o evento de cheia como de ordem significativa. Conseqüentemente, este ano foi caracterizado como o de maior registro dos danos causados pelas enchentes em termos econômicos e sociais em Laranjal do Jari.

O modelo ARIMA aplicado na bacia hidrográfica do rio Jari, no Estado do Amapá, conseguiu capturar a dinâmica da série temporal na simulação das vazões e cotas mensais, mostrando-se bastante eficiente na simulação de eventos hidrológicos extremos. Destaque foi dado às simulações das vazões e das cotas máximas. Esta ferramenta estocástica pode, portanto, ser usada como instrumento na prevenção de acontecimentos hidrológicos extremos de bacias hidrográficas, possibilitando a providência e elaboração de alertas contra enchentes e secas. Trata-se, portanto, de uma técnica de análise simples e de fácil aplicação que pode ser utilizada nas atividades de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos na região em estudo, servindo como opção para estudos específicos e na tomada de decisão das autoridades competentes do setor de defesa civil.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao projeto REMETAP (FINEP/CNPq), REMAM II (FINEP/CNPq) e SUDAM/NHMET-IEPA.

## 6. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Inventário das estações fluviométricas e pluviométricas*. Disponível em: <[www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)>. Acessado em janeiro 2009.

BOX, G.E.P.; COX, D.R. An analysis transformation. *Journal of the Royal Statistics Society, Séries B*, v. 26, 1964. p. 211-252.

BOX, G.E.P.; JENKINS, G.M. *Time series analysis: forecasting and control*. Revised edition, Holden-Day, p.575. Inc. USA, 1976.

CUNHA, A. C. *Rede de Gestão Integrada de Monitoramento da Dinâmica Hidroclimática e Ambiental do Estado do Amapá*. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento submetido e aprovado pela SUDAM. NHMET/IEPA. 12 p, dez, 2008.

GALVÍNCIO, J.D.; SOUZA, F.A.S. Uso de modelos autorregressivo e médias móveis para geração de vazões médias mensais na bacia hidrográfica do alto São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XII, 2002, Foz de Iguaçu/PR: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002.

LOPES, M.N.G. *Aspectos regionais da variabilidade de precipitação no Estado do Pará: estudo observacional e modelagem climática em alta resolução*. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará (UFPA), Museu Paraense Emílio Goeldi e EMBRAPA, Belém, 2009. 117p.

LUCAS, Edmundo Wallace Monteiro. *Aplicação de modelos hidrológico determinístico e estocástico mensais na bacia hidrográfica do Xingu – Pará*. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

MARQUES, A. D. e CUNHA, A. C. *Valoração de danos socioeconômicos causados por inundação no Município de Laranjal do Jari – AP no ano de 2000*. XV Congresso Brasileiro de Meteorologia. Anais em CD ROM, São Paulo, SP, 2008.

NASH, J.E.; SUTCLIFF, J. River flow forecasting through conceptual models, *Journal of Hydrology*, v. 10, p. 282-290, 1970.

SOUZA, E. B., T. AMBRIZZI. Pentad precipitation climatology over Brazil and the associated atmospheric mechanisms. *Climanálise*, v. 1, 2003.

SOUZA, E.B.; KAYANO, M.T.; TOTA, J.; PEZZI, L.; FISCH, G.; NOBRE, C. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. *Acta Amazônica*, v. 30, n. 2, 2000. p. 305-318.

SOUZA; E. B. *et al.*, Precipitação sazonal sobre a Amazônia Oriental no período chuvoso: observações e simulações regionais com o REGCM3. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.24, n.2, 111-124, 2009.

SOUZA; E.B.; KAYANO, M.T.; AMBRIZZI, T. The regional precipitation over the eastern Amazon/northeast Brazil modulated by tropical pacific and Atlantic SST anomalies on weekly timescale. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 19(2): 113-122, 2004.

XAVIER, T.M.B.S. Caracterização de Períodos secos ou excessivamente chuvosos no Estado do Ceará através da Técnica dos Quantis: 1964-1998. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v.14, n.2, 1999. p.63-78.

XIONG, L., GUO, S., A two-parameter monthly water balance model and its application. *Journal of Hydrology*, 216, 1999. p.111-123.

## Análise de Cenário da Qualidade da Água no Rio Araguari (AP) com Uso do Sistema de Modelagem QUAL2Kw: Impactos de Hidrelétricas e Urbanização

**Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha**

alancunha@unifap.br

Ex-coordenador do NHMET/IEPA, coordenador do Projeto REMETAP,  
Prof. do curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e PPGBio/PPGDAPP-UNIFAP.

**Msc. Daímio Chaves Brito, daimiobrito@gmail.com**

Licenciado em Química. Doutorando em Biodiversidade Tropical.PPGBio/UNIFAP.

**Dr.ª Helenilza Ferreira Albuquerque Cunha**

helenilzacunha@unifap.br

Prof.ª Curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e PPGBio/PPGDAPP-UNIFAP.

**Resumo.** O objetivo da pesquisa é elaborar cenários de previsão das condições da qualidade da água no rio Araguari (AP) segundo situações relevantes de impactos ambientais na bacia hidrográfica. No gerenciamento de recursos hídricos, os modelos de previsão quantitativos são fundamentais porque possibilitam uma análise mais sistêmica de efeitos causados pelas perturbações antropogênicas sobre os corpos d'água em um dado trecho desta bacia hidrográfica. Além disso, são instrumentos imprescindíveis na análise de prognósticos e cenários muito úteis nas tomadas de decisões, definição de estratégias de gerenciamento e identificação do nível em que seja possível mitigar impactos negativos causados por ação antropogênica para uma determinada situação. A metodologia empregada consistiu em duas estratégias de análise: coleta de informações obtidas do monitoramento da qualidade da água em um trecho de 160 km de extensão no alto e médio rio Araguari, considerando aspectos de uso e ocupação da terra (barragem, urbanização e mineração). Nesta etapa da pesquisa foram analisadas amostras de água em campo e em laboratório a partir de 23 seções de investigação no referido trecho. Na segunda etapa foi realizada uma série de procedimentos computacionais de modelagem e simulação da qualidade de água com o uso do sistema QUAL2Kw. Os resultados mais expressivos indicaram boa aderência entre os dados experimentais e simulados, mormente representados no processo de calibração do modelo, principalmente em relação ao OD, CDBO, e pH. Os parâmetros hidráulicos obtidos de dados de séries históricas hidrológicas na bacia também foram essenciais no cálculo dos coeficientes de descarga e determinação das taxas de reaeração de trechos representativos do escoamento, observando uma das características mais efetivas dos processos de autodepuração do rio Araguari – a oxigenação natural. A análise numérica permitiu a calibração e validação do modelo com dados experimentais, de modo que este pode ser utilizado como uma ferramenta útil de representação das condições médias de escoamento e dos processos biogeoquímicos no trecho estudado. Além disso, a etapa de modelagem e simulação com o sistema Qual2kw permitiu uma melhor descrição holística do funcionamento do sistema hídrico como preditor de impactos ambientais associados às mudanças de uso e ocupação da bacia, em especial a inserção de barragens hidrelétricas na bacia hidrográfica.

**Palavras-chave:** monitoramento, modelagem, QUAL2Kw, calibração, validação, rio Araguari, Amapá.

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade da aplicação de modelos em estudos, projetos, auxílio à gestão e planejamento de recursos hídricos é inquestionável. A principal razão é o enfrentamento da complexidade do ambiente em correntes naturais, como os rios e reservatórios presentes nas bacias hidrográficas. Além disso, os modelos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente é possível uma visão holística dos processos nos complexos sistemas ambientais (ROSMAN, 2005).

Na presente pesquisa, a prova desta afirmação é o uso de grande quantidade de informações sobre o sistema hídrico, as quais abrangem desde a sazonalidade climática e comportamento hidráulico-fluvial do canal principal, à obtenção e utilização parâmetros empíricos de curvas-chaves e estimativa de coeficientes numéricos para as entradas de dados em sistemas computacionais, tais como os coeficientes de reaeração atmosférica dos trechos representativos do canal, análise da cinética química das reações (taxa de decomposição, sedimentação, hidrólise etc.), além dos necessários balanços de energia térmica, massa, cálculo e estimativas de cargas de poluentes (CUNHA, 2004).

Modelos validados, isto é, aferidos com dados de campo e analisados por especialistas, além de serem difíceis de torná-los praticáveis, são indispensáveis à melhoria da confiabilidade no sistema de planejamento e gestão ambiental na bacia hidrográfica. Bons exemplos são as análises de diagnósticos e prognósticos, interpolação e extrapolação de dados, essenciais para representar a dinâmica de processos naturais complexos nos ambientes aquáticos (ROSMAN, 2005).

Apesar do uso de modelos não ser tarefa das mais simples, eles são ferramentas indispensáveis para quaisquer tipos de previsão. Sua força está na capacidade de integrar informações dispersas e interpolar informações locais para outras regiões com características semelhantes nas quais não há medições. Todas estas qualidades tornam os sistemas de modelagem atrativos. Com essas qualidades é possível auxiliar interpretações realizadas para estações pontuais, propiciar o entendimento de processos e prever situações e cenários úteis para a gestão de recursos hídricos.

Contudo, para obter previsões confiáveis são necessários sistemas de modelagens flexíveis e ajustáveis às características do corpo hídrico em estudo. Então, para saber se um sistema de modelagem apresenta condições de representar a dinâmica dos constituintes que caracterizam um rio, é necessário que ele descreva satisfatoriamente o seu estado atual, principalmente fundamentado em dados experimentais. Para isso, um cuidadoso sistema de monitoramento da qualidade da água deve ser implementado para obter dados realísticos que satisfaçam as necessidades do sistema de modelagem (BÁRBARA, 2006; BRITO, 2008).

Alguns erros oriundos dos processos de modelação são inevitáveis. Isso porque os sistemas de modelagem englobam processos complexos que ocorrem nos corpos d'água, não perdendo a capacidade de representá-los de modo simplificado e prático (GASTALDINI, 1982). Dessa forma, os sistemas de modelagem devem ser considerados simplificações da natureza. Nesse sentido, seu uso tem crescido

bastante nos últimos anos e vem se consolidando como uma ferramenta estratégica no gerenciamento dos recursos hídricos (DROLC e KONKAN, 1996).

O sistema de modelagem amplamente utilizado para avaliar impactos de poluentes convencionais é o QUAL2E (BROWN e BARNWELL, 1987; DROLC e KONKAN, 1996). Contudo, conforme será discutido a seguir, várias inovações foram introduzidas de forma que fossem implementadas até a versão utilizada neste trabalho, chamada QUAL2Kw.

O rio Araguari apresenta um grande volume de água, com altas vazões (média de 965 m<sup>3</sup>/s). Portanto, sua real situação poderia ser mais bem representada utilizando sistemas de modelagens mais complexos e sofisticados, tal como assevera KANNEL *et al.*, (2007). Porém, estes sistemas requerem grandes quantidades de dados (COX, 2003), o que pode inviabilizar pesquisas com pequeno orçamento. Os resultados aqui apresentados foram ajustados à situação próxima da real. Apesar da complexidade do sistema real, o QUAL2Kw é capaz de representar satisfatoriamente o sistema físico do rio Araguari e esta hipótese será verificada a seguir.

## 2. MATERIAS E MÉTODOS

### 2.1. Área de Estudo

O Estado do Amapá, localizado no extremo norte do Brasil, tem uma rede hídrica bastante expressiva. Integralmente inserida nos seus limites geográficos encontra-se a bacia hidrográfica do rio Araguari (Figura 1). Suas cabeceiras encontram-se na Serra Lombada e Serra do Tumucumaque, recebendo como afluentes os rios Mutum, Tajauí, Falsino e Tracajatuba. Próximo da cidade de Porto Grande ocorre a confluência com o rio Amapari. No trecho de jusante deste ponto, alguns quilômetros abaixo, inicia-se seu trajeto pela planície costeira do Amapá até o Oceano Atlântico (CUNHA, 2004). O rio é uma fonte importante de água para os mais variados usos por uma população estimada de 32 mil habitantes e de notória biodiversidade aquática e terrestre.

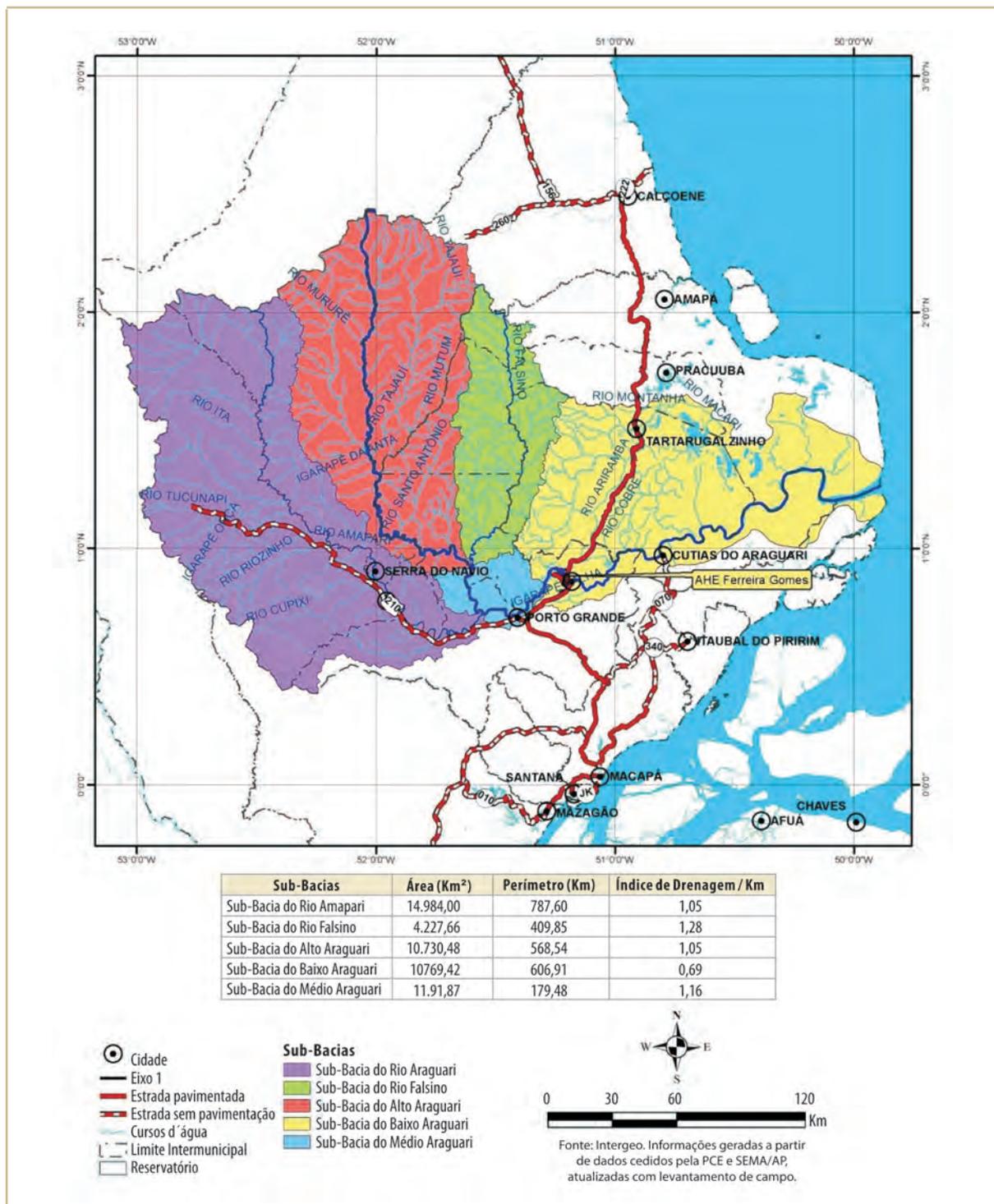


Figura 1. Bacia do rio Araguari. Fonte: Ecotumucumaque (2009).

O rio Araguari apresenta uma extensa rede hídrica, configurando-se no principal e maior rio do Estado do Amapá, com aproximadamente 600 km de comprimento e índice de drenagem da ordem de 0,955/km.

Os municípios contidos na área territorial da bacia hidrográfica são: Amapá, Tartarugalzinho, Serra do Navio, Ferreira Gomes, Porto Grande, Amapari, Cutias e parte norte do município de Macapá.

O trecho escolhido para estudo estende-se por aproximadamente 160 km no canal principal do rio Araguari e abrange várias áreas de influências geográficas. As principais influências antrópicas são causadas pelos processos de urbanização desorganizados das cidades de pequeno e médio porte e a Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes (UHECN), cuja barragem gera aproximadamente 76 MW de potência. Além disso, alguns projetos de mineração têm sido instalados na bacia, em especial os de extração de ferro, ouro e manganês.

## **2.2. O sistema de modelagem QUAL2Kw**

Após o surgimento do modelo clássico de DBO-OD de Streeter e Phelps, que remontam ao início do século passado, estudos mais avançados foram desenvolvidos a partir do ano de 1970 por F. D. Masch e Associados e o Texas Water Development Board. Os processos de nitrificação foram incorporados a esse modelo que, por sua vez, passou a ser chamado de QUALI. Posteriormente, em 1973, a empresa Water Resources Engineering, contratada pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, fez algumas modificações e ampliações no QUALI, adicionando os ciclos do fósforo, das algas e do nitrogênio em sua formulação, sendo esse novo programa denominado QUALII. O modelo continuou sendo aperfeiçoado numericamente e foi introduzida uma estrutura computacional para a maior parte dos poluentes convencionais, sendo denominado de Sistema de Modelagem da Qualidade da Água QUAL2E. Em seguida, os códigos computacionais foram modificados para superar algumas limitações do modelo e adicionadas novas interações entre os constituintes. Essa nova versão foi denominada QUAL2K (PARK e LEE, 2002). O que se percebe, portanto, é que esse modelo, distribuído gratuitamente pela Internet, vem sendo desenvolvido e melhorado por inúmeros pesquisadores há mais de 35 anos (CUNHA, 2004; BRANDÃO, 2003; BRITO, 2008).

Atualmente, a versão mais moderna deste sistema de modelagem, o QUAL2Kw, é mantido e atualizado pelo Department of Ecology State of Washington, nos Estados Unidos. A Figura 2 indica as fases de evolução e aumento da complexidade dos modelos conceituais contidos nas estruturas dos sistemas computacionais vigentes.

O QUAL2Kw é um sistema de modelagem do tipo Total Maximum Daily Load (TMDL's) que pode ser traduzido como Carga Máxima Total Diária. O sistema calcula a quantidade máxima de um poluente que um corpo d'água pode receber, cumprindo com os padrões de qualidade da água. Modelos computacionais desse tipo são extensivamente usados para a gestão da qualidade da água e TMDL's, com a intenção de prever, em uma massa de água, as variações na sua qualidade em resposta às alterações da carga poluente. Dessa forma, pode atribuir diferentes estratégias de gerenciamento ao corpo hídrico (DESW, 2008). Pelletier e Chapra (2006) publicaram a teoria e a documentação do modelo

QUAL2Kw, no qual foram abordados todos os parâmetros, balanços, características, coeficientes e equações do modelo.

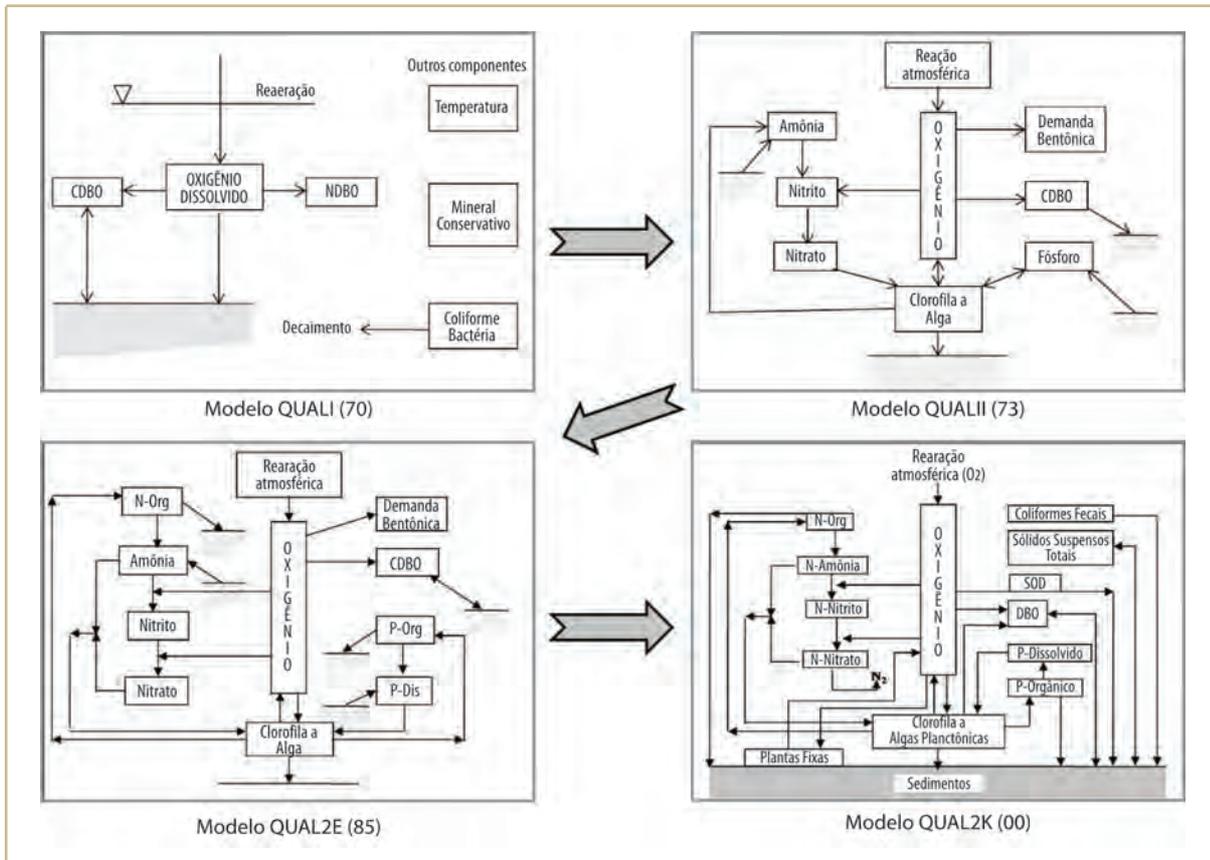


Figura 2. Evolução dos modelos da qualidade da água. Fonte: PARK e LEE (2002).

Uma breve descrição do modelo, adaptada dos autores acima, foi aplicada para o melhor entendimento do presente trabalho.

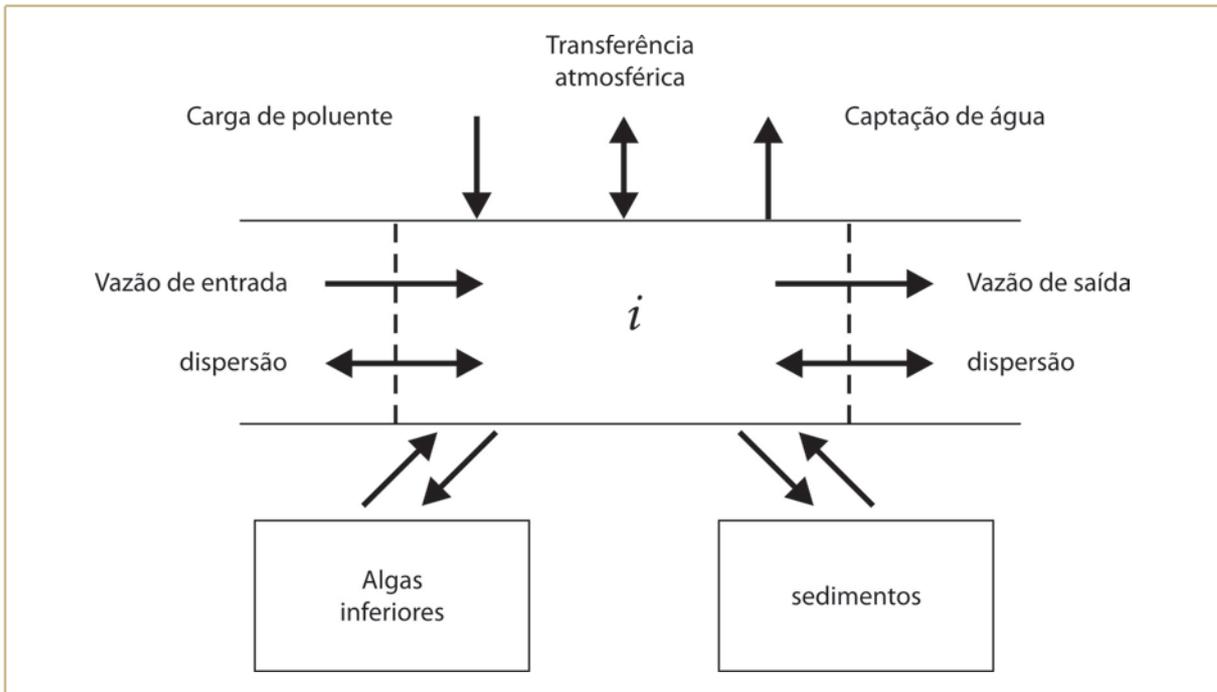
O modelo Qual2Kw é aplicado na simulação da qualidade de água em rios. Baseia-se em equações diferenciais ordinárias para sistemas unidimensionais e de fluxo constante, podendo ser utilizado para simular o comportamento de diversos indicadores e parâmetros de qualidade da água. O sistema de modelagem utiliza a Equação 1 para calcular o balanço de massa geral da concentração de um constituinte  $c_i$  ( $\text{mgL}^{-1}$ ) em cada trecho do rio. O diagrama da Figura 3 representa esquematicamente o balanço de massa no modelo.

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} c_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i} (c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i \quad (1)$$

onde

$Q_i$  = vazão no trecho  $i$  ( $\text{m}^3\text{d}^{-1}$ )

- $Q_{out,i}$  = vazão da retirada por fontes pontuais ou difusas no trecho ( $m^3d^{-1}$ )  
 $V_i$  = volume do trecho  $i$  ( $m^3$ )  
 $E_i$  = coeficiente de dispersão volumétrica entre dois trechos ( $m^2s^{-1}$ )  
 $W_i$  = carga externa do constituinte no elemento  $i$  ( $gd^{-1}$  ou  $mgd^{-1}$ )  
 $S_i$  = fontes e sumidouros do constituinte devido às reações e aos mecanismos de transferência de massa ( $gm^{-3}d^{-1}$  ou  $mgL^{-1}d^{-1}$ ).



**Figura 3.** Balanço de massa no trecho  $i$ .

O *software* dispõe de um algoritmo genético para executar a calibração das taxas cinéticas dos parâmetros, otimizando seus valores pela comparação com os dados previstos ( $P_{ij}$ ) e observados ( $O_{ij}$ ) (Equação 2). Esta otimização é determinada automaticamente pela raiz quadrada da média dos erros quadrados (RMSE) da diferença entre os dados esperados e observados dos parâmetros da qualidade da água. Este procedimento resulta em um melhor ajuste para a aplicação do modelo comparado com os dados observados (CHARBONNEAU e KNAPP, 1995; PELLETIER, CHAPRA e TAO, 2006).

$$f(x) = \left[ \sum_{i=1}^n w_i \right] \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{w_i} \left[ \frac{(\sum_{j=1}^m O_j / m)}{[\sum (P_j - O_j)^2 / m]^{1/2}} \right] \right] \quad (2)$$

onde

$O_{ij}$  = valor observado

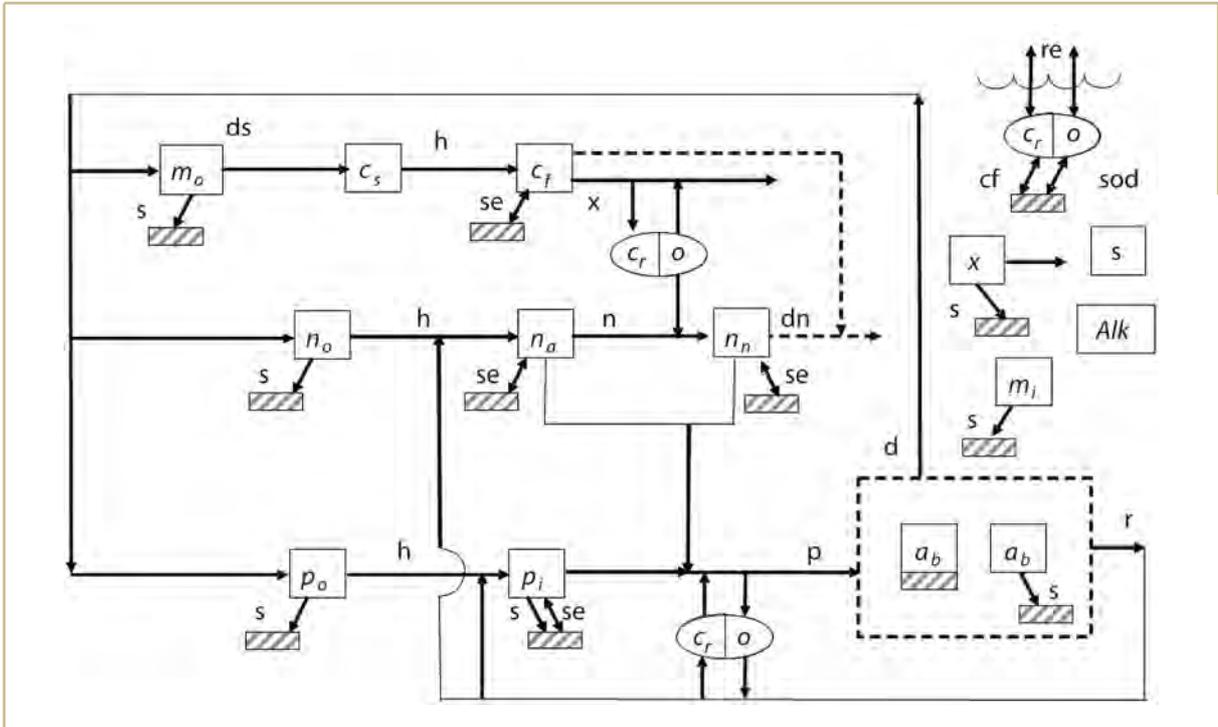
- $P_{ij}$  = valor previsto  
 $m$  = número de pares de valores previstos e observados  
 $W_i$  = fatores de ponderação  
 $n$  = número de diferentes variáveis de estado incluídas na reciprocidade ponderada normalizada RMSE

### 2.3. O modelo conceitual

O diagrama esquemático das interações das variáveis de estado indica o ganho e a perda de cada variável pelos processos químicos, físicos e biológicos,

onde

- $ds$  = dissolução ( $d^{-1}$ )  
 $h$  = hidrólise ( $d^{-1}$ )  
 $x$  = oxidação ( $d^{-1}$ )  
 $n$  = nitrificação ( $d^{-1}$ )  
 $dn$  = denitrificação ( $d^{-1}$ )  
 $p$  = fotossíntese ( $d^{-1}$ )  
 $d$  = morte ( $d^{-1}$ )  
 $r$  = respiração/excreção ( $d^{-1}$ )  
 $re$  = reaeração ( $d^{-1}$ )  
 $s$  = sedimentação ( $md^{-1}$ )  
 $SOD$  = demanda sedimentar de oxigênio ( $md^{-1}$ )  
 $a_b$  = algas inferiores ( $gDm^{-2}$ )  
 $a_p$  = fitoplâncton ( $\mu gAL^{-1}$ )  
 $m_o$  = detrito ( $mgDL^{-1}$ )  
 $c_s$  = CDBO lenta ( $mgL^{-1}$ )  
 $c_f$  = CDBO rápida ( $mgL^{-1}$ )  
 $c_T$  = carbono inorgânico total ( $moleL^{-1}$ )  
 $o$  = oxigênio ( $mgL^{-1}$ )  
 $n_o$  = nitrogênio orgânico ( $\mu gNL^{-1}$ )  
 $n_a$  = nitrogênio amônia ( $\mu gNL^{-1}$ )  
 $n_n$  = nitrogênio nitrato ( $\mu gNL^{-1}$ )  
 $p_o$  = fósforo orgânico ( $\mu gPL^{-1}$ )  
 $p_i$  = fósforo inorgânico ( $\mu gPL^{-1}$ ) (Figura 4)



**Figura 4.** Diagrama esquemático das interações entre as variáveis de estado da qualidade da água, dos coeficientes cinéticos e processos de transferência de massa (PELLETIER *et al.*, 2006).

Ressalta-se que não é necessário utilizar todos os parâmetros para a simulação. Todavia, dependendo do que se deseja simular, alguns parâmetros são fundamentais. Como exemplo, o oxigênio dissolvido (OD) é considerado pela maioria dos autores como o principal indicador da qualidade da água. O diagrama deixa claro que o fluxo do OD no sistema, dependendo das características do rio, pode ser consumido ou produzido no ambiente. Sua produção ocorre pela reaeração e fotossíntese dos fitoplânctons e algas inferiores. Sua perda no ambiente se dá pela oxidação, nitrificação e respiração do ecossistema aquático. Então, qualquer interferência pode prejudicar o equilíbrio existente no sistema, sabendo que a poluição causada por efluentes provoca a oxidação e nitrificação da matéria orgânica (DBO).

## 2.4. Dados de entrada do Sistema de Modelagem

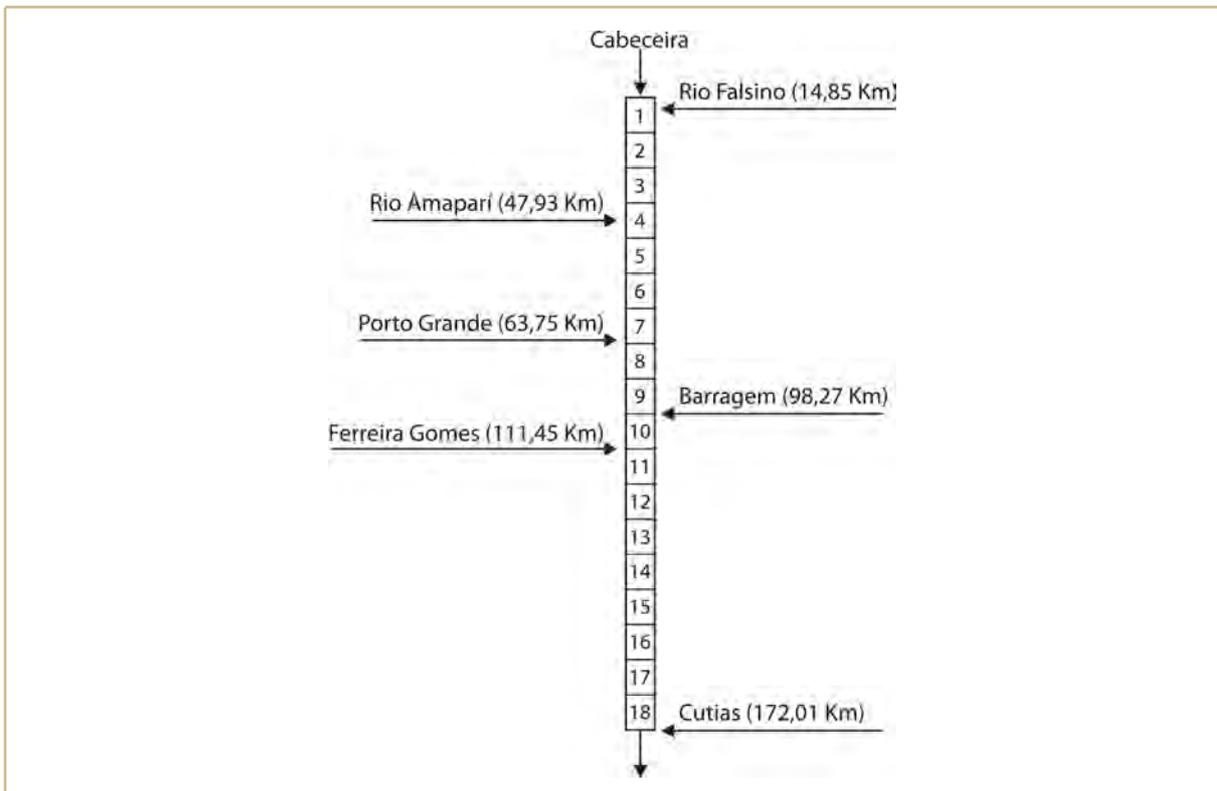
Os parâmetros hidráulicos do canal principal e dos seus afluentes foram obtidos a partir das séries históricas de dados hidrometeorológicos de Plataformas Automáticas de Coletas de Dados Fluiiométricos (PCD's) (ANA, 2008). Valores de vazão, velocidade e profundidade médias das seções estudadas permitiram a geração dos coeficientes de descarga líquida  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  (Tabela 1), a partir de uma análise de regressão não-linear no software estatístico Origin 5.0.

**Tabela 1.** Coeficientes de descarga, vazão média anual e vazão no período de estiagem nos trechos e tributários do rio Araguari.

Trecho/ Tributário	Distância (km)	Vazão média (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Velocidade		Profundidade	
			Coefficiente (a)	Expoente (b)	Coefficiente (c)	Expoente (d)
1	159,16	290,892	0,01967	0,59248	0,68884	0,28296
Falsino	157,16	123,351	0,03676	0,52809	0,36961	0,40147
2	150,04	667,333	0,02619	0,5044	0,28135	0,44634
3	140,22	500,934	0,02263	0,52332	0,38834	0,36708
4	125,86	692,393	0,11429	0,2919	0,12919	0,54486
Amapari	124,08	579,041	0,05971	0,40577	0,49154	0,34625
5	120,70	1271,434	0,03713	0,44119	0,1593	0,45795
6	110,37	1269,386	0,00589	0,66494	0,97158	0,25956
7	101,73	974,878	0,00499	0,69164	1,25179	0,24134
8	93,27	974,878	0,00499	0,69164	1,25179	0,24134
9	82,23	1329,251	0,00041	0,91342	6,01295	0,01424
10	73,74	1329,251	0,00073	0,88434	8,37905	0,02735
11	60,56	1320,897	0,00073	0,88434	8,37905	0,02735
12	57,94	1320,897	0,00073	0,88434	8,37905	0,02735
13	49,10	1320,897	0,00073	0,88434	8,37905	0,02735
14	39,23	1320,897	0,00029	0,98203	6,29442	0,04155
15	33,24	1467,475	0,00029	0,98203	6,29442	0,04155
16	26,54	1467,475	0,00029	0,98203	6,29442	0,04155
17	16,78	1467,475	0,00038	0,90615	10,60633	0,04436
18	7,68	1692,879	0,00038	0,90615	10,60633	0,04436

Fonte: HIDROWEB-ANA, 2008; Cunha, 2004.

Na Tabela 1 também estão representados os valores da vazão e o sistema de trechos utilizados na modelagem para a simulação (Figura 5). Foram discretizados 18 trechos com características hidráulicas semelhantes (pedregoso, argiloso, arenoso, curvilíneo, retilíneo, declividades semelhantes etc.).



**Figura 5.** Diagrama unifilar do trecho em estudo no rio Araguari.

A Figura 5 representa os trechos discretizados no modelo e as principais influências no curso do rio. Estão representados dois dos seus principais afluentes e três cidades ribeirinhas, além da barragem da UHECN. Estes 18 trechos representam 160 km de extensão do rio com características de fluxo constante, isto é, sem influencia de maré e dois períodos sazonais bem distintos, a cheia (chuvoso) e a estiagem (verão).

#### 2.4.1. Calibração do Sistema de Modelagem

Esta etapa do trabalho pode ser realizada em qualquer modelagem com a finalidade de ajustar os resultados calculados pelos sistemas de modelagens com aqueles obtidos em campo. Há três técnicas que podem ser utilizadas no processo de calibração de um sistema de modelagem (CHAPRA, 2003), descritas a seguir.

A **calibração manual**: análise de sensibilidade *a priori*; e um ajuste manual dos parâmetros mais relevantes, determinados na análise de sensibilidade. Chapra (1997, 2003) cita que existem inúmeras outras técnicas disponíveis, entre elas a análise do erro de primeira ordem, simulação de Monte Carlo e análise de sensibilidade generalizada. Para a realização destes ajustes manuais é necessária uma grande disponibilidade de tempo por parte do modelador.

Medição **direta das taxas**: consiste em medir diretamente no campo ou em laboratório os parâmetros do modelo, obtendo assim uma melhor precisão e acurácia nos valores utilizados. Em parte, isso foi feito pelos estudos para determinar parâmetros cinéticos, de reaeração e hidráulicos do presente trabalho.

**Autocalibração**: serve para ajudar o modelador, guiando-o e economizando tempo no processo de calibração manual. Essa autocalibração pode ser realizada pela utilização de algoritmos genéticos (CHAPRA, 1997; CHARBONNEAU e KNAPP, 1995; PELLETIER, CHAPRA e TAO, 2006; BRITO, 2008).

No presente estudo foi utilizado o processo de autocalibração para o ajuste das taxas cinéticas do modelo com o uso do algoritmo genético PIKAIA, internamente utilizado pelo sistema de modelagem Qual2Kw.

Para a calibração dos parâmetros hidráulicos foi usada a vazão média anual (Tabela 1), sendo que para cada aumento de vazão durante o curso do rio o acréscimo foi considerado como fonte difusa (Tabela 2). A velocidade, a profundidade, a largura e a seção transversal do rio foram calculadas a partir da relação entre a vazão média e os coeficientes de descarga no sistema de modelagem.

A média dos valores dos parâmetros da qualidade da água obtida nas cinco coletas de campo no período de um ano foi usada para a calibração do sistema de modelagem (Tabela 2). A solução utilizada na integração do sistema de modelagem foi o método Euler e para a interpolação do pH foi utilizado o método Newton-Raphson.

**Tabela 2.** Fontes difusas utilizadas na calibração do sistema de modelagem QUAL2Kw.

Início (km)	Término (km)	Vazão de entrada (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Temp (°C)	Cond (µScm <sup>-1</sup> )	OD (mgL <sup>-1</sup> )	CDBO (mgL <sup>-1</sup> )	Amônia (ugL <sup>-1</sup> )	Nitrato (ugL <sup>-1</sup> )	Fósforo Total (ugL <sup>-1</sup> )	SST (mgL <sup>-1</sup> )	pH
150,04	140,22	86,691	27,0	27,33	7,07	1,53	320,0	380,0	46,0	6,8	6,3
140,22	125,86	191,459	26,5	26,43	7,03	1,53	322,0	240,0	38,6	6,6	6,2
120,70	82,23	57,820	27,0	27,08	6,90	1,40	319,8	305,0	57,4	5,6	6,4
82,23	33,24	138,230	26,9	26,67	7,40	1,20	273,0	276,7	48,8	4,8	6,7
33,24	0,00	225,400	27,6	26,48	7,18	1,40	285,6	308,0	53,8	5,6	6,8

Para a autocalibração, o sistema de modelagem atribui pesos para vários parâmetros. Nesse caso, foram utilizados os pesos padrões do próprio sistema de modelagem. Por exemplo, para OD o peso foi igual a 50 e para pH o peso foi igual a 100. Esses resultados surgiram de processos de análise de sensibilidade utilizadas na literatura (PELLETIER e CHAPRA, 2006). Também para a autocalibração, o sistema de modelagem necessita da definição de alguns controles no algoritmo genético, tais como o

número da população (NP) e o número de gerações (NGEN). Foram escolhidos os valores padrões para estes controles: uma população de 100 NP com 50 gerações na evolução (PELLETIER e CHAPRA, 2006).

Para a execução, os dados da calibração automática foram introduzidos em planilhas do Excel, utilizando como interface do sistema de modelagem os dados de discretização do rio, os parâmetros de entrada do sistema de modelagem e os dados ajustados para a calibração. A principal entrada é a média dos dados da qualidade da água obtidos do próprio monitoramento. Na sequência, foi pressionado o botão “Run Auto-cal” na planilha “Rates”. Os ajustes das taxas pela autocalibração foram executados em aproximadamente quatro horas em um PC Pentium comum.

#### 2.4.2. Simulação da qualidade da água

A simulação realizada com o sistema de modelagem QUAL2Kw foi proposta tendo como base atuais e potenciais interferências antrópicas na bacia do rio Araguari. O cenário simulado avalia o crescimento populacional dos municípios de Porto Grande e Ferreira Gomes junto com a implantação dos dois empreendimentos hidrelétricos previstos no curso do rio Araguari, sendo esses denominados de Aproveitamentos Hidrelétricos (AHEs) Cachoeira Caldeirão, à montante da UHECN, e Ferreira Gomes I, à jusante da UHECN.

Nesse cenário foi adotada a vazão média entre as estações de cheia e seca. Além disso, foi considerado que os efluentes domésticos, gerados com o crescimento populacional, seriam descartados no rio Araguari sem nenhum tipo de tratamento. A vazão total de esgoto gerado pelos municípios foi calculada com base na taxa de crescimento populacional de 1,7% ao ano (NETO, 1997 *apud* BÁRBARA, 2006), visando um horizonte de vinte anos. Na Tabela 3 é indicado o crescimento populacional e na Tabela 4 estão descritos os dados dos efluentes lançados no rio. Os valores das concentrações dos constituintes dos efluentes foram baseados em Fernandes (1997) e Jordão e Pessôa (1995) *apud* Bárbara (2006).

**Tabela 3.** Aumento populacional estimado nas duas principais cidades ribeirinhas (20).

Município	Tipo do efluente	População atual*	População futura	Vazão total (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
Porto Grande	Urbano	14.675,00	20.559,00	0,054
Ferreira Gomes	Urbano	4.321,00	6.100,00	0,016
TOTAL:				0,07 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>

\* No ano de 2005 (IBGE, 2006).

**Tabela 4.** Dados de qualidade do efluente utilizados na simulação.

Fonte geradora de Efluentes	OD (mgL <sup>-1</sup> )	DBO (mgL <sup>-1</sup> )	Temperatura (°C)	Nitrogênio Orgânico (mgL <sup>-1</sup> )	Amônia (mgL <sup>-1</sup> )	Nitrito (mgL <sup>-1</sup> )	Nitrato (mgL <sup>-1</sup> )
Porto Grande	0,00	434,00	25,00	50,00	65,00	0,25	0,55
Ferreira Gomes	0,00	434,00	25,00	50,00	65,00	0,25	0,55

Foram inseridos os dois novos empreendimentos hidrelétricos na simulação, que foi baseada em um inventário da ANEEL/Eletronorte que indica os locais com potencial hidroelétrico na bacia do rio Araguari e outras bacias do Estado do Amapá, realizado pela empresa Hydros Engenharia contratada pela Eletronorte S/A. Esse inventário pode ser encontrado no relatório do PROVAM (1990).

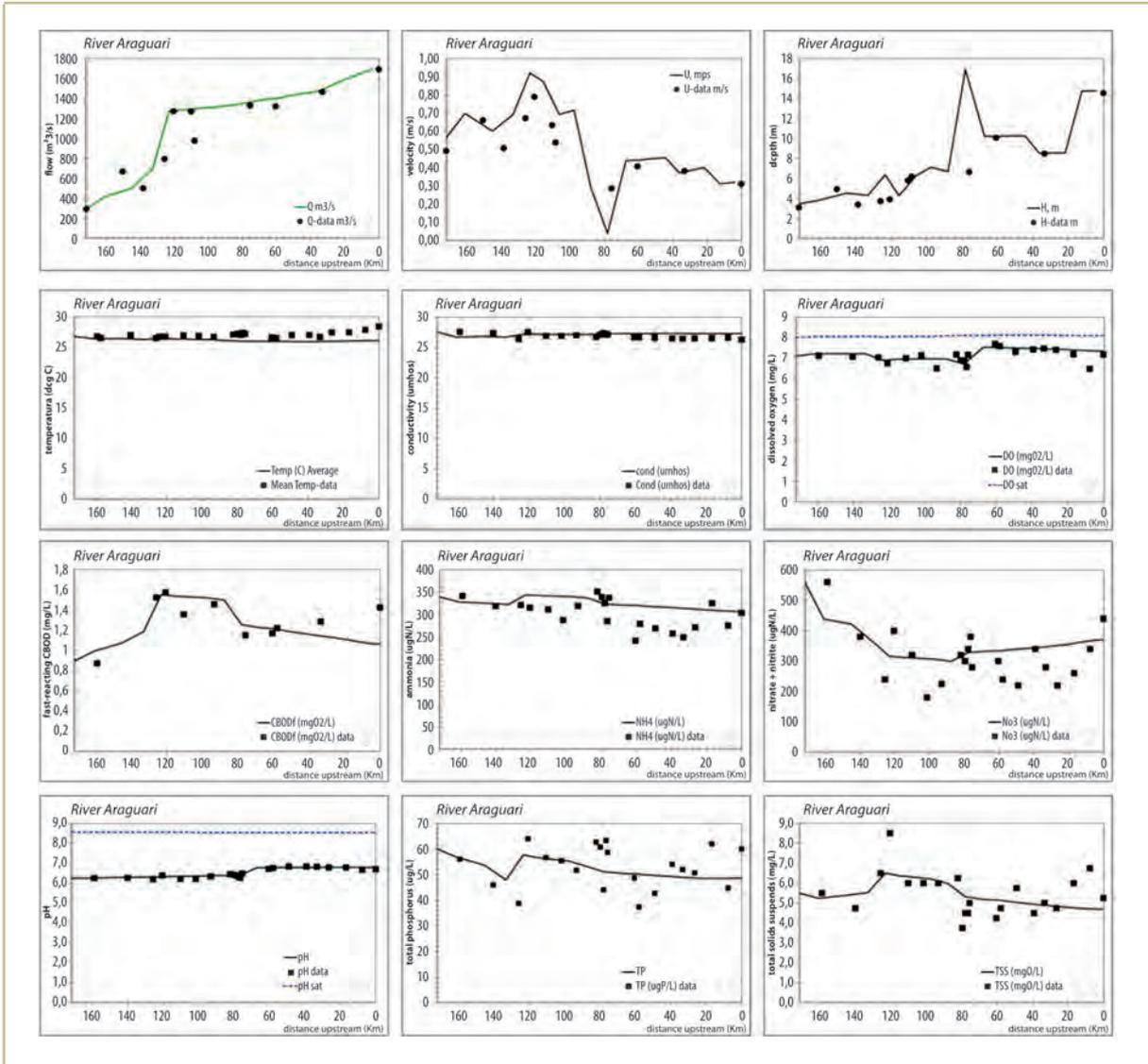
Foram identificadas no inventário quatro seções com potencial energético, sendo que um deles era chamado de Coaracy Nunes II, atual vertedouro da UHECN, localizado no trecho de número nove do modelo. Os demais se localizam nos trechos 2, 8 e 10, chamados de Bambu, Cachoeira Caldeirão e Ferreira Gomes I, respectivamente. O processo para a implantação das duas últimas barragens já foi iniciado para Estudos de Impactos Ambientais (ECOTUMUCUMAQUE, 2009). Na simulação, por simplificação, os dois referidos aproveitamentos simulados mantiveram as mesmas características construtivas e as mesmas dimensões físicas observada na UHECN (largura e altura da barragem e em especial a altura da queda d'água), as quais foram também utilizadas na calibração do sistema de modelagem.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Calibração do Sistema de Modelagem QUAL2Kw

Os gráficos de calibração para vazão, velocidade, profundidade, OD, pH, CDBO, temperatura, condutividade, fósforo total, sólidos suspensos totais, amônia e nitrato estão indicados na Figura 6. A partir do gráfico de calibração, percebemos que os resultados do sistema de modelagem estão de acordo com os dados obtidos em campo. Principalmente para parâmetros considerados mais importantes, tais como oxigênio dissolvido, CDBO, temperatura e pH, que estão bem ajustados. A qualidade do processo de calibração é um indicativo de que as grandezas físicas, químicas e biológicas tendem a estar bem representadas pelo sistema de modelagem.

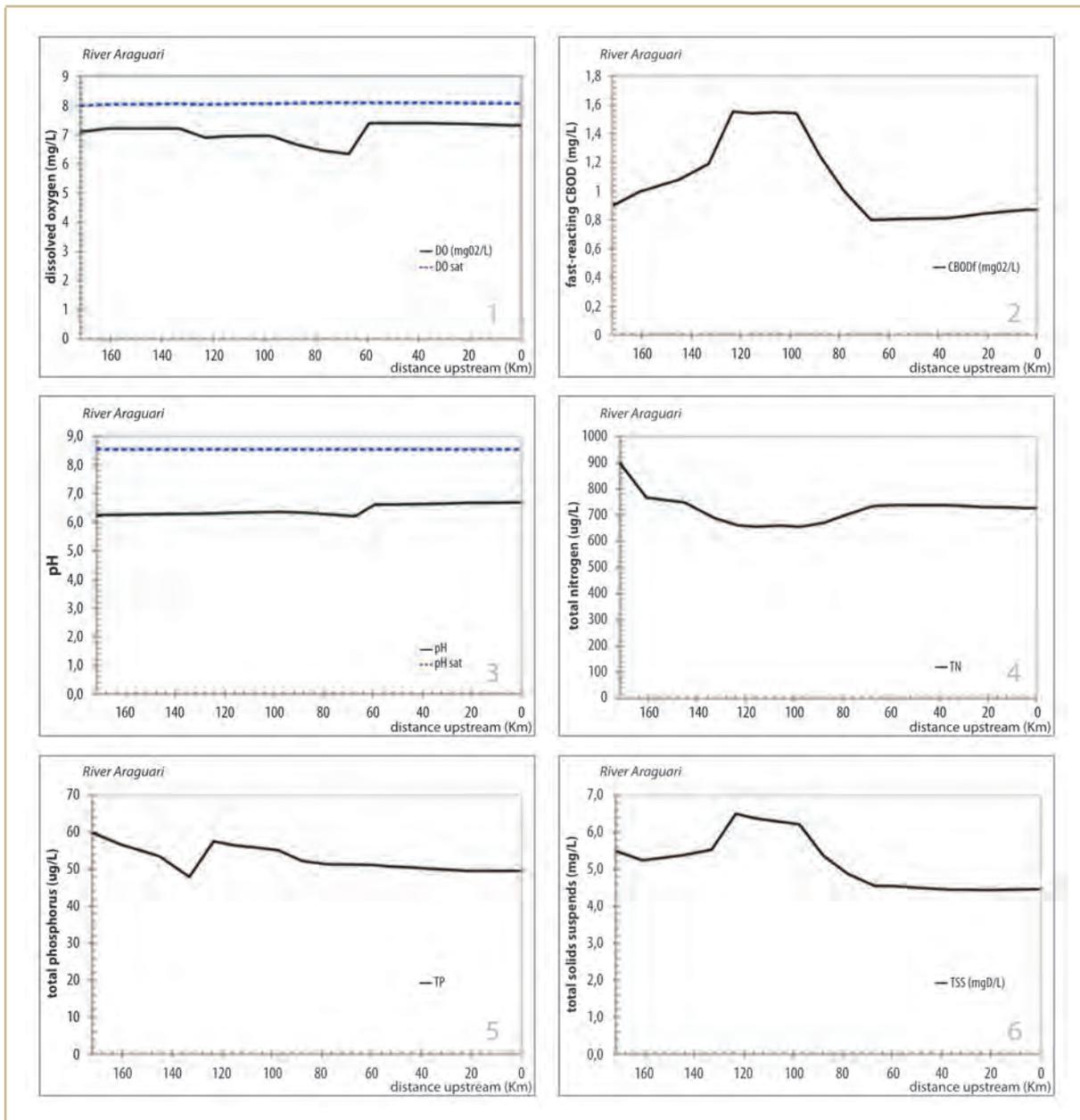
É importante observar que o rio Amapari se encontra próximo do km 120 (aumento brusco da vazão). Também nota-se que as principais variações (perturbações) de outros parâmetros da qualidade da água ocorrem próximas do km 120 e 60, onde se encontram o início do reservatório da UHECN e a presença das cidades de Porto Grande e Ferreira Gomes (Figura 6). O parâmetro profundidade é máximo no km 75 próximo da barragem (reservatório).



**Figura 6.** Processo de calibração do sistema de modelagem QUAL2Kw. A linha pontilhada no gráfico de OD indica o ponto de saturação do oxigênio dissolvido (OD) na água. No eixo horizontal é representada a distância do trecho (km).

### 3.2. Aplicação do Sistema de Modelagem na Qualidade da Água

A simulação realizada a seguir consistiu em introduzir no sistema de modelagem, após a calibração, condições de despejo de poluentes e regulações de escoamento da água que ainda não existem no curso do rio (enquadramento e classificação de corpos d'água naturais). O objetivo foi obter respostas sobre o comportamento do corpo hídrico após perturbações simuladas e compará-las com o seu estado atual (experimental). Neste caso, foi possível avaliar os graus de respostas em relação aos processos degradativos impostos ao rio (Figura 7).



**Figura 7.** Simulação no sistema de modelagem QUAL2Kw para o cenário proposto. No eixo horizontal é representada a distância do trecho (km) entre a primeira seção de análise (Flona – AP) até a última, cidade de Cutias.

Os parâmetros simulados responderam satisfatoriamente aos impactos propostos (dois novos aproveitamentos hidrelétricos e processo de urbanização para os próximos 20 anos). Apesar da pequena depleção no nível de OD, esta não foi suficiente para infringir os valores mínimos previstos na legislação vigente. A lei estipula como limite mínimo o valor de 5 mg/L de OD na água para rios de classe dois. É nesta faixa que se enquadra a qualidade da água dos rios amazônicos (CONAMA, 2005).

Os demais parâmetros simulados também não infringiram os limites máximos estipulados pela resolução 357/05 do CONAMA. Essas respostas indicam que o rio Araguari apresenta uma ótima capacidade de resiliência (autodepuração) mesmo com a construção de duas novas barragens, uma à montante e outra à jusante da UHECN, e com a expansão urbana na taxa de 1,7% ao ano (Porto Grande e Ferreira Gomes) além de atividades mineradoras.

#### 4. CONCLUSÕES

A qualidade da água dos rios sofre dois tipos de interferência: a **natural**, que ocorre de forma lenta e gradual, dando tempo aos ecossistemas se adequarem às suas novas situações de equilíbrio, sem afetar bruscamente as interpelações entre os condicionantes bióticos e abióticos; e a **antrópica**, muito mais devastadora e que ocorre bruscamente num determinado ponto. Esta última normalmente é refletida imediatamente nos ecossistemas que dependem do corpo d'água e causa degradação perceptível. A interferência antrópica abrange áreas consideráveis do sistema, tornando sua recuperação mais demorada e dependendo da sua magnitude pode provocar impactos negativos, muitas vezes irreversíveis.

Preocupado com as interferências ambientais causadas por barragem, este trabalho apresentou respostas interessantes do modelo, indicando que, a partir do estado atual da qualidade da água do rio Araguari, os potenciais impactos ambientais no seu curso podem ser capturados e analisados em sua essência. Este tipo de análise considera uma série de fatores perturbadores da qualidade da água, de forma que as respostas são de extrema utilidade para satisfazer as necessidades do gerenciamento e aos usos múltiplos das águas segundo as leis e políticas nacionais e estaduais de gerenciamento de recursos hídricos.

As comparações entre os dados obtidos em campo, devido ao monitoramento sistemático, e aqueles das análises das simulações computacionais executadas pelo QUAL2Kw, são essenciais para se pensar em como o sistema hídrico funciona no contexto da bacia hidrográfica. Neste caso, o sistema de modelagem escolhido representou com habilidade e flexibilidade os principais aspectos físicos, químicos e hidráulicos experimentais observados.

Desta forma, o Qual2Kw apresenta-se como uma proposta de suporte ao gerenciamento eficiente e como ferramenta de estudo, integração e análise de informações sobre a bacia. Esta afirmação foi percebida durante a calibração do modelo, em que o sistema de modelagem se ajustou muito bem aos parâmetros e variáveis da qualidade da água, considerados mais importantes (OD, CDBO, pH e temperatura).

As respostas do sistema de modelagem ao cenário simulado resultaram em uma relação positiva da qualidade da água *versus* impacto no meio ambiente. Neste caso, a simulação acusou um elevado nível de recuperação do rio Araguari, mesmo em situações críticas da qualidade da água, mais provavelmente

em decorrência de seu imenso volume e vazão, quando relativamente comparado às cargas atuais e simuladas que “pouco” exigiram de sua capacidade autodepurativa, mesmo quando as condições simuladas foram severas (com dois novos aproveitamentos).

Portanto, uma das conclusões mais importantes do trabalho é que foi notável sua recuperação após o impacto recebido, por exemplo, pela barragem no trecho entre 80 – 50 km. Por um lado, isso demonstra que o corpo hídrico é capaz de degradar matéria orgânica em condições de impacto severa de poluentes ou em condições bastante adversas de degradação. Do ponto de vista dos serviços ambientais é bom que o rio se comporte desta forma.

De posse do sistema computacional calibrado, outros cenários podem ser analisados por intermédio do sistema de modelagem QUAL2Kw, conforme a necessidade de respostas para questões ambientais específicas. Estes cenários são gerados para facilitar e apoiar ações concretas de políticas públicas de gestão de bacias hidrográficas. A aplicação da modelagem e elaboração de um sistema de monitoramento no rio Araguari indica sua alta capacidade de diluir consideráveis quantidades de cargas poluidoras.

Mas fica o alerta à comunidade científica e aos gestores públicos de que situações adversas ao corpo hídrico não podem perdurar para sempre, sob pena de não conseguirmos reverter uma futura situação crítica que extrapole a real capacidade do corpo hídrico se autodepurar. Os empreendimentos que estão se instalando ou irão se instalar ao longo desse rio são ambientalmente impactantes. Cabe a nós informarmos à sociedade sobre as vantagens e os riscos relacionados a tais empreendimentos, mesmo que estes sejam perfeitamente justificáveis do ponto de vista econômico.

É preciso que, a cada passo, tenhamos que desenvolver conhecimentos para enfrentar os novos desafios, em especial aqueles que se interpõem aos nossos interesses mais elementares: o desenvolvimento econômico a qualquer custo. E isso deve ser evitado, sempre que possível.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do projeto REMETAP (FINEP-CNPq/IEPA-GEA-AP), Projeto UNIVERSAL (CNPq/IEPA-GEA-AP – **Processo 47905/2006-9**), ao Laboratório de Engenharia Ambiental/UNB, NHMET/IEPA, Projeto REMAM I e a todos que contribuem de alguma forma, desde os trabalhos de campo até as difíceis incursões laboratoriais para realizar as análises.

## 6. REFERÊNCIAS

BÁRBARA, V. F. (2006). Uso do Modelo QUAL2E no Estudo da Qualidade da Água e da Capacidade de Autodepuração do Rio Araguari (AP) (Amazônia). *Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)* (p. 174p). Goiania, GO: Universidade Federal de Goiás.

- BRANDÃO, M. E. (2003). Modelo Dinâmico de Qualidade e Escoamento de Água como Mecanismo para Implementação de Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos. Tese (Doutorado) , 216. Brasília, DF: Universidade Federal de Brasília.
- BRITO, D.C. (2008). *Aplicação do Sistema de modelagem da qualidade da água QUAU2KW em grandes rios: o caso do Alto e Médio rio Araguari-AP.* (Dissertação de Mestrado - Programa PPGBio). Unifap. 151 p.
- BROWN, L. C., & BARNWELL, T. O. (1987). *The Enchanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E - UNCAS: documentation and user manual.* Athens, Georgia.
- CHAPRA, S. C. (jul/ago de 2003). Engineering water quality models and TDMLs. *Journal of Water Resource Planning and Management* , pp. 247-256.
- CHAPRA, S. C. (1997). *Surface water-quality modeling.* New York: McGraw-Hill.
- CHARBONNEAU, P., & KNAPP, B. A. (1995). *User's guide to PIKAIA 1.0, NCAR Technical Note 418+IA.* Boulder. Acesso em 16 de janeiro de 2007, disponível em National Center for Atmospheric Research: <http://www.hao.ucar.edu/public/research/si/pikaia/pikaia.html>
- CONAMA. (18 de março de 2005). Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE , Sec. 1 , n. 53, 58 p.
- COX, B. A. (2003). A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. *Sci. Total Environ* , pp. 314-316, 335-377.
- CUNHA, A. C. (2004). Determinação do Coeficiente de Reaeração no Modelo QUAL2E Utilizando as Características Hidráulicas de Canais Abertos para Estudos de Impactos Ambientais no Rio Araguari (AP). *Projeto de Pesquisa CPAQ/IEPA e SETEC/CNPQ* , 20 p. Macapá, AP: Programa Primeiros Projetos.
- DESW. (2007). *Department of Ecology State of Washington Environmental Assessment.* Acesso em 28 de setembro de 2007, disponível em Washington State Department of Ecology: <http://www.ecy.wa.gov/programs/eap/models.html>
- DROLC, A., & KONKAN, J. Z. (1996). Water quality modeling of the river Sava, Slovenia. *Water Resource* , vol. 11 (n. 30), pp. 2587-2592.
- ECOTUMUCUMAQUE (2009). *Estudos de Impactos Ambientais (EIA/RIMA) dos AHEs Cachoeira Caldeirão e Ferreira Gomes I* (In Press). Banco de Mapas Digital.
- GASTALDINI, M. C. (1982). Análise do Mecanismo de Autodepuração do Rio Jacaré-Guaçu Através de Modelo de Qualidade de Água. *Dissertação (Mestrado)* . São Carlos, São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- KENNEL, P. R., LEE, S., LEE, Y. S., KANNEL, S. R., & PELLETIER, G. J. (2007). Application of Automated QUAL2Kw for Water Quality Modeling and Management in the Bagmati River – Nepal. *Ecological Modelling* , v. 202 (n. 3-4), pp. 503-517.

- PARK, S. S., & LEE, Y. S. (2002). Water Quality Modeling Study of the Nakdong River, Korea. *Ecological Modelling* , v. 152, pp. 65-75.
- PELLETIER, G. J., CHAPRA, C. S., & TAO, H. (2006). QUAL2Kw, A Framework for Modeling Water Quality in Streams and Rivers Using a Genetic Algorithm for Calibration. *Environmental Modelling & Software* 21 , pp. 419-425.
- PELLETIER, G., & CHAPRA, S. (2006). QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1) - A modeling framework for simulating river and stream water quality. *Department of Ecology* , 72.
- PELLETIER, G., & CHAPRA, S. (2006). QUAL2Kw user manual (version 5.1) - A Modelling Framework for Simulating River and Stream Water Quality. *Department of Ecology* , 46.
- PROVAM. (1990). *Programa de Estudos e Pesquisas nos Vales Amazônicos*. Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia. Belém, PA: SUDAM/OEA.
- ROSMAN, P. C. (2005). *Referência Técnica do SISBAHIA*. Rio de Janeiro-RJ: Pontifícia Universidade Católica.

## Modelagem e Simulação da Hidrodinâmica Superficial e Dispersão de Poluentes no Rio Araguari (AP) Aplicados a Estudos Ambientais de Aproveitamento Hidrelétrico (AHE)

Grad. Lic. Física Luis Aramis dos Reis Pinheiro

aramisrp@gmail.com

Ex-bolsista IC SETEC/CNPq, Ex-bolsista DTI – REMETAP/CNPq. Atual bolsista DTI do Projeto Sudam no NHMET/IEPA.

Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha

alancunha@unifap.br

Ex-coordenador do NHMET/IEPA, Coordenador do Projeto REMETAP, Prof. do Curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e PPGBio/PPGDAPP-UNIFAP.

**Resumo.** A construção de Aproveitamentos Hidrelétricos (AHEs) em rios é uma forma que o homem encontrou para suprir a necessidade de geração eficiente de energia elétrica e atender a demandas de produção econômica da sociedade moderna. Ao mesmo passo que os rios são utilizados para gerar energia a partir de fontes hidráulicas, estes também são sistemas ecológicos importantes nos quais muitas formas de vida aquática sobrevivem. A dinâmica do escoamento dos rios se apresenta como um fator abiótico relevante, cujo papel nos ciclos biogeoquímicos pode ser crítico na manutenção de certos componentes vivos dos ecossistemas aquáticos. Reservatórios de geração de energia elétrica são um dos sistemas que mais interfere na dinâmica de escoamento dos rios, dado que passam a funcionar como sistemas fechados e controlados em detrimento de um sistema aberto e mais dinâmico. O objetivo desta pesquisa é estudar a atual hidrodinâmica e dispersão hipotética de poluentes nestes trechos a serem impactados no rio Araguari antes do barramento. Utilizou-se o sistema computacional CFX 11.0 para a resolução numérica do escoamento e simulação computacional do escoamento turbulento. O método de fechamento do escoamento foi o modelo turbulento de segunda ordem  $k - \epsilon$ . Como resultados, foram caracterizados os perfis hidrodinâmicos do atual escoamento na região dos futuros AHEs Cachoeira Caldeirão e Ferreira Gomes I, considerando quatro modalidades de vazão: média, máxima, mínima e a “ecológica”. Os perfis do escoamento indicaram que a mudança da vazão altera a intensidade dos campos de velocidade, mantendo os padrões característicos das linhas de corrente em maior parte do domínio computacional. Ao mesmo passo, na simulação dos campos escalares de concentração de poluentes hipotéticos conservativos, a partir de uma fonte contínua localizada de forma aleatória, observou-se que a dispersão das plumas manteve coerência com os processos conservativos. Isto é, na medida em que a vazão aumenta, a pluma se dispersa com maior intensidade, ocorrendo o inverso quando a vazão diminui. Como conclusão, foi observado que o escoamento turbulento apresenta um padrão de resposta bastante realista do escoamento natural, considerando a complexidade geométrica do canal, como ilhas, contornos irregulares e variações de cotas de fundo. Contudo, as simulações apresentam um caráter ainda qualitativo devido a uma série de limitações físicas neste tipo de análise, como a batimetria de fundo sendo uma aproximação média estimada, pois os contornos foram ajustados para evitar problemas de divergência numérica, e principalmente por considerar o escoamento como de regime permanente (vazão constante para cada simulação).

**Palavras-chave:** escoamento em rio, canais abertos, turbulência, dispersão de constituintes na água, hidrodinâmica, AHEs.

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre as atividades humanas que causam impactos ao meio ambiente destacam-se os aproveitamentos energéticos das bacias hidrográficas com a construção de Aproveitamentos Hidrelétricos (AHEs). Uma das influências relacionadas com a construção de uma UHE é a mudança do perfil hidrodinâmico do rio que, por consequência, pode trazer impactos significativos às interações entre o meio biótico, abiótico e socioeconômico. Exemplos são as mudanças nos ecossistemas, dinâmica de assoreamento e sedimentação em bacias hidrográficas. Por exemplo, o solo, alterado devido ao desflorestamento causado pela formação do reservatório, se desagrega, ocorrendo o processo de sedimentação mais intenso. Em áreas de declividades acentuadas, as partículas são transportadas para locais mais planos, nos quais em presença de escoamentos mais lentos se depositam (SOBRINHO, 1996). A deposição de sedimentos nas margens e leitos é o que causa a modificação da secção transversal diminuindo a profundidade do rio, além de provocar alterações no comportamento dinâmico, distribuição e crescimento/consumo de organismos aquáticos. A modificação destes fatores em uma comunidade de fitoplânctons pode intensificar impactos como a eutrofização do reservatório e as transformações biogeoquímicas das águas superficiais e dos sedimentos (FRAGOSO JR., 2004).

Durante a formação de um reservatório demonstra-se que a dinâmica da inundação apresenta efeitos na inclinação da superfície da água, e por conseguinte, no armazenamento do reservatório. Após seu enchimento, as áreas com comportamento hidrodinâmico mais lântico são suscetíveis ao surgimento de vetores alados, como os que causam dengue e malária, entre outras doenças.

No rio Araguari a UHE de Coaracy Nunes foi estudada por Bárbara (2006) e Brito (2008), os quais indicam a necessidade de maior entendimento sobre as interações entre hidrodinâmica e os processos biogeoquímicos no reservatório daquela barragem. Esse é um tema difícil de abordar, mas muito importante no contexto de estudos limnológicos e ambientais.

Além dos processos hidrodinâmicos serem de fundamental importância, tanto em estudos de impacto ambiental quanto no monitoramento anterior e posterior à construção do empreendimento, o estudo do escoamento superficial nos canais livres pode auxiliar na geração de conhecimento sobre o transporte de agentes passivos na água, tais como partículas sedimentares, microrganismos, sementes e constituintes químicos existentes no corpo d'água.

Neste aspecto, a simulação numérica é uma importante ferramenta para o planejamento de operações de proteção aos ecossistemas aquáticos, especialmente dos impactos pelas alterações causadas pela instalação de AHEs. Cunha *et al.* (2009) e Pinheiro (2008) afirmam que com este tipo de informação em mãos tem sido possível avaliar alguns dos complexos escoamentos ambientais focados em zonas de interesse às questões socioeconômicas e ambientais locais.

Neste contexto, a Resolução n.º 357 de 17 de março de 2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento.

Além disso, estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Em seu artigo 33, assevera que: “A extensão e as concentrações de substâncias na zona de mistura deverão ser objeto de estudo, nos termos determinados pelo órgão ambiental competente, às expensas do empreendedor responsável pelo lançamento” (MACHADO, 2006).

Para tanto, no presente trabalho foi desenvolvido um estudo preliminar com uso de simulação numérica, cujo objetivo foi elaborar cenários mais próximos possíveis do atual escoamento próximos dos futuros AHEs Cachoeira Caldeirão e Ferreira Gomes I. Especificamente, objetivou-se simular a dispersão de plumas de constituintes genéricos inertes na água, semelhantes a traçadores, bem como a hidrodinâmica do escoamento superficial livre, além de identificar trechos de recirculação (lênticos e lóticos).

Para simulação da hidrodinâmica do reservatório foi utilizado o pacote computacional Ansys CFX 11.0, no qual se dispôs do modelo de escoamento turbulento  $k-\epsilon$ , em regime permanente. Quatro vazões de interesse foram estudadas: máxima, média, mínima e “ecológica”. A metodologia aplicada é semelhante às utilizadas em trabalhos de Pinheiro (2008), Cunha (2008) e Cunha *et al.* (2009). Neste aspecto, muitas simplificações físicas foram realizadas para tornar possível a representação natural e coerente do escoamento.

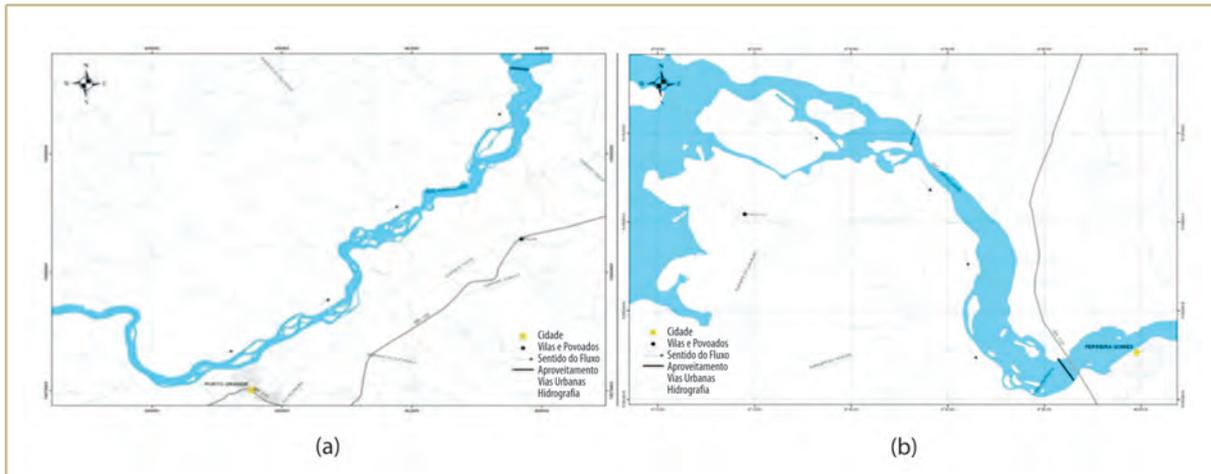
A principal hipótese da pesquisa é que a mudança (sazonal) das vazões acarreta modificações na dinâmica de dispersão de agentes passivos na água, mas não no padrão geral do escoamento, de modo que a combinação entre fatores de controle da vazão pela UHECN e a forçante de controle natural (variabilidade hidrológica) podem ser determinantes no comportamento das plumas de poluentes e no comportamento dinâmico do corpo hídrico.

## 2. MATERIAS E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

Os trechos de estudo, segundo PROVAM (1990), estão localizados no Médio Araguari, exatamente entre as localidades de Ferreira Gomes e Porto Grande. Trata-se de um trecho juvenil, com muitas corredeiras, cujo desnível total é de 54,40 m em 42 km, resultando em um declive médio de 1,297 m/km.

O trecho do reservatório do AHE Cachoeira Caldeirão está localizado nas coordenadas  $0^{\circ} 44.497'N/ 51^{\circ} 27.645'W$  (ponto mais à montante) e  $0^{\circ} 51.026'N/ 51^{\circ} 17.853'W$  (ponto mais à jusante). Esta região corresponde a um trecho com cerca de 29,89 km do rio Araguari. Seus extremos estão à montante o município de Porto Grande e à jusante a corredeira Cachoeira Caldeirão, região que possui potencial hidrelétrico (Figura 1a).



**Figura 1.** (a) Trecho do AHE Cachoeira Caldeirão e (b) do AHE Ferreira Gomes I. Observa-se que o Trecho do AHE Ferreira Gomes I está em uma escala com maior resolução. Fonte: Ecotumucumaque (2009).

O trecho do AHE Ferreira Gomes I está localizado nas coordenadas  $0^{\circ} 54.433'N / 51^{\circ} 14.277'W$  (ponto mais à montante) e  $0^{\circ} 51.284'N / 51^{\circ} 11.696'W$  (ponto mais à jusante). Corresponde cerca 7,67 km do rio Araguari. Como referência de seus extremos, localizam-se à montante a UHE de Coaracy Nunes e à jusante a ponte da BR-156 e, um pouco mais para jusante (canto direito e abaixo da Figura 1b), a cidade de Ferreira Gomes. Na Figura 1 é indicado o sentido do fluxo do rio (setas), assim como a localização da cidade de Porto Grande e Ferreira Gomes.

## 2.2. Modelo Turbulento $k-\epsilon$ <sup>1</sup>

A energia cinética turbulenta  $k$  é definida como a variância de flutuação da velocidade. No sistema internacional de medidas sua unidade é  $m^2/s^2$ .  $\epsilon$  é a dissipação de energia cinética turbulenta (a taxa na qual a energia cinética turbulenta se dissipa no escoamento) e tem dimensões de  $k$  por unidade de tempo,  $m^2/s^3$ .

A equação da continuidade no modelo  $k-\epsilon$  torna-se:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

e a do momentum:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U)^T + B \quad (2)$$

<sup>1</sup> ANSYS CFX-Solver Theory Guide (2007).

Onde:

$B$  é a soma das forças de corpos

$\mu_{eff}$  é a viscosidade efetiva da turbulência

$p'$  é a pressão modificada, definida pela Eq. 3:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_t \vec{\nabla} \cdot U \quad (3)$$

Onde

$\mu_t$  é a viscosidade de turbulência.

O modelo  $k$ - $\varepsilon$  é baseado no conceito de viscosidade de turbilhonar, então:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (4)$$

O modelo pressupõe que a viscosidade de turbulência é diretamente proporcional ao quadrado da energia cinética turbulenta e inversamente proporcional à dissipação da turbulência:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$C_\mu$  é uma constante adimensional identificada na Tabela 1.

Os valores  $k$  e  $\varepsilon$  são obtidos por intermédio da equação de transporte da energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (7)$$

onde  $C_\mu$ ,  $C_{s1}$ ,  $C_{s2}$ ,  $\sigma_k$ , e  $\sigma_\varepsilon$  são constantes (Tabela 2).  $P_k$  é a turbulência produzida devido à viscosidade e as forças flutuantes, apresentada na forma abaixo:

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3 \mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb} \quad (8)$$

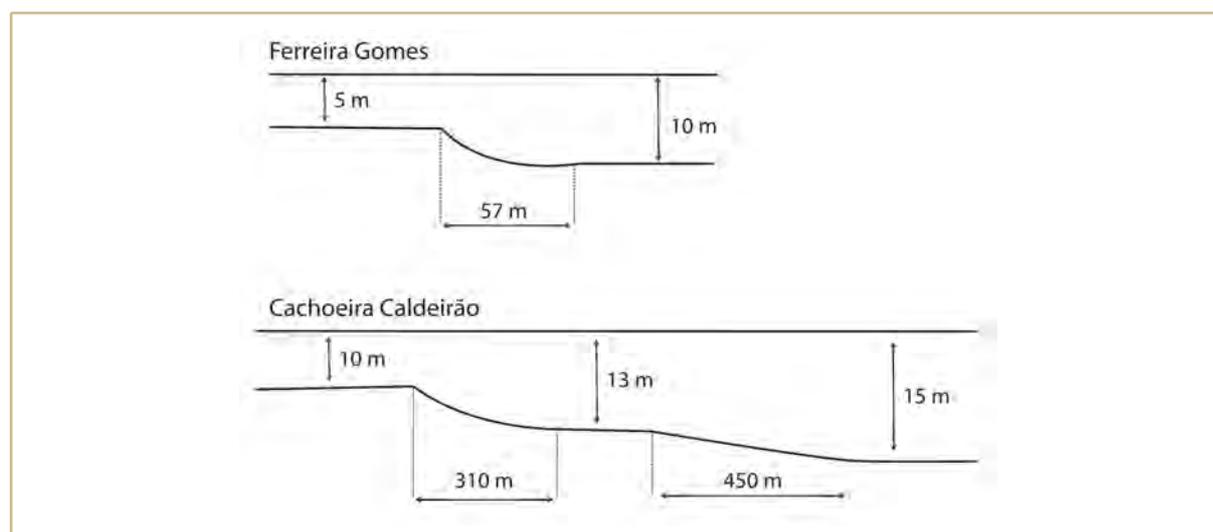
onde  $P_{kb}$  é a turbulência flutuante.

**Tabela 1.** Constantes para a equação de transporte do modelo  $k-\epsilon$ .

Constantes	Valores Adimensionais
$C_{\epsilon 1}$	1.44
$C_{\epsilon 2}$	1.92
$C_{\mu}$	0.09
$\sigma_k$	1.00
$\sigma_{\epsilon}$	1.30

### 2.3. Aproximações das características do domínio computacional dos reservatórios

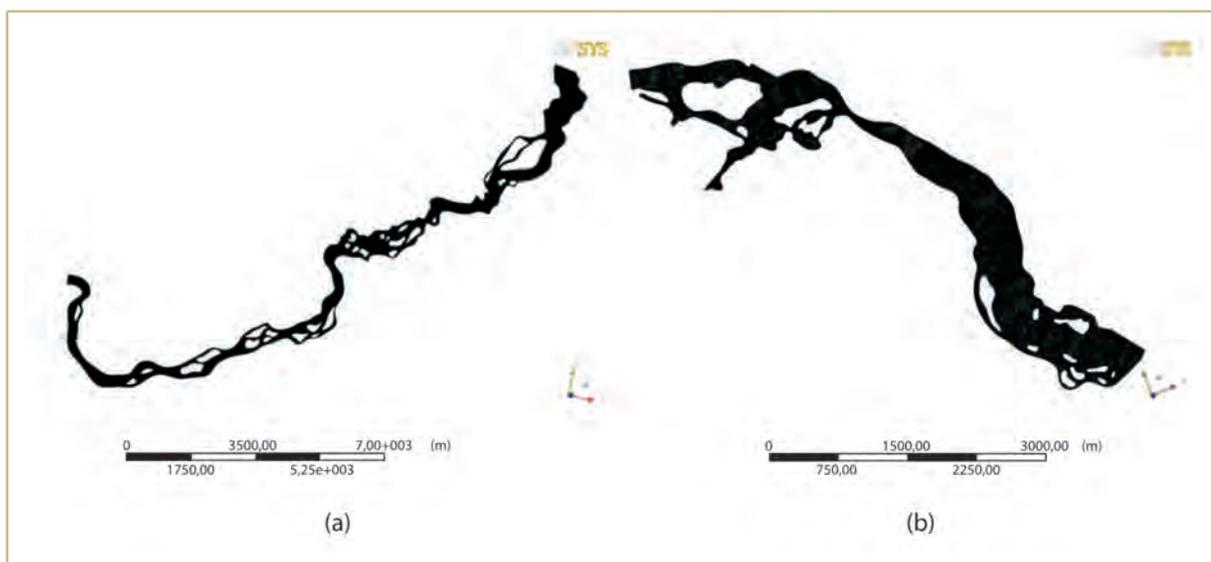
Para a representação dos trechos estudados, considerou-se um domínio em que o fundo é plano, rugoso e com breves e suaves desníveis de terreno, indicando as variações físicas aproximadas do contorno d'água. A profundidade máxima escolhida para Cachoeira Caldeirão foi de 15 m para obter uma profundidade média de 12,6 m e para Ferreira Gomes a profundidade máxima foi de 10 m, obtendo-se uma profundidade média de 7,5 m. A secção transversal do rio foi aproximada à forma trapezoidal. Por se tratar de uma modelagem do escoamento superficial livre, a escolha do fundo relativamente plano deveu-se ao fato da razão média entre a largura e a profundidade do reservatório ser elevada. Sendo essencialmente de características bidimensionais. Assim, foram elaboradas duas profundidades específicas para Ferreira Gomes e três profundidades específicas para Cachoeira Caldeirão, de forma que fosse possível inserir as condições de contorno aproximadas da modelagem hidrodinâmica, conforme indicado pela Figura 2.



**Figura 2.** Ilustração das características geométricas aproximadas do fundo do canal para cada domínio de estudo.

As declividades foram definidas em forma de arcos e suas medidas são também explicitadas na Figura 2. O trecho de Ferreira Gomes I apresenta apenas um desnível de 57 m, enquanto Cachoeira Caldeirão apresenta dois, o primeiro de 310 m e o segundo de 450 m. Esses parâmetros escolhidos são arbitrários, pois não se conhece a real batimetria do fundo do canal nos trechos estudados.

Para a simulação de cachoeira Caldeirão gerou-se uma malha 219.217 nós e 700.396 elementos tetraédricos. Devido às irregularidades nas bordas do domínio foi necessário um maior refinamento da malha computacional nestas regiões (Figura 3a). O mesmo ocorreu com o trecho do AHE de Ferreira Gomes I, onde a malha obtida apresentou-se com 230.546 elementos e 81.214 nós (Figura 2b). Ferreira Gomes I apresenta um domínio em escala menor que Cachoeira Caldeirão, onde se observa uma diferença nos números totais de elementos e nós.



**Figura 3.** Malha computacional de (a) AHE Cachoeira Caldeirão; e (b) AHE Ferreira Gomes I.

A discretização do domínio foi feita de forma não-estruturada utilizando elementos tetraédricos, devido à versatilidade com a complexa geometria do domínio e facilidade de manuseio deste tipo de malha para adaptabilidade. Segundo Fialho (2008), em elementos finitos, quanto maior a ordem do elemento (número de tetraedros e de nós), melhor será a definição da malha gerada em regiões em que ocorrem descontinuidades, como arestas de furos, cantos vivos e arredondamentos, pois um elemento de maior ordem deforma-se mais eficientemente, reproduzindo a geometria com mais exatidão, principalmente as irregulares. Portanto, gera melhores resultados na simulação.

Em relação ao dados de entrada, foram definidos quatro cenários hipotéticos da hidrodinâmica nos trechos de estudo. O primeiro para vazão mínima, o segundo para vazão média, o terceiro para a vazão máxima e o quarto para vazão 'ecológica' (Tabela 2).

**Tabela 2.** Dados de vazão nas fronteiras de entrada de fluido do domínio de estudo.

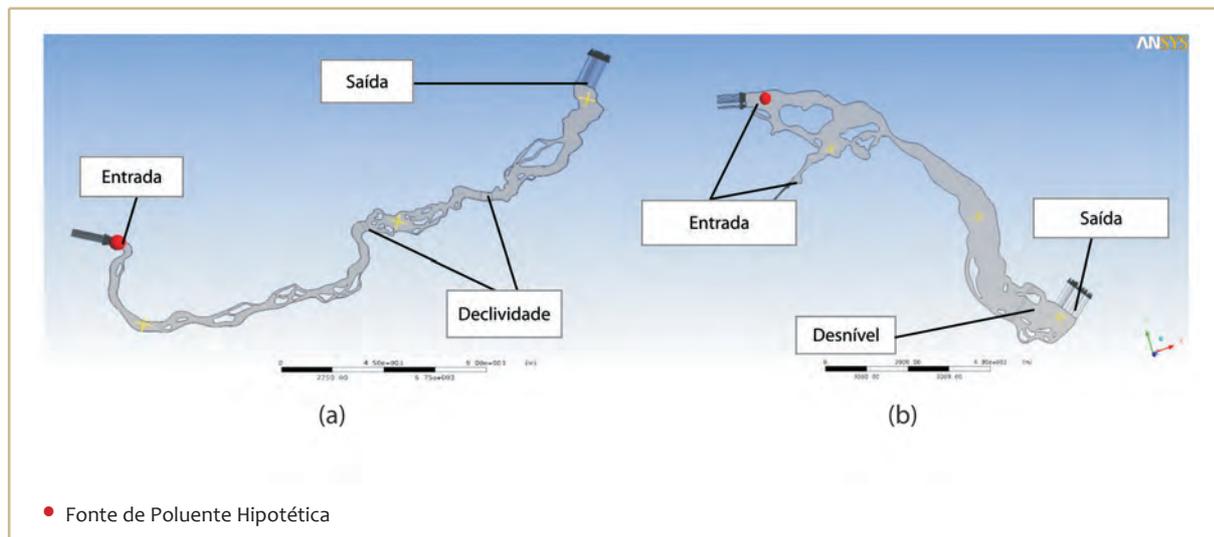
Domínio	Vazão (m <sup>3</sup> /s)			
	Mínima	Média	Máxima	“Ecológica”
Cachoeira Caldeirão	315,66	1197,19	1732,91	57,4
Ferreira Gomes I	320,49	1206,09	1759,8	73,74

Fonte: Séries hidrológicas históricas do Provam (1999).

Com os dados das vazões para cada cenário foram definidas as velocidades normais na secção reta na fronteira do volume de controle (potenciais reservatórios), correspondente à entrada de fluido de montante, utilizando a Equação 9. As condições de fronteira podem ser vistas na Figura 4.

$$U_n = \frac{q_n}{A_n} \quad (9)$$

Onde A é a área da interface de fronteira. Observa-se que a fonte contínua de poluente é o agente passivo do escoamento, indicado por um círculo em vermelho (escolha aleatória do local da fonte) na Figura 4.



**Figura 4.** Condições de contorno e iniciais em: (a) Cachoeira Caldeirão e (b) Ferreira Gomes I. As condições de fronteira (setas pretas) de entrada (*inlet*) e saída (*outlet*) foram definidas no Ansys® CFX-Pré 11.0.

As simulações seguiram o regime estacionário de escoamento. A temperatura no domínio foi considerada isotérmica a 27 °C. O estado não-estacionário ocorre quando a vazão varia significativamente em curto intervalo de tempo. Por isto escolheu-se vazões que caracterizassem cada período do ano do escoamento no rio, não havendo variação ao longo do tempo, mas na secção transversal, pode variar espacialmente (FENTON, 2007; CHOW, 1959).

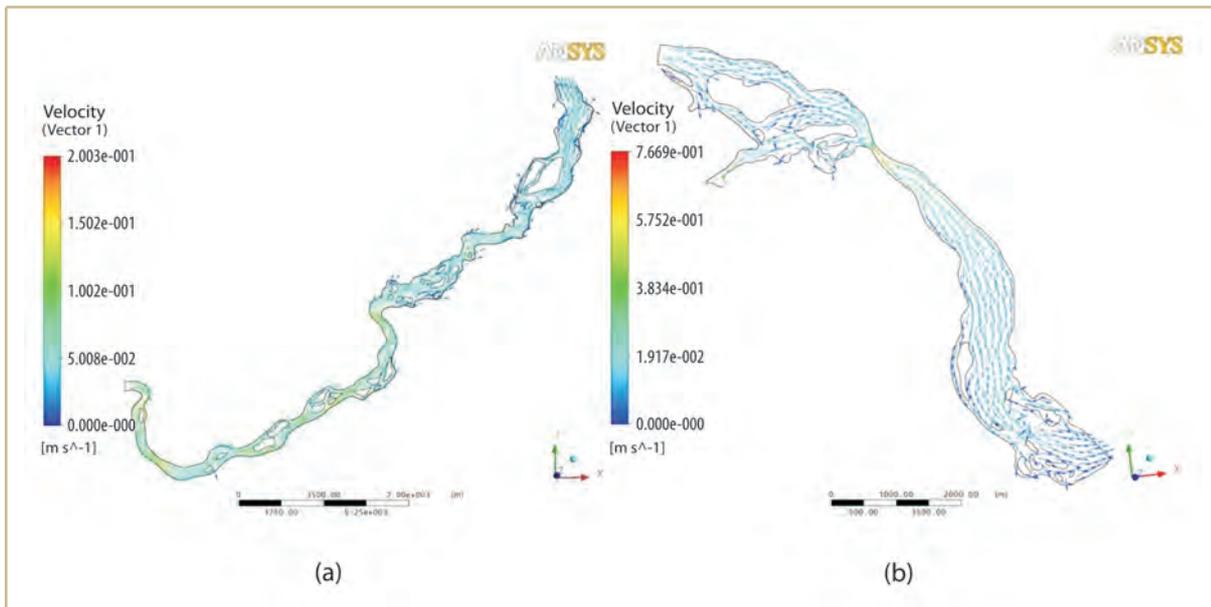
O poluente hipotético lançado, semelhante a um traçador, é uma variável definida pelo usuário que é resolvida pelo CFX usando uma equação de transporte (acoplada ao escoamento hidrodinâmico). O resultado é que o sistema funciona de modo semelhante a um traçador. A única propriedade que se pode alterar é a difusividade turbulenta. Neste caso, o lançamento pode ser comparado ao de um poluente produzido por um rio afluente ou por uma fonte localizada às margens do canal principal. O valor determinado da concentração do agente passivo no escoamento no local da fonte em cada domínio foi o mesmo, isto é, de  $0.00005 \text{ kg/m}^3$ .

### 3. RESULTADOS

Neste tópico são apresentados os resultados das simulações para os quatro cenários de vazão: mínima, média, máxima e ecológica. Os resultados são referentes a uma simulação estacionária e apresentadas na seguinte ordem: campo de velocidade do escoamento, campo de linha de corrente de velocidade e campo de dispersão de plumas de poluentes.

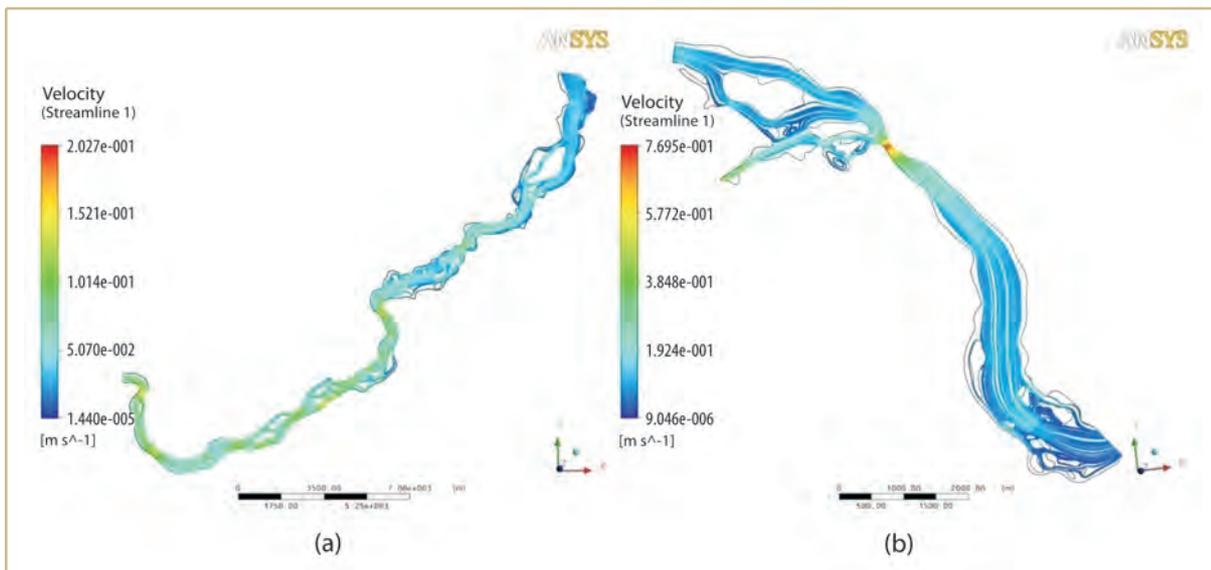
#### 3.1. Simulação 1: Vazão Mínima

Na Figura 5 é mostrado o campo vetorial da velocidade do escoamento entre a secção de entrada até as saídas em cada domínio. Nela observa-se a região do canal de escoamento. Os valores mínimos e máximos de velocidade estão respectivamente entre as escalas de 0 a  $0,2 \text{ m/s}$  no trecho de Cachoeira Caldeirão (Figura 5a). Em Ferreira Gomes foram encontrados os valores nas escalas de entre 0 a  $0,7 \text{ m/s}$  (Figura 5b). Os maiores gradientes de velocidade encontrados foram localizados nas regiões de constricção, identificadas pelas cores da escala. Percebe-se que a magnitude da velocidade tende a diminuir ao longo do canal de Cachoeira Caldeirão e em Ferreira Gomes, onde as velocidades permanecem na faixa de  $0,19 \text{ m/s}$ .



**Figura 5.** Campo vetorial da velocidade do escoamento para os domínios: (a) Cachoeira Caldeirão e (b) Ferreira Gomes.

Outra forma de análise da hidrodinâmica é mediante linhas de corrente de velocidade. A Figura 6 é indica as linhas de corrente para as áreas de estudo.



**Figura 6.** Campo de linhas de corrente do trecho onde se identifica melhor as regiões de formação de vórtices: (a) Cachoeira Caldeirão e (b) Ferreira Gomes.

Na Figura 6a e 6b podem ser observados alguns trechos onde é maior a velocidade tanto em Cachoeira Caldeirão quanto em Ferreira Gomes. Estas são reveladas nos trechos mais estreitos em

diversos pontos do rio. Em ambos os locais, as ilhas perturbam o escoamento e provocam ou impedem a formação de recirculações. Na Figura 6a encontram-se vários trechos nos quais a velocidade do escoamento está acima da média no trecho. Nestes locais, são identificados alguns pontos críticos do escoamento. Ao contrário de Cachoeira Caldeirão, onde ocorrem meandros, Ferreira Gomes só apresenta um ponto no qual a velocidade atinge sua escala máxima, localizado no estreitamento logo na primeira parte do trecho estudado (Figura 6b).

Na Figura 7 são indicados os resultados das simulações da dispersão de uma pluma de poluente. Para o cenário de estiagem, com vazão mínima, observa-se a pluma de poluente sendo emitida pela fonte em Cachoeira Caldeirão (Figura 7a). Neste cenário a pluma de poluente permaneceu mais dispersa se estendendo de forma mais constante por mais da metade do trecho. Em Ferreira Gomes a pluma de poluente se concentra em um curto trecho e dilui-se apenas por uma pequena área do trecho, tornando-se mais concentrada no local (Figura 7b).

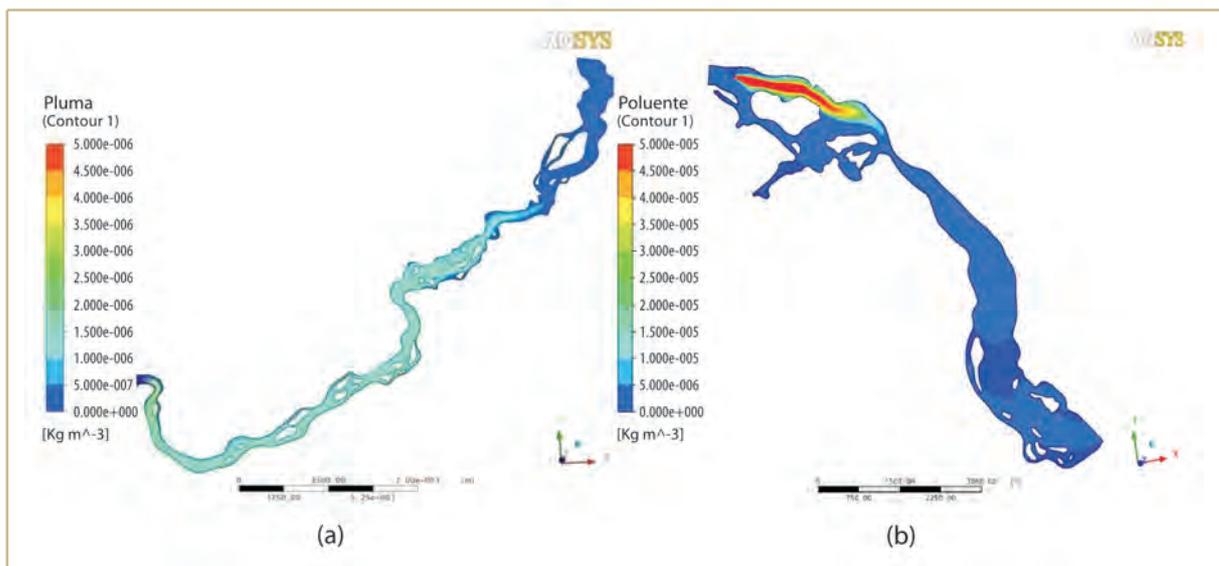
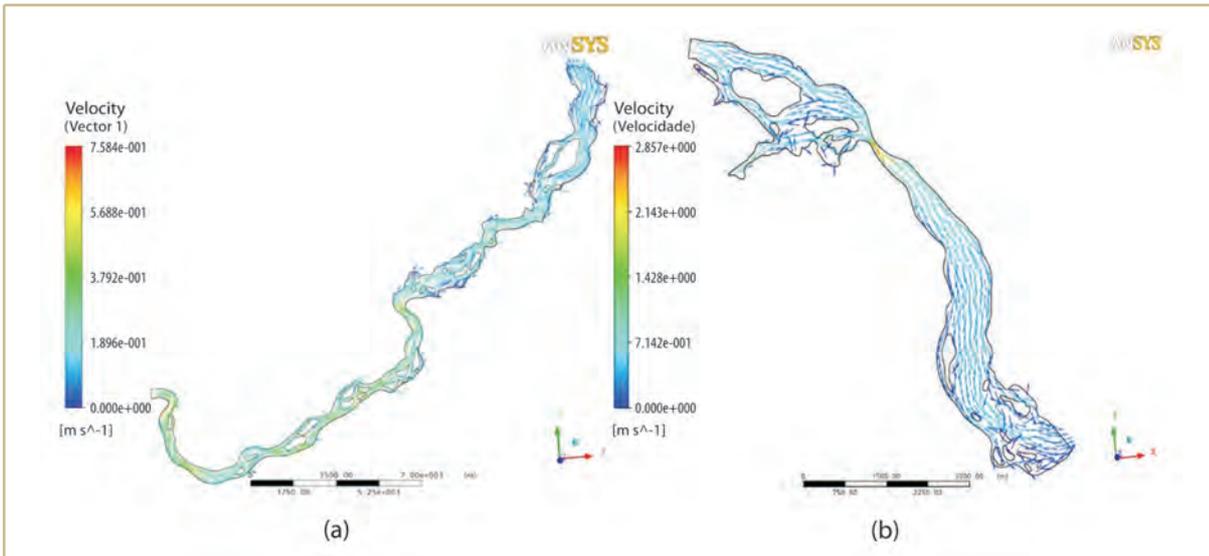


Figura 7. Dispersão das plumas poluentes ao longo dos dois trechos. (a) Cachoeira Caldeirão; (b) Ferreira Gomes.

### 3.2. Simulação 2: Vazão Média

Este subitem corresponde aos resultados para as vazões médias obtidas por estudos realizados no domínio Cachoeira Caldeirão e Ferreira Gomes.

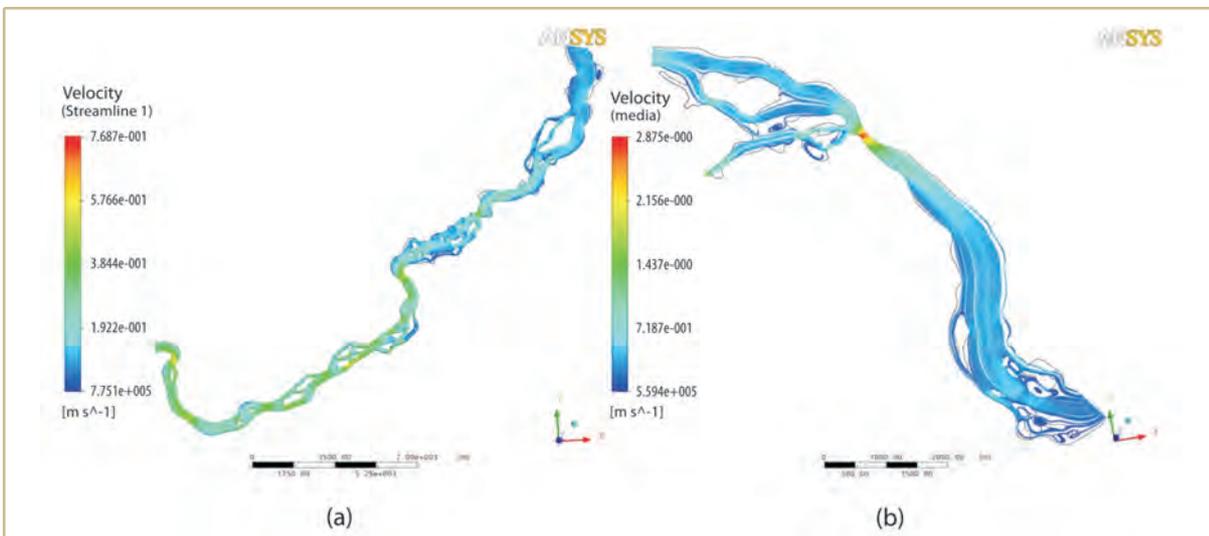
As máximas velocidades encontradas para Cachoeira Caldeirão (Figura 8a) foram da ordem de 0,4 m/s, normalmente localizadas nos estreitamentos e regiões contraídas próximas às margens do canal. No do trecho de Ferreira Gomes a velocidade máxima encontrada no centro do canal foi de 2,8 m/s<sup>2</sup>, isto é, muito elevada. Contudo, apesar de ser um tanto irrealista, é esperada uma maior vazão devido ao súbito estreitamento do canal no subtrecho logo após o encontro das duas entradas da UHECN (Figura 8b).



**Figura 8.** Campo vetorial da velocidade pra uma vazão média anual nos domínios: (a) Cachoeira Caldeirão e (b) Ferreira Gomes.

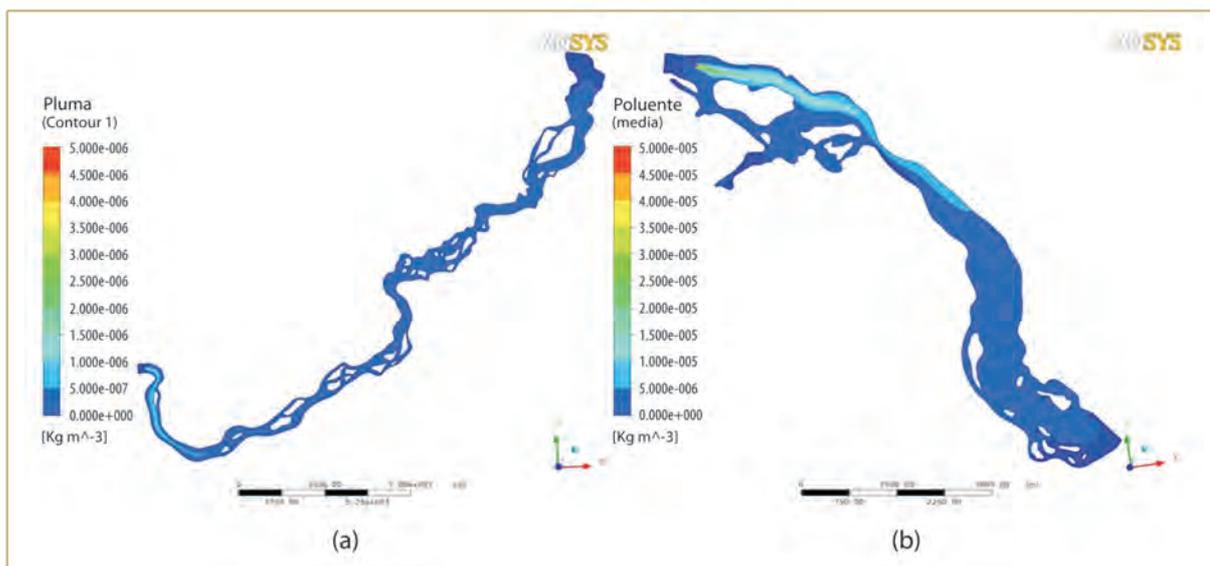
Na Figura 9 são indicadas as linhas de corrente e a magnitude da velocidade. Nota-se que as correntes se comportam da mesma forma que as análises da vazão mínima. A diferença ocorre na intensidade da velocidade, sendo maior neste caso que no anterior. A velocidade do escoamento é máxima próximas às regiões em que se encontram os estrangulamentos ou estreitamentos do canal.

Com o aumento da velocidade há uma tendência de diminuição da concentração de linhas de correntes formadas nas regiões periféricas do escoamento principal. Para vazão média em Cachoeira Caldeirão, os mesmo pontos críticos de escoamento foram observados como na simulação anterior. A diferença é a intensidade da velocidade média, ocorrendo o mesmo com Ferreira Gomes (Figura 9).



**Figura 9.** Linhas de correntes para vazão média: (a) Cachoeira Caldeirão e (b) Ferreira Gomes.

Quando se simula a dispersão de poluentes, observa-se que as plumas são diluídas e não se nota uma dispersão nítida para a concentração simulada, na qual a pluma ocupa pequena porção inicial do espaço do reservatório em Cachoeira Caldeirão, percebendo-se que neste trecho do rio ocorre certa diluição em decorrência do aumento da vazão, de modo que o poluente somente é visualizado nos locais próximos à fonte de emissão (Figura 10a). Em Ferreira Gomes a pluma é transportada com uma concentração bem abaixo da emitida na fonte, de modo que a área afetada é um pouco maior, porém, menos concentrada próxima da fonte emissora (Figura 10b). Nos dois casos a diminuição da concentração se deve ao aumento da vazão de diluição na simulação.

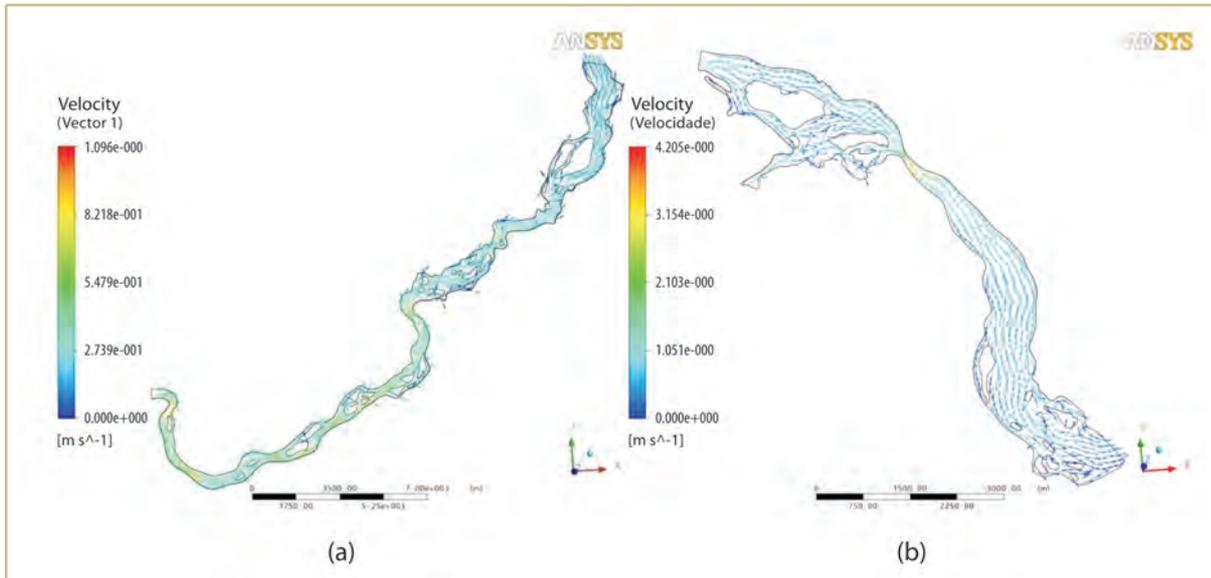


**Figura 10.** Plumagens de poluentes e dispersão na vazão média: (a) Cachoeira Caldeirão e (b) Ferreira Gomes.

Na Figura 10a e 10b percebeu-se que com o aumento da vazão as plumas tendem a se diluir. A concentração média encontrada no trecho foi da ordem de 0,000001 kg/m<sup>3</sup> em Cachoeira Caldeirão, e 0,000015 kg/m<sup>3</sup> em Ferreira Gomes, valores relativamente baixos para as respectivas fontes de poluente.

### 3.3. Simulação 3: Vazão Máxima

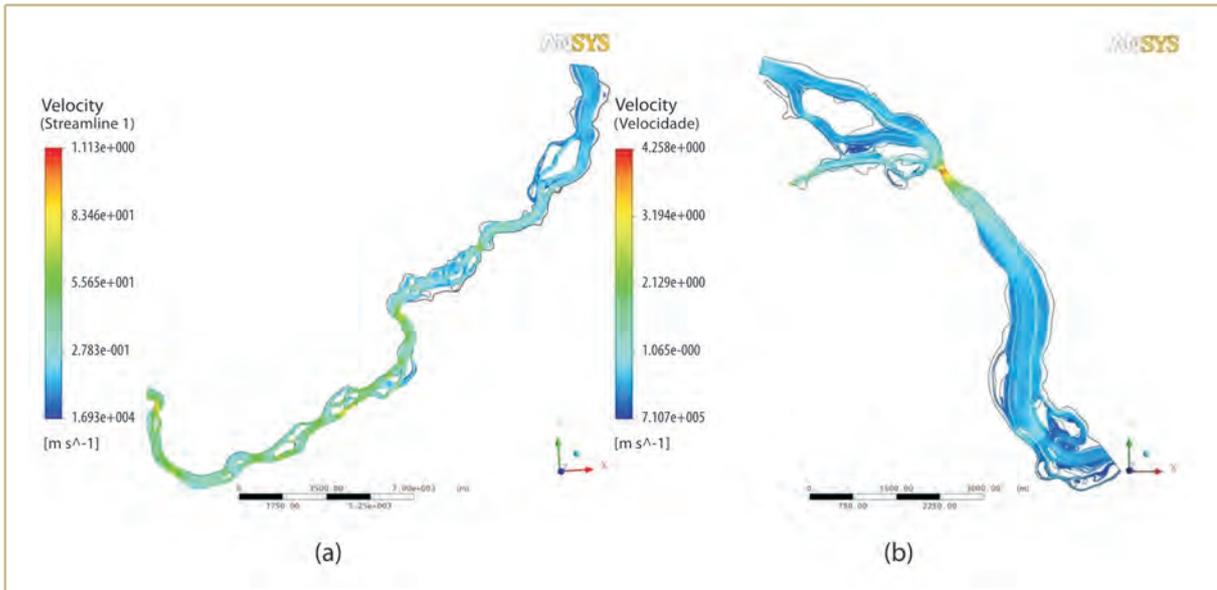
Na Figura 11 são demonstrados os resultados para os campos de velocidades em Cachoeira Caldeirão e Ferreira Gomes.



**Figura 11.** Campos de velocidades para vazão máxima: (a) Cachoeira Caldeirão e (b) Ferreira Gomes.

A velocidade máxima encontrada em Cachoeira Caldeirão foi de aproximadamente 0,9 m/s e em Ferreira Gomes aproximadamente 3,5 m/s (também um tanto quanto não realista). Mas, neste último caso, o súbito estreitamento do rio logo após a junção das duas entradas provenientes da UHECN provocou a superelevação da velocidade neste trecho. Esta superelevação pode ter sido provocada pela subestimação da profundidade naquele referido ponto, haja vista que a aproximação da batimetria de fundo pode incorrer em erros grosseiros para a compensação do fluxo, contrabalanceando a área da seção e a vazão naquele ponto específico. Esta é uma limitação da simulação, pois quando a vazão se eleva, normalmente a seção do rio aumenta proporcionalmente. A consideração de que, em média, a seção se mantém a mesma para todas as vazões, é uma forma de não elevar a complexidade do problema a uma questão geométrica. Isto é, sacrifica-se a geometria, mas os reflexos se propagam para o restante do escoamento, o que acaba ocorrendo com o aumento exagerado da velocidade naquele ponto em especial (ponto crítico).

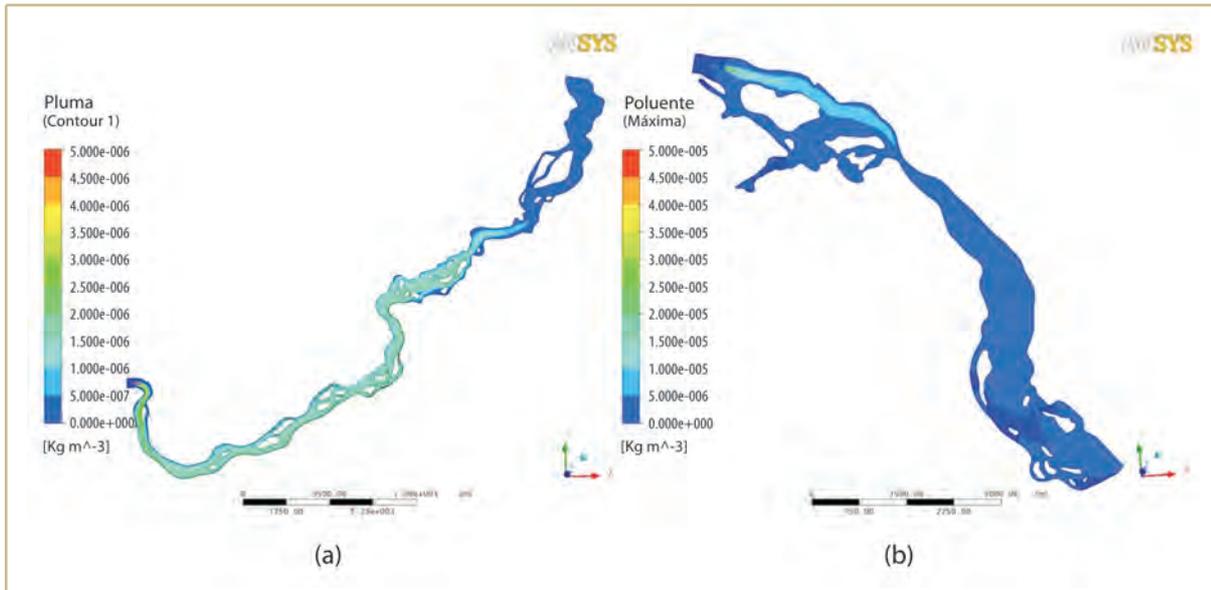
As linhas de correntes podem ser observadas em detalhes para vazão máxima na Figura 12.



**Figura 12.** Linhas de correntes para o cenário de vazão máxima. (a) Cachoeira Caldeirão; (b) Ferreira Gomes.

Nos dois trechos a velocidade do escoamento varia pouco de uma simulação para a outra. A vazão máxima segue um padrão semelhante à simulação de vazão média, guardando-se as devidas proporções de intensidade das velocidades. Contudo, observam-se regiões lóticis em que ocorrem comportamento do escoamento nos mesmos locais das análises anteriores. Mas pode ser observado que em Cachoeira Caldeirão há vários pontos conjuntos em toda a parte inicial do canal onde as margens sofrem maior intensidade de força “erosiva”, o que representa uma elevação do nível de risco de degradação das margens ou maior possibilidade de “desgaste” do solo por ação de lixiviação, arraste ou atrito nestas regiões críticas do canal. Em Ferreira Fomes I as áreas críticas são localizadas no estreitamento e nas entradas do reservatório, de forma análoga à descrita na simulação de vazão média. Mas observa-se também uma maior homogeneidade das linhas de corrente em todo o domínio computacional e principalmente no trecho próximo da saída do reservatório.

Em relação às plumas de poluentes (Figura 13), há um comportamento para a vazão máxima no qual se observa o aumento da velocidade em todo o domínio, cuja consequência é uma maior diluição da pluma. Devido ao maior comprimento de Cachoeira Caldeirão e a relativamente menor largura do canal, há uma maior tendência de um comportamento simultâneo de diluição e espalhamento da pluma. Enquanto que em Ferreira Gomes, devido ao maior alargamento do canal e à localização da pluma (somente na margem esquerda), surge um processo de diluição mais intenso e menor capacidade dispersiva.



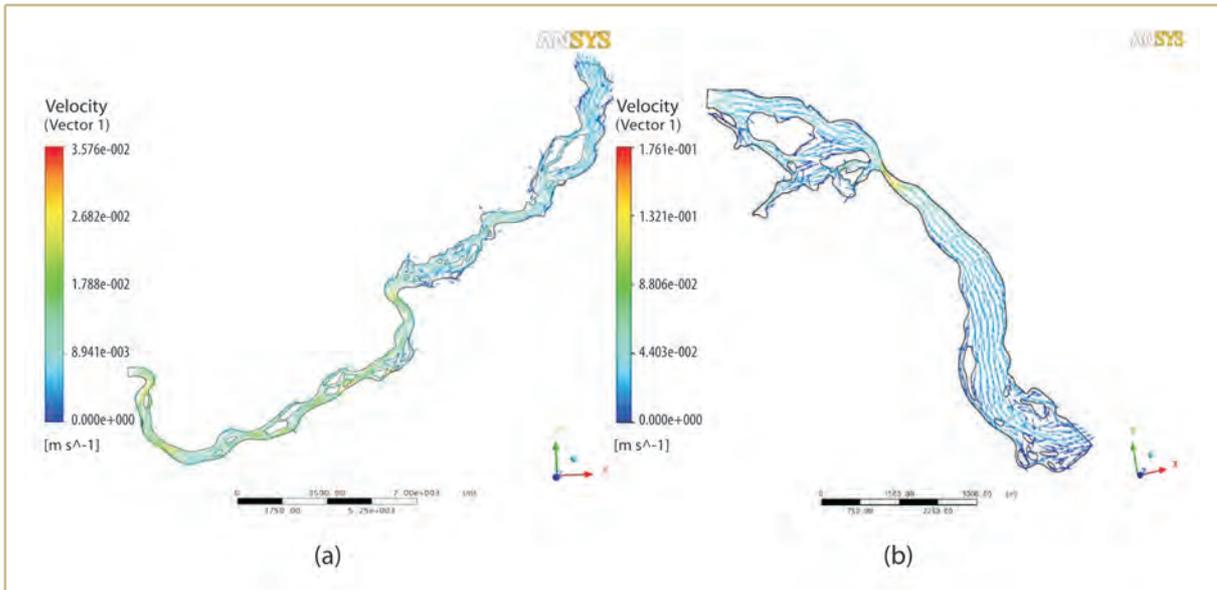
**Figura 13.** Dispersão de plumas poluentes em que a vazão é máxima: (a) Cachoeira Caldeirão e (b) Ferreira Gomes.

Uma característica da dispersão no trecho de Cachoeira Caldeirão é a concentração abaixo da emissão pontual, sendo de aproximadamente  $0,000002 \text{ kg/m}^3$  ao longo de quase todo o trecho de estudo (Figura 13a). No caso de Ferreira Gomes, a forma como o poluente se dispersa pelo rio é semelhante ao da simulada na vazão mínima. O diferencial é a compensação da diluição da concentração do poluente em uma região menor e com maior homogeneização da concentração no restante do domínio, da ordem de  $0,00002 \text{ kg/m}^3$  (Figura 13b).

### 3.4. Simulação 4: Vazão “Ecológica”.

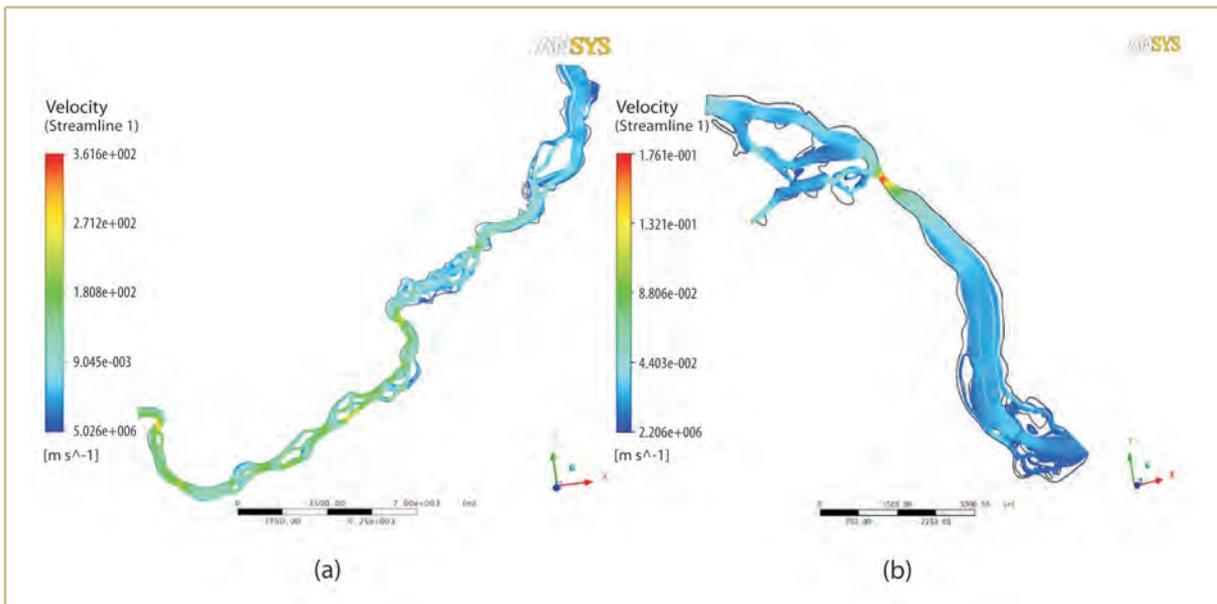
A vazão ecológica ou o potencial de vazão ambiental é difícil de se definir, haja vista que depende de vários fatores além dos hidrológicos. Mas no presente trabalho, adotou-se um valor da ordem de  $1/3$  da vazão mínima para atender aos mínimos requisitos de funcionalidade estimados para os ecossistemas aquáticos dos presentes AHEs, sendo compreensivelmente passível de questionamentos. No entanto, é preciso ter um ponto de partida, e se adotaram os valores estipulados pela Tabela 2. Neste caso, os resultados da modelagem foram os mais críticos para todas as variáveis estudadas.

O valor da velocidade máxima encontrado foi da ordem de  $0,035 \text{ m/s}$ . Os maiores gradientes encontrados estão localizados nas regiões próximas às margens do rio e nos entroncamentos em Cachoeira Caldeirão (Figura 14a). No trecho de Ferreira Gomes, valores próximos de zero a valores máximos da ordem de  $0,17 \text{ m/s}$ . O padrão do escoamento não se modificou significativamente e se assemelhou aos das análises anteriores (Figura 14b).



**Figura 14.** Campo vetorial da velocidade referente à vazão ecológica estimada: (a) Cachoeira Caldeirão e (b) Ferreira Gomes.

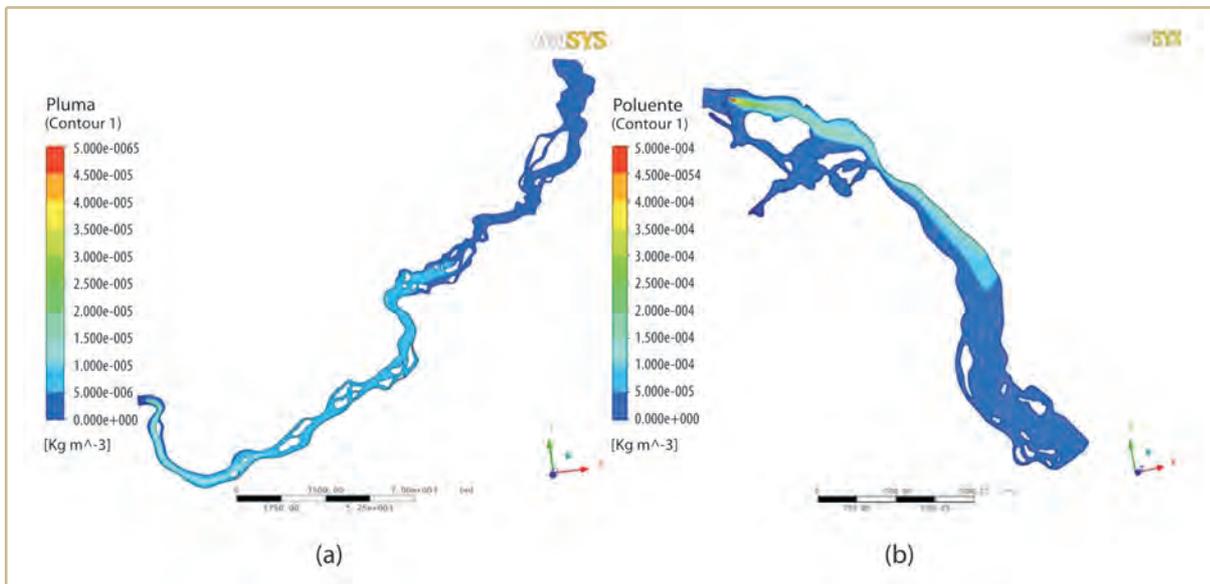
Os campos de recirculação mais expressivos estão localizados nas mesmas regiões apontadas nas demais simulações. O que difere dos outros casos é que os vórtices possuem linhas muito mais concentradas, o que resulta em gradientes de velocidade menores para estas situações (Figura 15).



**Figura 15.** Linhas de corrente para vazão ecológica: (a) Cachoeira Caldeirão e (b) Ferreira Gomes.

Outra consequência relacionada aos menores valores de velocidade nas regiões de recirculação é apresentar menor capacidade de diluir a pluma poluente dispersa no rio, o que ocasiona uma maior

concentração do efluente na zona de jusante da fonte. Na figura 16 evidencia-se a dispersão de poluentes para vazão ecológica. As velocidades máximas também foram encontradas nas mesmas regiões das simulações anteriores, guardando as devidas proporções em termos de intensidade, conforme as escalas de cores da Figura 16.



**Figura 16.** Campo de dispersão de poluentes para vazão ecológica: (a) Cachoeira Caldeirão e (b) Ferreira Gomes.

No trecho de Cachoeira Caldeirão, o poluente tende a se dispersar por uma área até a metade do rio. Esta área permanece com a mesma ordem de grandeza de concentração do ponto da fonte de poluente e o valor predominante da concentração é aproximadamente  $0,00002 \text{ kg/m}^3$ . As plumas na Figura 16 a ocupam ambas as margens devido à maior influência da dispersão lateral na corrente que favorece este comportamento. Para o trecho de Ferreira Gomes, as plumas se dispersam por mais de 3 km no domínio, cuja concentração se concentra em níveis acima da fonte de emissão (provável acúmulo de poluente nas margens). O valor médio obtido neste caso foi da ordem de  $0,00015 \text{ kg/m}^3$  (Figura 16b). Nesta situação crítica, tanto a hidrodinâmica quanto as especificidades da fonte são fundamentais na determinação do comportamento da dispersão da pluma, principalmente porque tende a favorecer e forçar sua dispersão apenas para a região da margem esquerda do escoamento.

É importante observar, contudo, no caso específico do escoamento no trecho de Ferreira Gomes, que há uma falha conceitual nesta última análise. A razão é que, na simulação da vazão mínima e ecológica, a UHECN tende a não verter água pelas comportas (vertedouros) nos períodos de estiagem. Portanto, tanto no regime de vazão mínima quanto no de vazão ecológica, é muito improvável que ocorra o escoamento simulado como aqueles mostrados nos cenários 3 e 4, e sim somente o escoamento pelo canal de fuga, mudando significativamente o padrão de escoamento e as análises. Mas este será objeto de estudos futuros.

## 4. CONCLUSÕES

A pesquisa apresenta um trabalho inédito sobre modelagem hidrodinâmica em ecossistemas aquáticos cotados para construção de barragem e formação de reservatórios para aproveitamentos hidrelétricos (AHEs) previstos em inventário no rio Araguari (AP). O estudo teve como objetivo principal avaliar o comportamento natural do escoamento superficial da água do rio Araguari antes da construção da barragem e próximos dos locais previstos de sua construção, sem perder o contexto da realidade dos rios da Amazônia, normalmente muito pouco investigados.

Dois aspectos da análise relacionados à modelagem se destacaram no presente trabalho: a complexidade natural do escoamento em decorrência da geometria do rio e o acoplamento de um escalar (fonte contínua de poluente) à hidrodinâmica do escoamento. Diante dessas duas óticas, elencamos as seguintes conclusões:

1. Foi possível simular a dinâmica de escoamento segundo duas óticas: a) operação da UHECN, pois as vazões de saída da UHECN, dependendo do período, apresentam forte influência no trecho de jusante. Esta, por sua vez, é a condição de entrada da vazão do AHE Ferreira Gomes; b) a sazonalidade das chuvas promove uma variabilidade hidrológica significativa, determinando as características das vazões do rio Araguari em todo o trecho analisado.
2. Na ótica do escoamento controlado pela UHECN e pela variabilidade hidrológica sazonal, as simulações com o sistema computacional Ansys CFX-11.0 mostraram-se capazes de descrever o desenvolvimento do escoamento com razoável realismo, considerando a dificuldade acrescida da complexidade inerente à dispersão de plumas de poluentes na água em ambientes naturais, como ocorre com o rio Araguari. Neste caso, tanto a visualização dos campos de velocidade quanto das linhas de corrente e campos de concentração do escalar (poluente) foi muito útil para favorecer a percepção geral do escoamento e avaliar o comportamento da dispersão de plumas segundo as diferentes vazões ao longo de um ciclo hidrológico na bacia do rio Araguari.
3. A velocidade depende das características geométricas do escoamento como profundidade e largura do canal e, principalmente, da vazão de entrada da seção estudada. Desta forma, ao se manter a geometria do escoamento (seção transversal ao escoamento sempre constante), quando ocorreu a variação da vazão, mantendo-se a área da seção transversal com o mesmo valor, ocorreu uma superestimação esperada (na vazão máxima) ou subestimação esperada (na vazão mínima e ecológica) da velocidade simulada. Contudo, os padrões de escoamento se mantiveram coerentes para todas as simulações. Nestes casos, houve a percepção do real escoamento em situações importantes do ciclo sazonal hidrológico, isto é, a intensificação ou diminuição dos módulos de velocidades em todo o domínio computacional variou de acordo com o aumento ou diminuição da vazão imposta pelas condições de contorno no trecho

estudado. Portanto, a modelagem respondeu coerentemente às variações de entrada das vazões (mínima, média e máxima e ecológica).

4. O estudo torna evidente que é necessário compreender o comportamento hidrodinâmico do escoamento para inferir sobre as possíveis respostas referentes à dispersão de poluentes na água ou mesmo às principais localidades em que estão ocorrendo potenciais mudanças de direção dos vetores velocidades, variação da energia cinética turbulenta e dissipação de energia cinética turbulenta, todas associadas aos processos de dispersão de agentes passivos na água. A partir deste tipo de análise é possível observar locais com maior potencial de mistura, erosão ou processos de sedimentação, segundo os processos turbulentos governados pelo escoamento natural do trecho do rio.
5. Torna-se evidente, no entanto, que há necessidade de se aperfeiçoar as informações sobre a geometria do canal, em especial a superfície de fundo, a partir de estudos batimétricos específicos para o corpo d'água em questão.
6. Por mais simplificadas que pareçam, a modelagem e a simulação empreendidas surgem como um ótimo ponto de partida para análises futuras mais profundas sobre o escoamento turbulento natural. As ferramentas numéricas tornam-se disponíveis para absorver novas situações, como mudanças dos parâmetros físicos que quantifiquem principalmente as características batimétricas locais, as mudanças de comportamento do escoamento alterado, características físicas da geometria lateral, transversal, longitudinal, mudanças dos locais das fontes de poluição etc.
7. O conhecimento científico gerado em simulações torna-se muito útil no planejamento e gestão de recursos hídricos e é fundamental para empreender decisões técnicas fundamentadas em características mais reais possíveis, em especial no apoio ao monitoramento da qualidade da água, estudos limnológicos e nos estudos de impactos ambientais decorrentes de atividades antropogênicas no rio Araguari.
8. Nos quatro cenários hipotéticos estudados, observou-se que a dispersão dos poluentes em Cachoeira Caldeirão e Ferreira Gomes sofrem influência da vazão de saída do vertedouro e da casa de força da UHECN, as quais apresentam como consequência uma tendência da diminuição dos efeitos turbulentos laterais e intensificação dos efeitos longitudinais. Neste caso, as zonas de recirculação tendem a se prolongar mais longitudinalmente na direção do fluxo.
9. Quando se comparam os quatro cenários hidrodinâmicos hipotéticos, a dispersão longitudinal das plumas de poluentes se intensifica nas maiores vazões, em detrimento da dispersão lateral. Como resultado, se uma fonte de emissão de poluente for inserida exatamente no local onde foram realizadas as simulações, as vazões máximas tendem a

diluir e espalhar mais os poluentes no escoamento (homogeneizar as plumas). Por outro lado, nas simulações das vazões mínima e ecológica, as plumas se concentram mais próximas das fontes de poluição, tendendo a se dispersar menos devido ao menor poder de diluição do escoamento de baixas vazões.

10. Finalmente, a associação de informações (meio físico ou abiótico) com fatores bióticos ou socioeconômicos (usos e ocupação da bacia) podem produzir uma série de informações úteis aplicadas aos diversos tipos de cenários, de modo que podem auxiliar nos processos de gestão dos recursos hídricos ou concernentes aos ecossistemas aquáticos, auxílio em campanhas de monitoramento, estudos de impactos ambientais, análise ambiental relacionada à engenharia hidráulica, hidrológica e sanitária, entre outros.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do projeto REMETAP (FINEP-CNPq/NHMET-IEPA), UNIVERSAL (CNPq/NHMET-IEPA, **Processo 479405/2006-9**), ao Laboratório de Energia e Ambiente LEA/UNB, ao Projeto REMAM e a todos que contribuem de alguma forma com este trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS

ANSYS User's Manual for Rev. 11 – ANSYS CFX-Solver Theory Guide, 2007.

BRITO, D. C. *Aplicação do sistema de modelagem da Qualidade da Água qual2kw em Grandes Rios: O Caso da Alto e Médio rio Araguari – AP*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amapá, 2008.

BÁRBARA, V. F. *Uso do Modelo QUAL2E no Estudo da Qualidade da Água e da Capacidade de Autodepuração do Rio Araguari – AP (Amazônia)*. 174 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente). Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2006.

Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução N.º 357 de 17 de março de 2005. Disponível em <[www.mma.gov.br/conama/res/res05/res35705.pdf](http://www.mma.gov.br/conama/res/res05/res35705.pdf)>. Acessado em 15 de março de 2009.

CHOW, V.T., *Open-channel hydraulics*. Mcgraw-Hill Book Company, 1959.

CUNHA, A.C., 2008. *Pollutants Movement in the environment: the shallow flow experimentation and numerical simulation on Matapi River Mouth, in Amapá/ Brasil, estuarine coast*. Post doctorate engineering. American World University Missipi/ CA. EUA, 2008. 105f.

CUNHA, A.C; BRITO, D. C. e PINHEIRO, L. A. R. *Uso do sistema de modelagem Qual2E (Qual2kw) para o estudo de impacto ambiental na qualidade da água causado por barragem e cidades ribeirinhas no Alto e Médio*

- Araguari – Amapá. Relatório Final do Projeto Araguari II. Processo 479405/2006-9 NHMET/IEPA-CNPq. Macapá – Amapá. Abril. 144f. 2009.
- FIALHO, A. B. *SolidWorks Office Premium 2008: Teoria e Prática no Desenvolvimento de Produtos Industriais: plataforma para projetos CAD/CAE/CAM/* Arivelto Bustamante Fialho. São Paulo: Érica, 2008.
- FENTON, J. *Open channel hydraulics*. Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe Kaiserstrasse 12, 76131 Karlsruhe, Germany, 2007.
- FRAGOSO JÚNIOR, C. R. *Simulações da Dinâmica de Fitoplâncton no Sistema Hidrológico do Taim (RS)*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS, 2004.
- MACHADO, M. B. *Modelagem Tridimensional da Dispersão de Poluentes em Rios*. Tese de Doutorado, 2006.
- PINHEIRO, L. A. R. *Modelagem Hidrodinâmica Aplicada à Dispersão de Poluentes em Grandes Rios: Interações entre a Ilha de Santana, Santana e Macapá no Baixo Rio Amazonas*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Amapá. Curso de Licenciatura Plena em Física. Macapá, Amapá, Brasil, 2008.
- PROVAM. *Programa de Estudos e Pesquisas nos Vales Amazônicos*. Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia. Belém, PA: SUDAM/OEA, v. 1, 1990. 189 p.
- SOBRINHO, G. A. *Aplicação de equações de resistência ao escoamento em um trecho do rio Atibaia/SP*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 1996.

## Climatologia de Precipitação no Amapá e Mecanismos Climáticos de Grande Escala

**Dr. Everaldo Barreiros de Souza**

everaldo@ufpa.br

Professor da Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal do Pará (UFPA).

**Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha**

alancunha@unifap.br

Ex-coordenador do NHMET/IEPA, Coordenador do Projeto REMETAP, Prof. do Curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e PPGBio/PPGDAPP-UNIFAP.

**Resumo.** O presente trabalho discute os aspectos climatológicos da precipitação no Estado do Amapá, bem como apresenta os principais mecanismos climáticos do Pacífico e Atlântico moduladores dos padrões anômalos de chuva sazonal no Estado. A climatologia da precipitação no Amapá (1978-2007) indica que as regiões mais chuvosas se localizam na porção norte e litoral, com volume de chuva anual em torno de 2.900 mm. A climatologia sazonal revelou que o período mais seco ocorre na primavera (setembro a novembro) e o mais chuvoso ocorre no outono (março a maio). As análises das composições observacionais representativas dos eventos com regime de precipitação abaixo e acima do normal, selecionados objetivamente por técnicas estatísticas, evidenciaram dois cenários climáticos contrastantes. Os anos com registro de chuva acima (abaixo) do normal no Amapá associam-se diretamente com a intensificação (inibição) da ZCIT sobre a Amazônia Oriental, cuja configuração relaciona-se com a atuação da La Niña (do El Niño) sobre o Oceano Pacífico Tropical ocorrendo concomitantemente com a fase do Dipolo negativo (positivo) sobre o Oceano Atlântico intertropical.

**Palavras-chave:** Climatologia, El Niño, La Niña, Dipolo do Atlântico, Precipitação, Amapá, EOF.

# 1. INTRODUÇÃO

Na Amazônia, situada inteiramente dentro da região tropical da América do Sul, as variáveis climatológicas mais importantes são a atividade convectiva (formação de nuvens) e a precipitação pluviométrica. Neste trabalho, o foco principal é o estudo da precipitação observada na Amazônia Oriental, com ênfase no Estado do Amapá.

O regime de precipitação da Amazônia exibe máximos anuais bem pronunciados durante os meses do verão (dezembro, janeiro e fevereiro – DJF) e outono (março, abril e maio – MAM), sendo que os mínimos anuais ocorrem durante os meses de inverno (junho, julho e agosto – JJA) e primavera (setembro, outubro e novembro – SON). Portanto, considera-se a estação chuvosa do Amapá ocorrendo durante os períodos sazonais de DJF e MAM.

A variabilidade da chuva sazonal durante a estação chuvosa é diretamente dependente dos mecanismos climáticos de grande escala que se processam nos dois oceanos tropicais adjacentes: o Oceano Pacífico e o Oceano Atlântico (De SOUZA *et al.*, 2004).

No Oceano Pacífico, o mecanismo climático dominante é o conhecido fenômeno El Niño/Oscilação Sul (ENOS) que possui duas fases extremas: El Niño e La Niña. As condições de El Niño (La Niña) associam-se ao aquecimento (resfriamento) anômalo das águas oceânicas sobre o Pacífico tropical, perdurando no mínimo cinco meses entre o verão e outono (TRENBERTH, 1997).

No Oceano Atlântico, o principal mecanismo climático denomina-se Padrão de Dipolo (HASTENRATH & HELLER, 1977; MOURA & SHUKLA, 1981; NOBRE & SHUKLA, 1996; De SOUZA & NOBRE, 1998) ou atualmente denominado de Gradiente de anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Atlântico intertropical (De SOUZA *et al.*, 2004; De SOUZA *et al.*, 2005). Este modo climático caracteriza-se pela manifestação simultânea de anomalias de TSM configurando-se espacialmente com sinais opostos sobre as bacias norte e sul do Atlântico Tropical. Este padrão térmico inverso gera, conseqüentemente, o aparecimento de um gradiente térmico meridional e inter-hemisférico na região intertropical. Assim sendo, este mecanismo apresenta duas fases opostas: o Dipolo positivo e o Dipolo negativo. A fase do Dipolo positivo caracteriza-se pela presença simultânea de anomalias positivas/negativas de TSM configurando-se sobre a bacia norte/sul do Oceano Atlântico Tropical. A fase do Dipolo negativo apresenta a configuração essencialmente oposta. Vários trabalhos observacionais evidenciaram que a fase do Dipolo interfere diretamente na migração norte-sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

A ZCIT é o principal sistema meteorológico indutor de chuva na Amazônia Oriental, especialmente no Amapá e Pará, quando da sua posição climatológica mais austral. Esta atuação define a qualidade da estação chuvosa nestes Estados (De SOUZA *et al.*, 2000).

No presente trabalho, optou-se pela abordagem observacional sobre a variabilidade espacial/temporal da chuva climatológica sobre a Amazônia Oriental, com ênfase ao Estado do Amapá,

considerando as médias anuais e sazonais. Além disso, busca-se estabelecer objetivamente, por meio de técnicas estatísticas multivariadas, qual é o principal modo de variabilidade da chuva sobre o Amapá durante o período chuvoso (entre os meses de dezembro a maio). Investiga-se também a caracterização espacial dos padrões oceano-atmosfera associados aos mecanismos climáticos de grande escala atuando sobre o Pacífico e Atlântico Tropical, os quais modulam as anomalias de precipitação do período chuvoso sobre o Amapá e Pará nas escalas de tempo interanual e sazonal.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Bases de dados observacionais

As bases de dados utilizadas neste trabalho compreendem o período de 1978 a 2009, ou seja, englobam dados secundários coletados e compilados durante as últimas três décadas.

Os dados mensais de precipitação observados sobre a Amazônia Oriental são derivados do Centro de Previsão Climática (CPC) pertencente ao National Centers for Environmental Prediction (NCEP) dos EUA. Estes dados encontram-se documentados em Silva *et al.* (2007) e foram gerados mediante interpolação espacial dos dados observados nas estações meteorológicas de superfície, reportados na codificação SYNOP das 12 UTC. Mais detalhes sobre o controle de qualidade e métodos e procedimentos metodológicos podem ser encontrados em Silva *et al.* (2007).

Uma segunda fonte de dados de precipitação usada foi o Global Precipitation Climatology Project (GPCP), estabelecida pelo World Climate Research Program (WCRP) com o objetivo de prover informações sobre a distribuição temporal e espacial da precipitação sobre o globo. Este conjunto de dados é de domínio público e eles são gerados incorporando dados de estimativas por satélites, particularmente, no canal de micro-ondas e infravermelho, combinados com dados de pluviômetros. Sobre o continente, as estimativas de chuva de multissatélites são ajustadas por análises de pluviômetros, enquanto o ajuste sobre o oceano não é realizado. A disponibilização dos dados é mensal com informações distribuídas em uma grade de  $2.5^\circ$  latitude  $\times$   $2.5^\circ$  longitude (HUFFMAN *et al.*, 1997; ADLER *et al.*, 2003).

Utilizam-se também os dados de radiação de onda longa (ROL) derivados dos satélites meteorológicos de órbita polar (LIEBMANN e SMITH, 1996) para caracterizar a atividade convectiva (nebulosidade) tropical. Os dados das componentes zonal e meridional do vento do projeto de reanálise NCEP/NCAR (KALNAY *et al.*, 1996) são utilizados com a finalidade de estudar a circulação atmosférica sobre a região da Amazônia. Também foram usados dados de TSM (REYNOLDS *et al.* 2002) adquiridos junto ao CPC/NCEP com o propósito de se investigar os padrões observados sobre a superfície oceânica do Pacífico e Atlântico Tropical.

## 2.2. Técnicas Estatísticas

Os mapas climatológicos da precipitação do GPCP e do CPC foram obtidos por intermédio de cálculo das médias ou normais climatológicas referentes ao período de 30 anos (1978 a 2007), conforme determinação da Organização Meteorológica Mundial (OMM).

A técnica estatística multivariada conhecida como Funções Ortogonais Empíricas (EOF; KUTZBACH, 1967) é utilizada neste trabalho para investigar a natureza espaço-temporal da precipitação sazonal observada no Estado do Amapá. Este método permite a obtenção de funções espaciais e coeficientes temporais que explicam a fração maximizada da variância total do conjunto de dados de precipitação. Assim sendo, a análise de EOF extrai objetivamente os principais mecanismos de variabilidade climática, ou seja, os modos dominantes dos padrões anômalos de precipitação presentes na série temporal dos dados pluviométricos dispostos em ponto de grade. Os cálculos foram obtidos com base na matriz de correlação e os resultados são interpretados da seguinte maneira: autovetores ou “loadings” representam campos espaciais contendo correlações, as quais podem ser interpretadas como tendo o mesmo sinal das anomalias de precipitação; autovalores são os coeficientes que servem para indicar se o modo representa um padrão fisicamente consistente (NORTH *et al.*, 1982); variância explicada são os coeficientes que servem para estimar a representação estatística de cada modo em relação aos dados originais; componente principal (CP) são os coeficientes temporais que expressam o modo como os autovetores evoluem no tempo.

A técnica de composições dos eventos significativos de chuva sazonal, selecionados objetivamente mediante resultados da EOF, é usada no presente estudo para investigar a caracterização dos mecanismos climáticos sobre os Oceanos Pacífico e Atlântico Tropical (fases do ENOS e do Dipolo), bem como a estrutura dinâmica da circulação atmosférica, convecção e precipitação na região da Amazônia Oriental e Atlântico Equatorial.

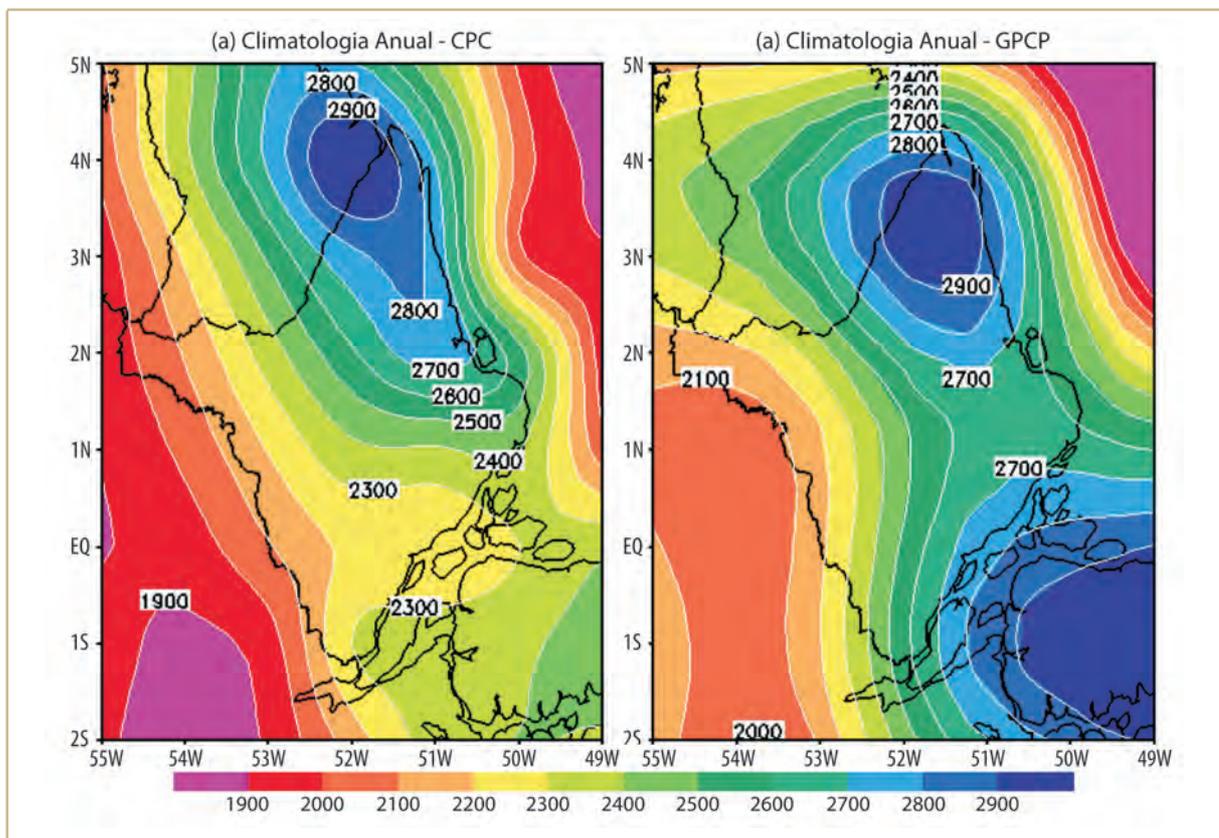
## 3. CLIMATOLOGIA DE PRECIPITAÇÃO NO AMAPÁ

### 3.1. Média Anual

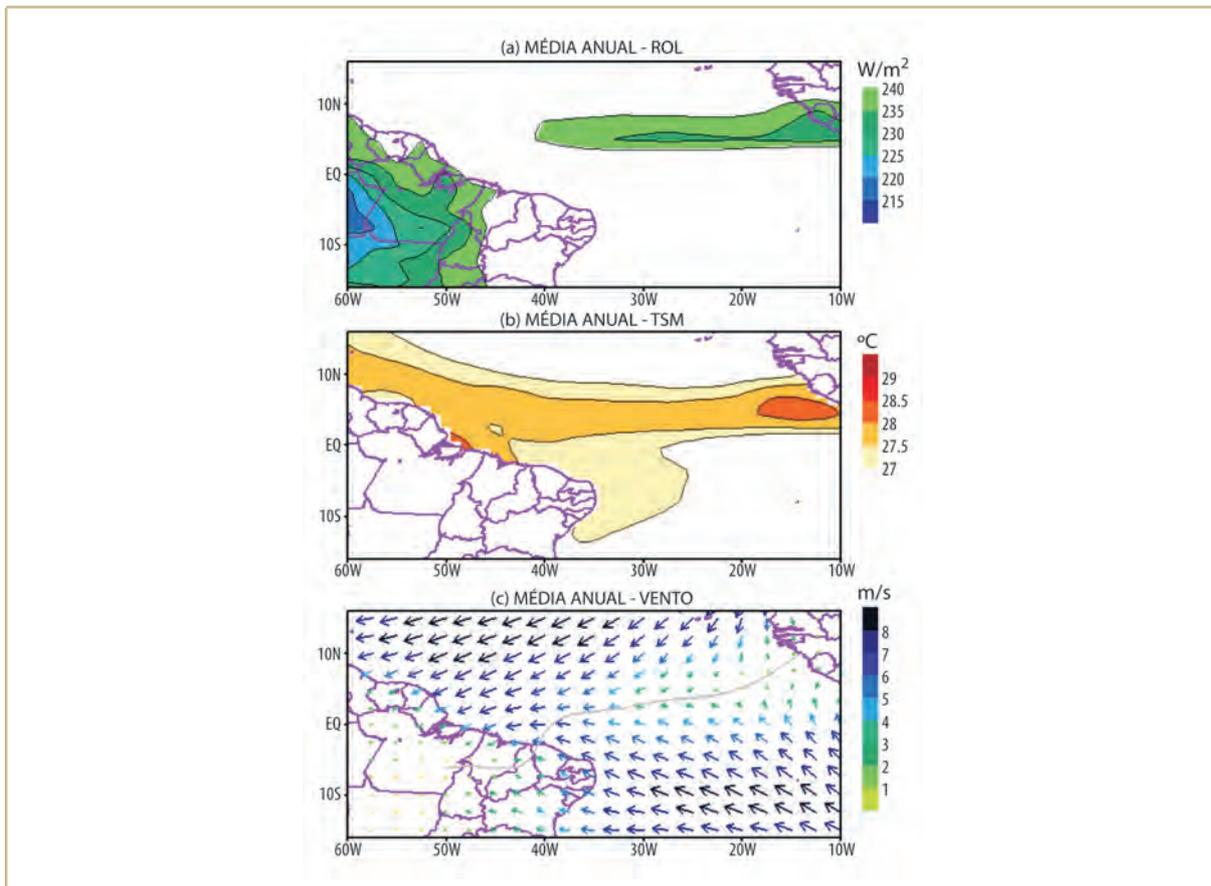
A Figura 1 mostra a normal climatológica anual da precipitação para o Estado do Amapá, calculada com base no período de 30 anos (1978-2007), com os valores médios climatológicos que se espera ocorrer durante um ano sem fenômenos climáticos intensos atuando sobre a região (ou seja, dentro do padrão normal). O Amapá apresenta tipicamente uma grande região contendo máximos de chuva anual, situada no setor norte do Estado (Oiapoque) e na região litorânea e adjacências (Vila Velha, Cunani, Lourenço, Calçoene e Amapá). Nestas regiões, a precipitação anual do CPC e GPCP oscila entre 2.700 e

2.900 mm. Na região de Macapá, nota-se que a climatologia do CPC e GPCP apresenta o valor acumulado anual de 2.300 e 2.700 mm, respectivamente. Comparativamente, nas áreas situadas na porção oeste e sudoeste do Amapá (Serra de Tumucumaque e região do Jari) verificam-se os mínimos de chuva anual, com valores entre 2.000 e 2.200 mm.

A Figura 2 ilustra os campos climatológicos atmosféricos e oceânicos correspondentes à média anual obtida nos últimos 30 anos (1978 a 2007). Observa-se que a região de confluência dos ventos próxima à superfície ocorre numa faixa zonal em torno da linha do Equador (Figura 2c). Coincidente com esta posição de vento convergindo em superfície, verifica-se uma região contendo águas oceânicas com TSM superiores ao valor de 27°C (Figura 2b). Essas condições favorecem a formação de nuvens convectivas sobre o Oceano Atlântico Equatorial, as quais podem se propagar em direção à Amazônia pelo escoamento de leste, ou seja, os ventos alísios. Na Figura 2a nota-se a presença de uma região com ROL contendo valores entre 235 e 240 W/m<sup>2</sup> que indica a posição da banda de nebulosidade (nuvens) associada à ZCIT. Essa posição da ZCIT ocorre sobre o Atlântico numa faixa zonal em torno de 5°N. Essa posição climatológica da ZCIT explica os máximos de chuva anual na porção norte do Amapá (Figura 1).



**Figura 1.** Mapas climatológicos da precipitação anual, em mm, com base na média de 30 anos (1978-2007).



**Figura 2.** Mapas climatológicos anuais de (a) ROL, (b) TSM e (c) Vento próximo à superfície sobre a região da Amazônia Oriental e Oceano Atlântico Tropical. A intensidade e unidade de cada variável encontra-se indicada nas barras de cores ao lado de cada figura.

### 3.2. Médias Sazonais

A natureza apresenta fenômenos climáticos ou a combinação destes em diferentes escalas de tempo e espaço, os quais podem provocar variações significativas de precipitação perdurando apenas durante alguns meses do ano, de maneira que o acumulado anual não evidencia, necessariamente, o comportamento anômalo da chuva regional. Assim sendo, convém analisar também a climatologia sob o ponto de vista do comportamento sazonal das chuvas. A Figura 3 ilustra os mapas climatológicos sazonais, ou seja, a configuração espacial da chuva climatológica para as quatro estações do ano: primavera (SON), verão (DJF), outono (MAM) e inverno (JJA). Tais valores de chuva climatológica são consistentes com os mapas climatológicos construídos em trabalhos anteriores, por exemplo, em Figueroa e Nobre (1990) e De Souza e Ambrizzi (2003). Os aspectos da variabilidade espacial da climatologia de chuva sazonal sobre o Amapá (Figura 3) são discutidos no contexto dos padrões

climatológicos da circulação atmosférica (vento nos baixos e altos níveis), convecção tropical (ROL) e TSM sobre o Oceano Atlântico (Figura 4).

Evidencia-se claramente a partir da Figura 3 que, em geral, as estações do verão e outono abrigam os meses mais chuvosos no Amapá, coincidindo com o ápice da atividade convectiva (formação de nuvens tropicais) na Amazônia Oriental, conforme análises observacionais reportadas em estudos anteriores (MARENGO *et al.*, 2001; De SOUZA *et al.*, 2004). Por outro lado, as estações de primavera e inverno caracterizam o período menos chuvoso ou seco na região.

A primavera (SON) é a estação que apresenta os mínimos de chuva climatológica no Amapá, ou seja, é o período mais seco do ano, com valores pluviométricos oscilando entre 100 e 200 mm (Figuras 3a e 3e). Neste período, SON, a banda de nebulosidade associada à ZCIT encontra-se em sua posição mais ao norte sobre o Oceano Atlântico, em torno de 10°N (Figura 4c), cuja posição é coincidente com a presença de TSM acima de 27°C (Figura 4b) e convergência dos ventos alísios (Figura 4a). Na ausência de sistemas meteorológicos de grande escala, o Amapá está sujeito basicamente à ação única de forçantes termodinâmicas, que provocam apenas pancadas de chuva de curta duração e não proporcionam grandes volumes de precipitação.

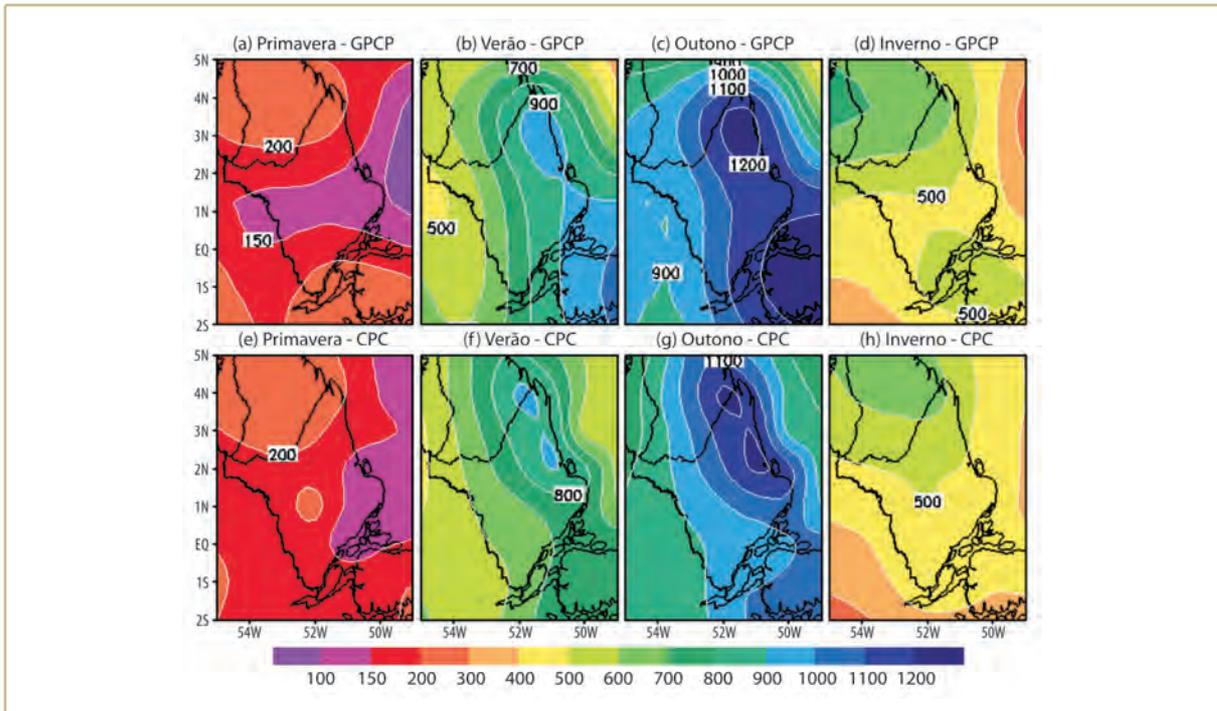
Após a primavera, deflagra-se subsequentemente o início do período chuvoso no Amapá durante os meses do verão (DJF), com o aumento significativo nos volumes de precipitação, entre 500 e 1.000 mm, em praticamente todo o Estado. As regiões contendo máximos de chuva no verão, acima de 900 mm, situam-se preferencialmente ao longo da faixa litorânea, desde Ferreira Gomes até Vila Velha, incluindo ainda a região de Oiapoque no norte Amapaense (Figuras 3b e 3f). O aumento de precipitação na região litorânea e norte do Amapá é causado primariamente pela migração sazonal da banda de nebulosidade da ZCIT sobre o Atlântico Equatorial. Neste período, muito embora do ponto de vista climatológico a ZCIT ainda não se encontre na sua posição atlântica mais austral, sua proximidade favorece o aumento da formação de aglomerados convectivos atingindo a faixa leste do Amapá, concorrendo para a elevação dos níveis pluviométricos. Em DJF, observa-se uma região contendo TSM em torno de 27,5°C englobando a área oceânica ao longo do litoral do norte/nordeste do Brasil (Figura 4b) que, associada à convergência do vento em 850 hPa (Figura 4a), nos baixos níveis da atmosfera, favorece o posicionamento de uma grande área zonal contendo baixos valores de ROL (Figura 4c), entre 220 e 240 W/m<sup>2</sup>, e indica a manifestação da ZCIT sobre o Atlântico Equatorial em torno de 5°N. Ressalta-se novamente que a posição média da ZCIT em torno de 5°N, ou seja, na altura do litoral norte do Amapá, favorece a ocorrência de chuva preferencialmente na região litorânea do Estado.

Não obstante, outra característica digna de nota nos campos climatológicos de verão (DJF) da Figura 4 é a configuração de uma grande região contendo baixos valores de ROL, abaixo de 220 W/m<sup>2</sup>, que indica a presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS caracteriza-se como uma extensa faixa meridional de convecção profunda com uma orientação noroeste/sudeste, desde o centro-sul da Amazônia até o sudeste do Brasil, cuja configuração está intimamente associada aos padrões da circulação anticiclônica (giro do vento no sentido anti-horário) da Alta da Bolívia (AB) e um

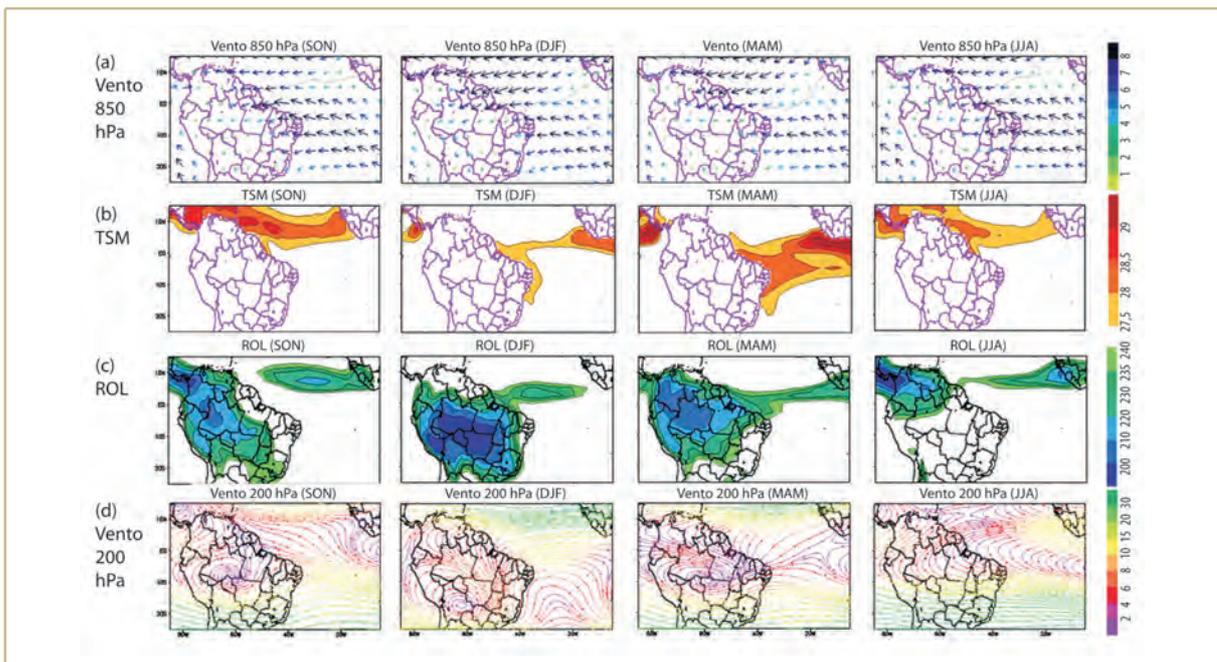
cavado (ondulação) corrente abaixo sobre o nordeste brasileiro, nos altos níveis da atmosfera (linhas de corrente em 200 hPa; Figura 4d). A ZCAS também depende do escoamento de noroeste (vento em 850 hPa; Figura 4a) transportando ar úmido e quente proveniente da Amazônia em direção ao eixo da ZCAS, a qual provoca grande quantidade de chuva na porção centro-sul da Amazônia (CARVALHO *et al.*, 2004). Em princípio, o Amapá não é afetado diretamente pela ZCAS.

A estação de outono (MAM) é sem dúvida o período mais chuvoso do ano no Estado do Amapá. Neste período, observa-se a intensificação e generalização do volume de precipitação em todo o território amapaense, com valores oscilando entre 900 e 1.200 mm (Figuras 3 c e 3 g). Essa intensificação da precipitação deve-se à atuação direta da ZCIT atingindo sua posição climatológica mais austral em março (NOBRE e SHUKLA, 1996; De SOUZA e NOBRE, 1998), sendo, portanto, o principal sistema meteorológico indutor de chuva na Amazônia Oriental durante o pico da estação chuvosa (De SOUZA e ROCHA, 2006). Os mapas climatológicos de ROL, abaixo de 240 W/m<sup>2</sup>, indicam a presença de uma grande área alinhada entre a Amazônia e o Oceano Atlântico Equatorial, indicando a posição da convecção associada à ZCIT (Figura 4c). O eixo da ZCIT situa-se em torno da faixa equatorial entre 0° e 2,5°S, coincidentemente sobre as regiões oceânicas contendo águas quentes, TSM entre 27° e 28°C (Figura 4b), confluência dos ventos alísios de nordeste e sudeste em baixos níveis (vento em 850 hPa; Figura 4a) e difluência do vento em altos níveis (linhas de corrente; Figura 4d) sobre o Oceano Atlântico Equatorial e o nordeste da Amazônia Oriental.

Subseqüentemente, os meses do inverno (JJA) caracterizam-se pela diminuição abrupta do volume de chuva no Estado. Porém, as chuvas de inverno ainda são maiores quando comparadas com as chuvas da primavera (ver Figura 4a). Os volumes pluviométricos de inverno oscilam entre 500 e 700 mm no centro-norte (regiões da Serra de Tumucumaque e de Oiapoque) e entre 400 e 500 mm nas demais regiões do Amapá (Figuras 3d e 3h). Essa diminuição nos volumes pluviométricos associa-se à migração sazonal da ZCIT de volta ao Atlântico norte, seguindo o movimento aparente do sol em direção ao Hemisfério Norte, a qual se posiciona em torno de 10°N sobre as regiões contendo convergência dos alísios em superfície (Figura 4a) e TSM mais quentes (Figura 4b).



**Figura 3.** Mapas climatológicos (30 anos: 1978-2007) da precipitação sazonal, em mm, para as estações de primavera (SON) com os dados do (a) GPCP e (e) CPC, estação do verão (DJF) com o (b) GPCP e (f) CPC, estação do outono (MAM) com o (c) GPCP e (g) CPC, e estação de inverno (JJA) com o (d) GPCP e (h) CPC.



**Figura 4.** Mapas climatológicos sazonais para as estações de primavera (SON), verão (DJF), outono (MAM) e inverno (JJA) correspondentes aos campos de: a) Vento em 850 hPa (m/s), b) TSM (°C), c) ROL (W/m<sup>2</sup>) e d) Vento em 200 hPa (m/s), com base no período 1978-2007.

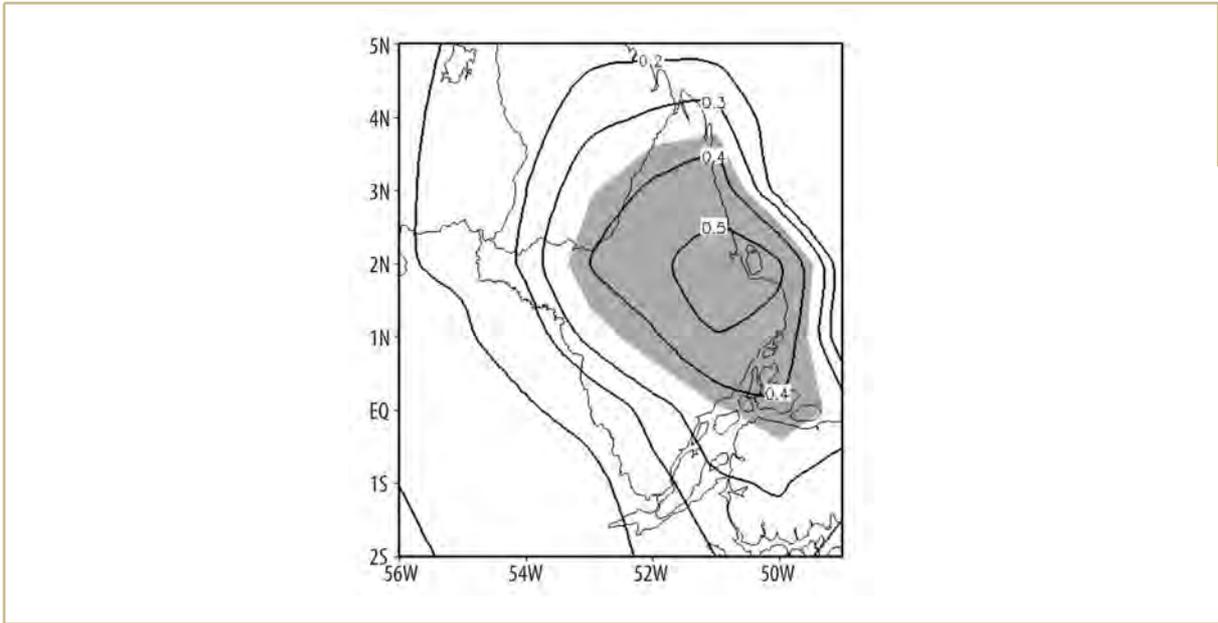
#### 4. VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO NO AMAPÁ

Nesta seção apresentam-se os resultados da análise estatística multivariada visando a investigação de qual é o modo principal de variabilidade espaço-temporal da precipitação sobre o Estado do Amapá. As Figuras 5 e 6 ilustram os resultados da decomposição em EOF aplicada nos dados das anomalias de precipitação do CPC dispostos em ponto de grade sobre o Estado do Amapá, correspondentes aos meses do período chuvoso, ou seja, de dezembro a maio (DJFMAM) entre os anos de 1978/79 até 2008/09 (num total de 31 estações chuvosas). Portanto, neste trabalho, é apresentado foco especial sobre a variabilidade pluviométrica no Amapá especificamente para o período chuvoso.

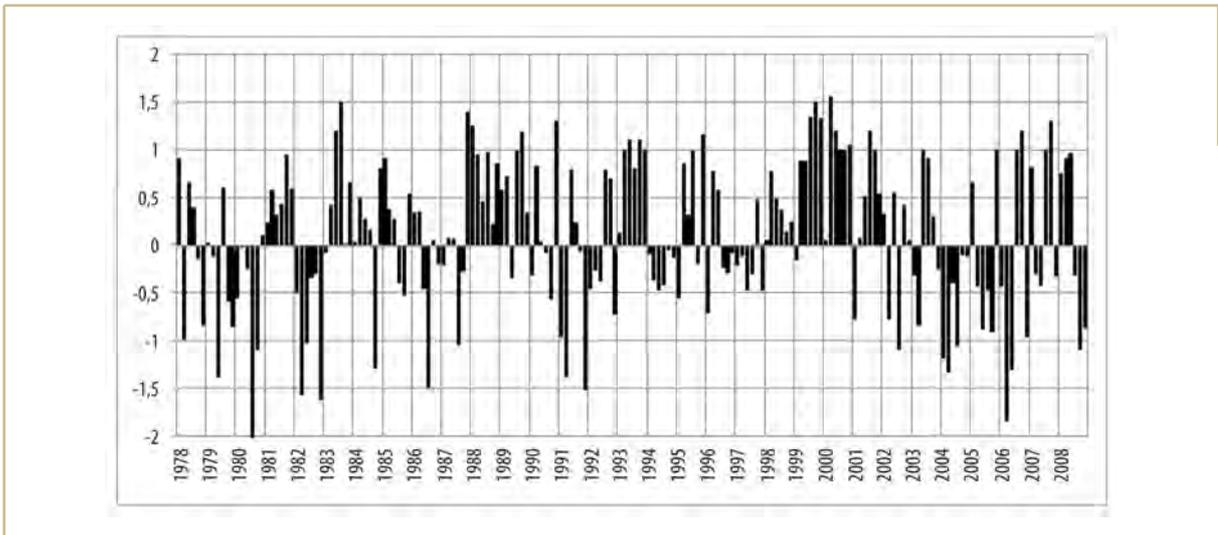
Considera-se o autovetor obtido no primeiro modo da EOF (Figura 5), como sendo o modo principal de variabilidade pluviométrica observada sobre o Amapá durante os meses do período chuvoso das últimas três décadas. A EOF1 explica 34% da variância total dos dados de precipitação, sendo que o seu autovalor encontra-se significativamente distante dos modos subsequentes, de maneira que a EOF1 representa um padrão fisicamente consistente (NORTH *et al.*, 1982). Observam-se *loadings* positivos (anomalias positivas de precipitação) englobando todo o território do Amapá, sendo que os valores máximos significantes, correlações acima de 0.35, encontram-se no setor centro-leste do Estado, particularmente nas regiões de Calçoene, Amapá, Aforema e Bailique (Figura 5).

A Figura 6 mostra a série temporal das componentes principais (CPs) correspondentes aos autovetores da EOF1. As CPs indicam como o padrão espacial da EOF1 evolui no tempo (variabilidade temporal) durante os meses da estação chuvosa, DJFMAM, entre os anos de 1978/79 e 2008/09. Os valores positivos e negativos das CPs, alternando-se durante os anos estudados, evidenciam a existência de alta variabilidade da precipitação na escala de tempo sazonal, ou seja, dentro dos meses de cada período chuvoso, assim como na escala interanual, ou seja, entre uma estação chuvosa de um ano para o outro. Valores positivos (negativos) de CPs maiores do que 1 (menores do que -1) desvio padrão representam eventos extremos com registro de chuva acima (abaixo) do normal na região do Amapá. Baseado neste critério objetivo de seleção de eventos de precipitação significativa, foram estabelecidas duas composições opostas correspondentes aos episódios com registro de chuva acima e abaixo do normal sobre o Amapá.

A análise destas composições tem como finalidade a investigação dos mecanismos climáticos de grande escala atuantes sobre as bacias tropicais dos Oceanos Pacífico e Atlântico, bem como a caracterização dos padrões dinâmicos da circulação atmosférica associada à ZCIT sobre a Amazônia Oriental. Os resultados dessas composições são discutidos na próxima seção.



**Figura 5.** Padrão espacial (*loadings*) do primeiro modo da EOF aplicada na grade das anomalias de precipitação de DJFMAM entre os anos de 1978/79 a 2008/09. Áreas cinzas indicam anomalias de chuva com 95% de significância estatística.



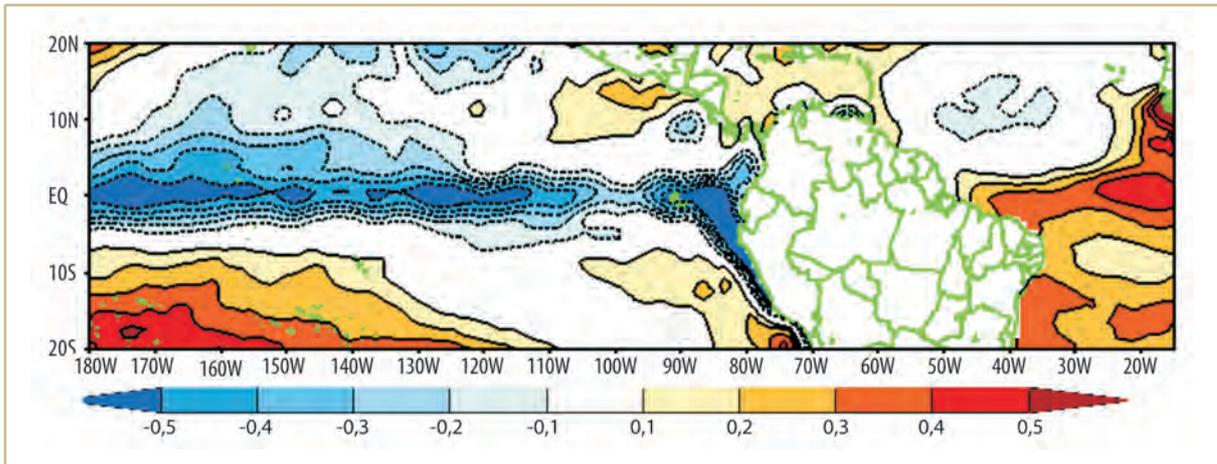
**Figura 6.** Séries temporais das CPs, em desvio padrão, associadas ao primeiro modo da EOF. As barras verticais representam os meses de DJFMAM entre os anos de 1978/79 a 2008/09.

## 5. MECANISMOS CLIMÁTICOS DO PERÍODO CHUVOSO

Nesta seção são apresentados os resultados das composições observacionais montadas para se investigar quais são os mecanismos climáticos dos Oceanos Pacífico e Atlântico que modulam os eventos de chuva acima e abaixo do normal no Estado do Amapá. Além disso, também se analisam os padrões dinâmicos da circulação atmosférica (vento em baixos e altos níveis) e da convecção tropical (nebulosidade) associados à atuação ou ausência da ZCIT sobre a Amazônia Oriental. A definição dos eventos de chuva acima e abaixo do normal no Amapá observados durante os meses do período chuvoso, DJFMAM, entre os anos de 1978/79 a 2008/09, foram selecionados objetivamente por intermédio da série temporal das CPs, conforme critério mencionado na análise da Figura 6.

### 5.1. Mecanismos climáticos modulares de chuva acima do normal no Amapá

A Figura 7 mostra a composição das anomalias de TSM observadas nos Oceanos Pacífico e Atlântico, correspondentes aos eventos de chuva acima do normal no Amapá. Verifica-se a predominância de anomalias negativas (ou seja, águas oceânicas mais frias do que o normal) cobrindo toda a porção equatorial do Pacífico. As regiões contendo anomalias de TSM mais intensas, entre  $-0,4^{\circ}$  e  $-0,5^{\circ}\text{C}$ , localizam-se no setor central (entre  $180^{\circ}$  e  $150^{\circ}\text{W}$ ) e leste (entre  $130^{\circ}$  e  $120^{\circ}\text{W}$ ) do Pacífico, incluindo também a costa oeste da América do Sul ao longo do Equador/Peru, (entre  $90^{\circ}$  e  $80^{\circ}\text{W}$ ). Essa configuração espacial de anomalias negativas de TSM relaciona-se primariamente com a fase madura dos padrões de resfriamento anômalo do fenômeno La Niña, cuja manifestação promove uma amplificação do ciclo sazonal (De SOUZA *et al.*, 2004). Por outro lado, verifica-se na bacia do Oceano Atlântico a configuração de anomalias de TSM com sinais opostos entre as bacias norte e sul. Presenciam-se anomalias positivas (ou seja, águas oceânicas mais quentes do que o normal) de TSM englobando toda a porção equatorial e sul do Atlântico, com anomalias mais intensas, entre  $0,3^{\circ}$  e  $0,4^{\circ}\text{C}$ , ao longo da faixa litorânea entre o Pará e Rio Grande do Norte, e também anomalias entre  $0,4^{\circ}$  e  $0,5^{\circ}\text{C}$ , na região próxima de  $20^{\circ}\text{W}$  e na costa da África Equatorial. No Atlântico norte, na região centrada em  $50^{\circ}$  e  $40^{\circ}\text{W}/10^{\circ}\text{N}$ , observa-se a presença de anomalias negativas de TSM, entre  $0,1^{\circ}$  e  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Essa configuração de anomalias de TSM fria ao norte e quente ao sul do Atlântico associa-se a fase negativa do Dipolo ou gradiente de anomalias de TSM em direção ao Atlântico intertropical sul (De SOUZA *et al.*, 2005).

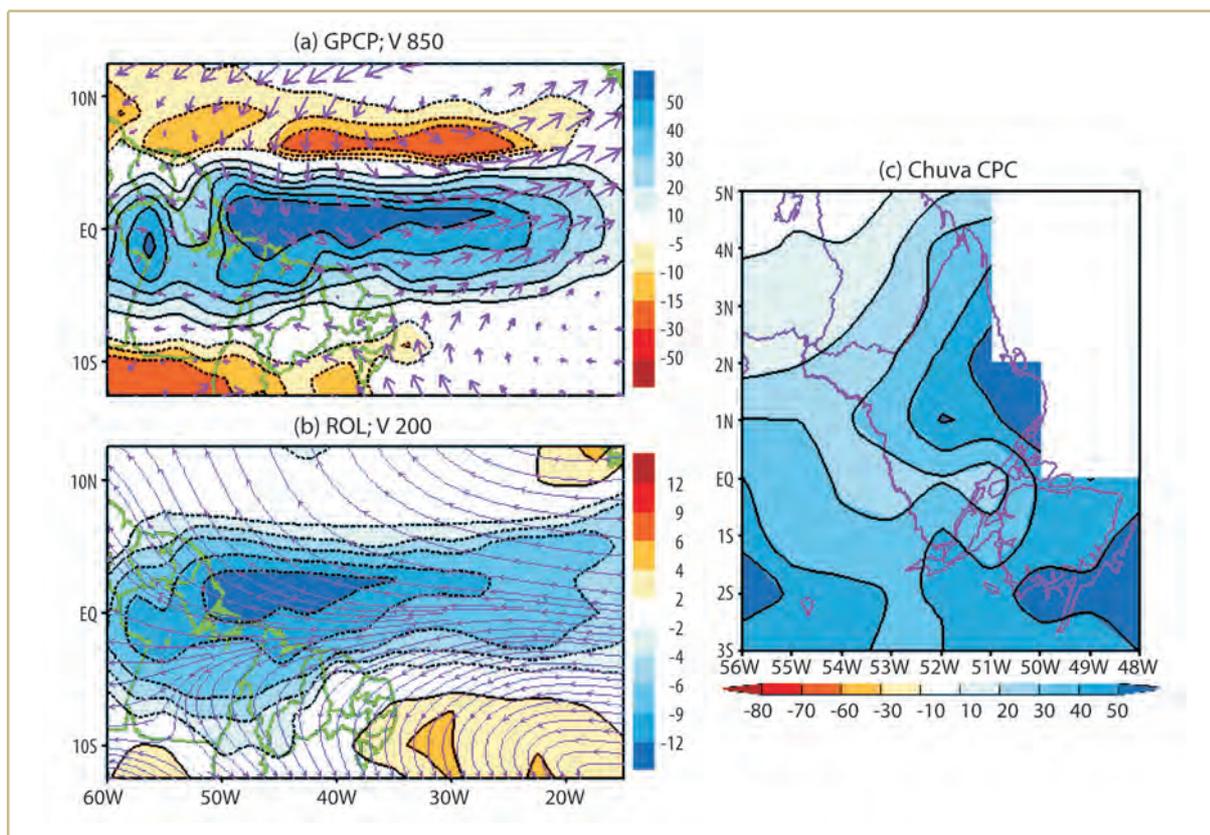


**Figura 7.** Composições das anomalias de TSM (°C) sobre o Pacífico e Atlântico tropical associadas aos eventos de chuva acima do normal no Amapá.

Nas composições da Figura 8, analisam-se os padrões dinâmicos regionais da circulação atmosférica, atividade convectiva e precipitação sobre a Amazônia Oriental e Atlântico Tropical, bem como as anomalias de chuva sobre o Amapá. Associado à presença da área de TSM anormalmente fria no Atlântico norte (Figura 7), verifica-se a presença simultânea de anomalias de vento em baixos níveis (vetores lilás na Figura 8a) soprando do quadrante nordeste, ou seja, há uma amplificação dos ventos alísios de nordeste advindos do Atlântico norte. Assim sendo, nota-se claramente que a convergência dos ventos alísios em baixos níveis ocorre numa posição deslocada mais para o Atlântico Equatorial sul, sendo que a referida área de convergência de vento é coincidente com a região contendo TSM anormalmente quente. Sabe-se que condições de vento quente e úmido convergindo em baixos níveis são os ingredientes necessários para a formação de nuvens na região tropical. Esse fato é comprovado na Figura 8b (contornos sombreados em azul), que mostra a presença de uma grande área contendo anomalias negativas de ROL, indicando a atuação de convecção tropical anormalmente realçada (nebulosidade intensificada). A grande área de ROL negativo configurando-se numa posição zonal está diretamente associada à atuação da ZCIT sobre o Atlântico Equatorial sul, influenciando a Amazônia Oriental, especialmente o Amapá e centro-leste do Pará, onde as anomalias de ROL são mais intensas, entre -9 e -12 W/m<sup>2</sup> (Figura 8b). A banda de nebulosidade convectiva associada à ZCIT induz a ocorrência de muita chuva, conforme se evidencia na Figura 8a (contornos em azul). Na Figura 8a está indicada uma grande região contendo anomalias positivas de precipitação do GPCP, cujos valores estão acima de 30mm, ocorrendo sobre o leste do Amapá e Pará. Associado à convergência de vento em baixos níveis, formação de nebulosidade da ZCIT e ocorrência de chuva, obtém-se também um padrão de vento divergente em altos níveis (Figura 8b, linhas de corrente em lilás).

O impacto da ZCIT intensificada no Atlântico Equatorial sul sobre o Amapá ocorre na predominância de anomalias positivas de precipitação (chuva acima do normal) atingindo todo o Estado. Evidencia-se o registro de chuvas mais intensas, entre 40 e 50 mm (Figura 8c), na porção centro-leste do Amapá,

particularmente na sub-bacia hidrográfica do Amapari e bacia hidrográfica complementar do Araguari, incluindo as regiões da Serra do Navio, Porto Grande, Ferreira Gomes, Aporema, Amapá e a faixa litorânea desde o Cunani até o Bailique.

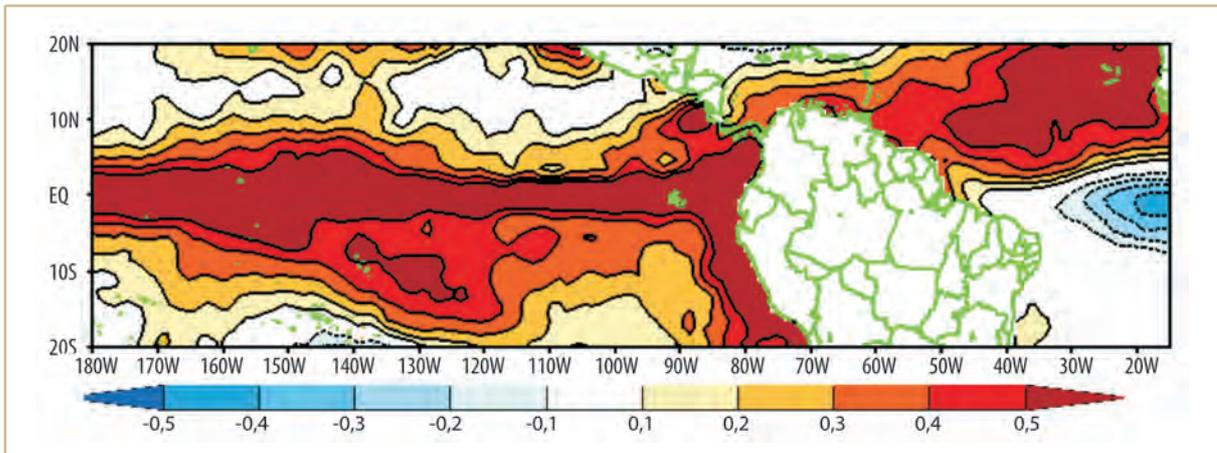


**Figura 8.** Composições de: **a)** precipitação do GPCP (contornos coloridos; mm) e vento em 850 hPa (vetores em lilás; m/s); **b)** ROL (contornos coloridos; W/m<sup>2</sup>) e vento em 200 hPa (linhas de corrente em lilás; m/s), **c)** anomalias de precipitação do CPC (contornos coloridos; mm) no extremo leste da Amazônia, correspondentes aos eventos de chuva acima do normal no Amapá.

## 5.2. Mecanismos climáticos modulares de chuva abaixo do normal no Amapá

A composição das anomalias de TSM sobre os Oceanos Pacífico e Atlântico, correspondentes aos eventos de chuva abaixo do normal no Amapá, é ilustrada na Figura 9. Sobre o Pacífico, observa-se claramente o predomínio de anomalias positivas de TSM, ou seja, águas oceânicas anormalmente quentes, com anomalias muito intensas, acima de 0,5°C (cores em vermelho escuro; Figura 9), configurando-se em praticamente toda porção tropical deste oceano. O aquecimento oceânico sobre o Pacífico associa-se primariamente ao fenômeno El Niño, o qual provoca impactos negativos significantes na chuva da Amazônia, conforme diversas análises observacionais anteriores (De SOUZA *et al.*, 2000;

entre outros). Sobre o Oceano Atlântico, observa-se novamente um padrão invertido entre as bacias norte e sul. Desta vez, uma grande área contendo anomalias positivas de TSM, acima de  $0,4^{\circ}\text{C}$ , atinge toda a bacia do Atlântico Norte, enquanto anomalias negativas de TSM, entre  $-0,1^{\circ}$  e  $-0,4^{\circ}\text{C}$ , restringem-se a uma área do Atlântico Equatorial Sul, centrada em  $20^{\circ}/30^{\circ}\text{W}$  e  $0^{\circ}/5^{\circ}\text{S}$  (contornos em azul; Figura 9). A esse padrão de TSM quente na bacia norte e frio na bacia sul, denomina-se de fase positiva do Dipolo ou gradiente de anomalias de TSM em direção ao Atlântico Intertropical norte (De SOUZA *et al.*, 2005).

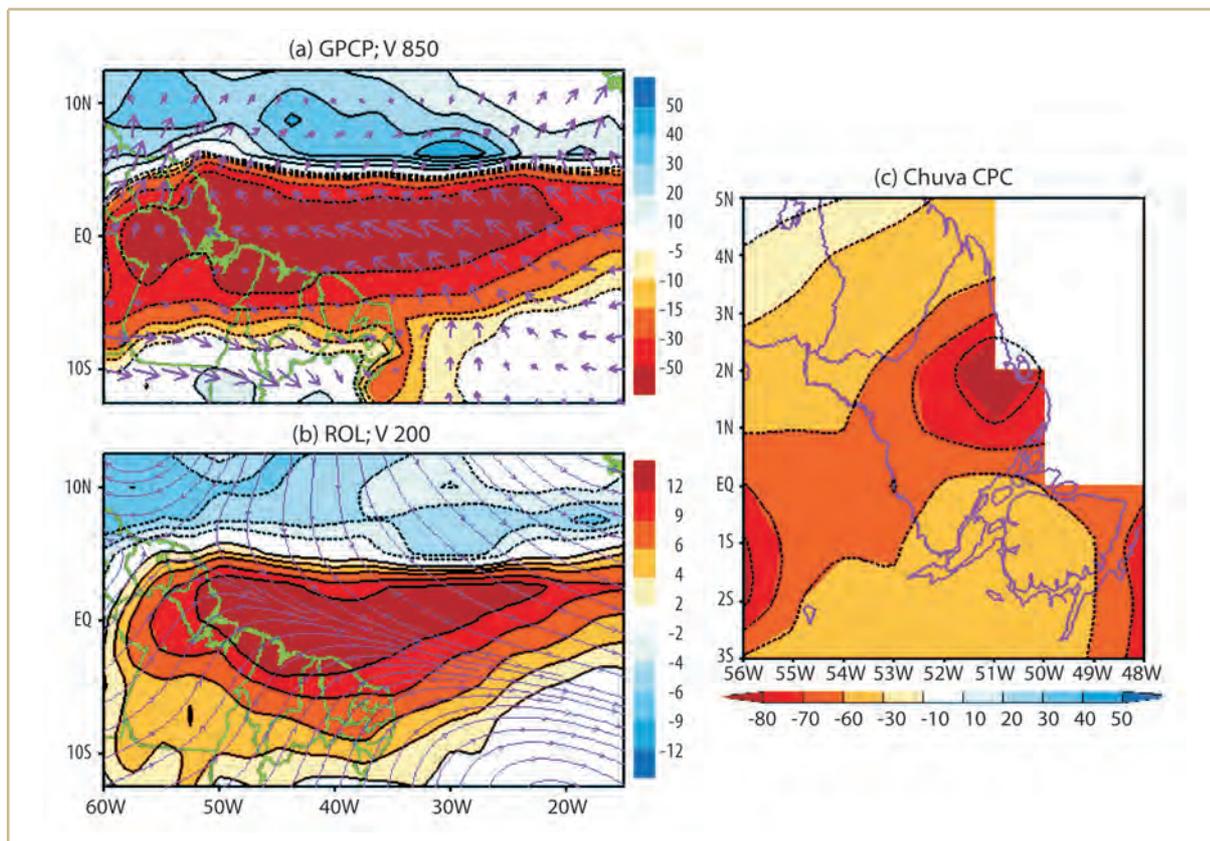


**Figura 9.** Composições das anomalias de TSM ( $^{\circ}\text{C}$ ) sobre o Pacífico e Atlântico Tropical associadas aos eventos de chuva abaixo do normal no Amapá.

Os padrões dinâmicos regionais de vento, convecção tropical e chuva na região da Amazônia/Oceano Atlântico Tropical, assim como as anomalias de precipitação sobre o Amapá, são investigados nas composições da Figura 10. Os padrões de vento em baixos níveis mostram anomalias do quadrante sudeste predominando por sobre toda a bacia equatorial sul do Atlântico (vetores em lilás; Figura 10a), indicando que os alísios de sudeste e de leste encontram-se intensificados na região. Essa intensificação dos alísios é coincidente com a mesma área de TSM anormalmente fria (Figura 9). Então, a região de confluência de vento em baixos níveis ocorre anormalmente mais para o Atlântico norte (Figura 10a), coincidente com a região contendo anomalias de TSM quentes (Figura 9). Assim sendo, os padrões de convergência de vento quente e úmido favorecem a intensificação da atividade convectiva (formação de nuvens) associada à ZCIT também deslocada para o Atlântico Norte, conforme mostra as anomalias negativas de ROL (contornos em azul; Figura 10b). Como uma consequência da formação de nuvens e da ocorrência de chuva da ZCIT estar deslocada para o Atlântico Norte, dispõe-se de uma região de subsidência (vento descendente de cima para baixo, na vertical) sobre a Amazônia e Atlântico Sul, inibindo a convecção e diminuindo a chuva na região.

Esse fato é comprovado nas composições das Figuras 10b e 10c (contornos em vermelho;) que mostram uma grande região contendo anomalias positivas de ROL (supressão de convecção tropical) e

anomalias negativas de precipitação do GPCP configurando-se num plano zonal e englobando praticamente toda a Amazônia Oriental e Atlântico Equatorial Sul. Em altos níveis, verifica-se a convergência de vento (linhas de corrente; Figura 10b). O resultado desse padrão dinâmico desfavorável é a diminuição drástica de chuva no Amapá, conforme mostra o mapa de anomalias de precipitação do CPC com o predomínio de anomalias negativas atingindo todo o Estado, sendo que o impacto negativo mais forte, anomalias entre -70 e -80 mm (contornos em vermelho; Figura 10c), ocorre no setor centro-leste do Amapá, particularmente nas regiões de Ferreira Gomes, Aporema e Amapá.



**Figura 10.** Composições de: **a)** precipitação do GPCP (contornos coloridos; mm) e vento em 850 hPa (vetores em lilás; m/s); **b)** ROL (contornos coloridos, W/m<sup>2</sup>) e vento em 200 hPa (linhas de corrente em lilás; m/s), **c)** anomalias de precipitação do CPC (contornos coloridos; mm) no extremo leste da Amazônia, correspondentes aos eventos de chuva abaixo do normal no Amapá.

## 5. CONCLUSÕES

Por meio de uma abordagem estatístico-observacional e usando bases de dados com séries históricas dos últimos 32 anos (1978 a 2009), o presente trabalho discutiu os aspectos climatológicos do regime espaço-temporal da precipitação no Estado do Amapá, bem como apresentou quais são os principais mecanismos climáticos do Pacífico a Atlântico que modulam os padrões de chuva acima e abaixo do normal no Estado.

A climatologia da precipitação no Amapá, baseada na média de 30 anos (1978-2007), demonstra que as regiões mais chuvosas localizam-se na porção norte e litoral (Oiapoque e Calçoene) com volume de chuva anual em torno de 2.900 mm, sendo que a região de Macapá apresenta volume anual de aproximadamente 2.600 mm.

Em termos sazonais, o período mais seco (chuva trimestral abaixo de 200 mm) ocorre na primavera (setembro a novembro) e o mais chuvoso (chuva trimestral acima de 1.000 mm) ocorre no outono (março a maio).

Durante o período chuvoso (dezembro a maio), o principal modo de variabilidade pluviométrica no Amapá configura-se com máximos de chuva no setor centro-leste do Estado, com alta variabilidade sazonal e interanual, conforme decomposição em EOF aplicada na grade de anomalias de chuva durante 31 estações chuvosas entre 1978/79 a 2008/09.

As análises de duas composições observacionais representativas dos eventos com regime sazonal de precipitação abaixo e acima do normal, selecionados objetivamente pelos resultados da EOF, evidenciaram dois cenários climáticos contrastantes. Os anos com registro de chuva acima do normal (anos com problemas de enchentes) no Amapá associam-se diretamente à intensificação da ZCIT sobre a Amazônia Oriental, cuja configuração relaciona-se com a atuação da La Niña sobre o Oceano Pacífico Tropical, ocorrendo concomitantemente com a fase do Dipolo negativo, ou seja, anomalias de TSM frias na bacia norte e quentes na bacia sul do Oceano Atlântico intertropical. Inversamente, os anos com observação de chuva abaixo do normal (anos com problemas de secas) no Estado do Amapá associam-se diretamente com a inibição da banda de nebulosidade da ZCIT sobre a Amazônia Oriental, devido à manifestação do fenômeno El Niño sobre o Oceano Pacífico Tropical que ocorre simultaneamente com a fase do Dipolo positivo, isto é, anomalias de TSM quentes na bacia norte e frias na bacia sul do Oceano Atlântico intertropical.

## 6. AGRADECIMENTOS

A FINEP/MCT pelo financiamento dos projetos RPCH (Pará), REMETAP (Amapá) e SUDAM/NHMET-IEPA. Ao CNPq pela bolsa PQ-Nível 2 (processo 305390/2007-4) e financiamento do projeto LABCLIMA (processo 570113/2008-3).

## 7. REFERÊNCIAS

- ADLER, R.F. *et al.* The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). *Journal of Hydrometeorology*, v.4, 2003. p.1147-1167.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: Persistence, Form, Extreme Precipitation and Relationships with Intraseasonal Activity. *Journal of Climate*, v. 17, 2004. p. 88-108.
- DE SOUZA, E.B.; NOBRE, P. Uma revisão sobre o Padrão de Dipolo no Oceano Atlântico tropical. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 13(1), 1998. p. 31-44.
- DE SOUZA, E.B.; KAYANO, M.T.; TOTA, J.; PEZZI, L.; FISCH, G.; NOBRE, C. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. *Acta Amazônica*, v. 30, 2000. p. 305-318.
- DE SOUZA, E. B., T. AMBRIZZI. Pentad precipitation climatology over Brazil and the associated atmospheric mechanisms. *Climanálise*, v. 1, 2003.
- DE SOUZA; E.B.; KAYANO, M.T.; AMBRIZZI, T. The regional precipitation over the eastern Amazon/northeast Brazil modulated by tropical pacific and Atlantic SST anomalies on weekly timescale. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 19(2), 2004. p. 113-122.
- DE SOUZA, E.B, KAYANO MT, AMBRIZZI T. Intraseasonal and submonthly variability over the eastern Amazon and Northeast Brazil during the autumn rainy season. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 81, p. 177-191, 2005.
- DE SOUZA, E.B., E.J.P. ROCHA. Diurnal variations of rainfall in Bragança-PA (eastern Amazon) during rainy season: mean characteristics and extreme events. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21(3a), 2006. p. 142-152.
- FIGUEROA, S. N.; NOBRE, C. A. Precipitation distribution over central and western tropical South America. *Climanálise*, v.5, p. 36-45. 1990.
- HASTENRATH, S., HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 103, 1977. p. 77-92.
- HUFFMAN, G. J. *et al.* The GPCP combined precipitation data set. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.78, n.1, 1997. p.5-20.
- KALNAY, E. *et al.* The NCEP/NCAR reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 77, 1996. p. 437-471.
- KUTZBACH, J. E. Empirical eigenvectors of SLP, surface temperature and precipitation complex over North America. *Journal of Applied Meteorology*, v. 6, 1967. p. 791-801.
- LIEBMANN, B., SMITH, C.A. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 77, 1996. p. 1275-1277.
- MARENGO, J. A. *et al.* Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. *Journal of Climate*, v.14, 2001. p. 833-852.

- MOURA, A. D., SHUKLA, J. On the dynamics of the droughts in Northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulations model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 38, 1981. p. 2653-2673.
- NOBRE, P.; SHUKLA, J. Variations of SST, wind stress and rainfall over the tropical Atlantic and South America. *Journal of Climate*, v. 9, 1996. p. 2464-2479.
- NORTH, G.R. et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Monthly Weather Review*, v. 110, 1982. p. 699-706.
- REYNOLDS, R. W. et al. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, v. 15, 2002. p. 1609-1625.
- SILVA, V. B. S. et al. An improved gridded historical daily precipitation analysis for Brazil. *Journal of Hydrometeorology*, v. 8, 2007. p. 847-861.
- TRENBERTH, K. E. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, n. 12, 1997. p. 2771-2777.



## Impactos Socioeconômicos Associados às Enchentes de 2000 e 2006 no Município de Laranjal do Jari (AP)

**Alzira Marques Oliveira**

alzira.marques@iepa.ap.gov.br

Graduada em Ciências Sociais. Ex-bolsista IC/CNPq do Projeto Remetap.  
Bolsista CAPES e Mestranda em Direito Ambiental e Políticas Públicas pelo PPGDAPP/UNIFAP.  
Universidade Federal do Amapá – PPGDAPP/UNIFAP.

**Dr. Eng. Alan Cavalcanti da Cunha**

alancunha@unifap.br

Ex-coordenador do NHMET/IEPA, Coordenador do Projeto REMETAP,  
Prof. do Curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP) e PPGBio/PPGDAPP-UNIFAP.

**Resumo.** *O presente estudo analisa os impactos sociais e econômicos associados a dois eventos hidrológicos extremos ocorridos em 2000 e 2006 na bacia do rio Jari (AP). Os eventos foram avaliados segundo as ações de mitigação de danos empreendidas pelos governos federal, estadual e municipal. O objetivo geral da pesquisa é identificar medidas destinadas a prevenir e atenuar os efeitos de eventos hidroclimáticos extremos e suas repercussões socioeconômicas locais, mormente analisando o investimento financeiro-econômico em prevenção e custos de mitigação, tendo como pano de fundo a localização geográfica e a vulnerabilidade socioambiental da população do referido município. Neste sentido, uma revisão da literatura é elaborada para analisar alguns conceitos sobre risco social na atualidade, na qual se confrontam os eventos climáticos adversos e os riscos sociais concernentes. A metodologia de investigação consiste no uso de dados e informações oficiais obtidos a partir de relatórios dos serviços das administrações públicas no Estado do Amapá e do Governo Federal, bem como a análise de resposta, resgate, salvamento e assistência social para os desalojados e desabrigados resultantes dos referidos eventos hidroclimáticos. Os dados de relatórios de avaliação de danos (AVADAN) são obrigatoriamente informados à Secretaria Nacional de Defesa Civil do Ministério da Integração Nacional. Como conclusão, as políticas de prevenção da Defesa Civil do Estado do Amapá e do Município de Laranjal do Jari têm tido dificuldades devido ao caráter reativo junto às calamidades públicas causadas pelos referidos eventos hidroclimáticos extremos, muito provavelmente em função do complexo e desconhecido comportamento dos processos hidrometeorológicos que ocorrem naquela bacia hidrográfica, atualmente pouco estudada e monitorada. Por outro lado, a mitigação de riscos de novos eventos extremos deve estar associada ao comportamento da variabilidade hidroclimática na bacia hidrográfica, mas principalmente ao grau de vulnerabilidade social na cidade de Laranjal do Jari e menos da ação da defesa civil. Neste sentido, há necessidade de empreender políticas públicas específicas mais efetivas e adaptadas à realidade local para mitigar efeitos futuros negativos desta natureza, o que demandaria a criação ou fortalecimento de um sistema integrado de informações, a partir do qual seriam implementadas e incentivadas estratégias voltadas mais efetivamente em prevenção do que às medidas reativas junto aos eventos extremos.*

**Palavras-chave:** *Bacia do rio Jari(AP), Eventos Extremos, Enchentes, Mitigação de Impactos Socioeconômicos, Riscos Sociais.*

# 1. INTRODUÇÃO

Anualmente os desastres naturais provocam a morte de milhares de pessoas e prejuízos de bilhões de dólares, desestabilizando a vida de milhões de vítimas, agravando disparidades sociais e econômicas. Normalmente os desastres ocorrem por inúmeras razões: elevadas taxas de crescimento populacional e aumento da densidade demográfica, migração, ocupação desordenada, degradação ambiental e possivelmente fenômenos causados pelas mudanças do clima global.

Na medida em que se expande o processo de urbanização desordenada, também se intensifica a preocupação com os impactos causados pelos os desastres naturais sobre a sociedade, os quais podem causar diferentes danos à qualidade de vida humana. Dentre os danos mais temíveis encontram-se os elevados números de mortes e feridos, altos índices de doenças, número de desabrigados, perdas econômicas, impactos no meio ambiente etc.

Os danos causados por eventos naturais extremos são verificados principalmente em localidades onde se encontram populações vulneráveis a essas ameaças, como cidades ribeirinhas sem infraestrutura adequada. As classes sociais menos favorecidas economicamente estão naturalmente mais sujeitas a sofrer os impactos de desastres naturais, vez que dispõem de menos recursos e capacidade para lidar com eles ou evitá-los.

Segundo a ONU (1999), no período de 1997 à 1998, o fenômeno El Niño afetou quase todas as regiões do mundo causando impactos socioeconômicos globais. Mais de 24 mil pessoas morreram devido a ventos fortes, inundações ou ressacas que ocorreram durante tempestades intensas e mais de 110 milhões de pessoas foram afetadas, além de mais de seis milhões deslocadas. As perdas e os riscos econômicos superaram a cifra de US\$ 34 bilhões (EWING *et al.*, 2005; VENKATRAN *et al.*, 2007 e WILBY *et al.*, 2006).

BBC BRASIL *apud* Kobiyama (2003) relata que o Brasil é o país do continente americano com o maior número de pessoas afetadas por desastres naturais. Os dados de números de perda de vidas humanas, registrados pelo *Emergency Disasters Data Base* (EM-DAT, 2006), bem com os dados de série temporal sobre a população brasileira obtida do IBGE (2004) e Kobiyama *et al.* (2004), indicam que no Brasil os casos de mortes humanas ocasionadas pelos desastres naturais vêm reduzindo, apesar do aumento da população. Isto se deve à presença efetiva de ações preventivas em diversos setores da sociedade brasileira, principalmente associadas à defesa civil. Por outro lado, Souza *et al.* (2005) menciona que em 2005 a Amazônia sofreu a pior estiagem dos últimos 100 anos. Registros de fotografias dos efeitos devastadores sobre as bacias hidrográficas e biodiversidade aquática foram estampadas na mídia em geral, dando uma ideia real de possíveis cenários desoladores na região que detém mais de 20% da água doce do planeta.

Os eventos extremos da natureza já atingem nas últimas décadas mais de 250 mil pessoas só nos Estados do Amazonas e Pará. Segundo Carvalho *et al.* (2006) desde o ano de 2000 o Estado do Amapá,

vem passando por situação crítica devido a ocorrência de fenômenos meteorológicos extremos, ocasionando sérios problemas.

Enchentes, fortes chuvas, descargas elétricas, queimadas, passagens de tromba d'água e fortes ventanias são registros cada vez mais comuns de eventos ocorridos no Estado que causam prejuízos à sociedade amapaense (CARVALHO, 2006; CUNHA *et al.*, 2007; FEITOSA *et al.*, 2006).

Dentre os eventos mais relevantes, os que apresentaram mais alto grau de gravidade foram os que ocorreram nos anos de 2000 e 2006 na cidade de Laranjal do Jari, com duas grandes enchentes de grande proporção.

Diante da importância do contexto mundial de mudanças globais do clima, além destes eventos citados cada vez mais notórios, o presente trabalho tem como objetivo analisar o perfil dos danos econômicos associados às ações de mitigação empreendidas pelos governos federal, estadual e municipal. As ações consideradas foram as de atendimento em socorro das vítimas do município de Laranjal do Jari durante ambos os eventos citados anteriormente.

Como pano de fundo da análise, é aprofundada a discussão sobre alguns dos mecanismos e dispositivos de prevenção e mitigação oriundos dos efeitos adversos de eventos extremos. Entretanto, inicialmente são debatidos alguns dos temas mais fundamentais relacionados à vulnerabilidade da população relacionada à sociedade de risco atual.

Segundo Valle e Lage (2003) a conscientização da sociedade para questões ambientais tem sido despertada pela ocorrência de alguns desastres ecológicos (sociológicos, econômicos etc.) que deixaram marcas, muitas ainda visíveis e até permanentes [...] e a cada desastre que se noticia têm correspondido, entretanto, lições e processos de aprendizado que, quando absorvidos, podem evitar sua repetição no futuro.

### **1.1. A sociedade de risco**

A constatação de que vivemos em uma sociedade de risco, em um mundo de ameaças resultantes da modernização e do progresso não é nova. Há algumas décadas esse assunto tem sido objeto de discussão em vários campos do conhecimento. Sabe-se que não se trata unicamente de reconhecer que fenômenos como mudanças climáticas ou desastres ecológicos representam riscos globais e ameaças à destruição da vida no planeta, mas sim de compreender que vivemos em uma conjuntura na qual a sociedade se reconhece como causadora dos riscos que a afetam. E, por isso mesmo, clama pelo controle das ameaças criadas por ela própria (WILBY *et al.*, 2006; THONON, 2007; RENN, 2007; KOBAYAMA *et al.*, 2005; KLINKE e RENN, 1997; JENKIN, 2007; IPCC, 2007; GIDDENS, 1991; FEITOSA *et al.*, 2006; BECK, 1999, BECK, 2006, EWING *et al.*, 2005, entre outros).

Partimos do princípio de que se faz necessária a correta definição do assunto abordado e, para dar conta disso, organizamos um texto que representa uma síntese da leitura dos autores supracitados e que, de forma diferenciada, acercaram-se do assunto.

Os processos de produção globalizados distribuem os efeitos negativos do processo industrial. Muitos países oferecem menos restrições à instalação de unidades produtivas, que geram mais impactos ambientais do que se fossem localizadas em outros países em que esse processo fosse mais restritivo legalmente. Esses fatos aumentam os riscos para a população local. Além disso, a acumulação de detritos em escala global gera problemas até para quem não usufrui do consumo de bens, como registram os recentes relatórios do Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007).

Apesar de imersa nos riscos, a sociedade gerou uma capacidade de reflexão sobre si mesma que pode alterar este cenário, como discutido em IPCC (2007). A reflexividade é uma condição presente que leva a pensar sobre o estilo de vida, seus riscos, efeitos e consequências à população.

Segundo Giddens (1991) a reflexividade permite que reconheçamos as “incertezas manufaturadas” ou as incertezas criadas pelo próprio desenvolvimento da ciência e da tecnologia. Com o advento da modernidade, a reflexividade assume um caráter diferente. Ela é introduzida na própria base de reprodução do sistema. A reflexividade da vida social moderna consiste no fato de que as práticas sociais são constantemente examinadas e reformadas à luz de informação renovada sobre estas próprias práticas, alterando assim constitutivamente seu caráter (GIDDENS, 1991; NOVEMBER, 2002, RENN, 2003; RENN, 2007).

Nessa época de incertezas, nos defrontamos com a manufatura de riscos. O risco manufaturado é resultado da intervenção humana na natureza e nas condições da vida social. As incertezas (e as oportunidades) que ele cria são amplamente novas. Elas não podem ser tratadas como remédios antigos; tampouco respondem à receita do Iluminismo: mais conhecimento, mais controle. (GIDDENS, 1994).

Os riscos são então criados por formas normativas sancionadas de atividades – como no caso dos jogos de azar ou esportes. Os mercados de investimentos representam facilmente o exemplo mais proeminente da vida social moderna. Todas as firmas de negócios [...] e todos os investidores, operam num ambiente em que cada um tem de prever os lances dos outros no sentido de maximizar os lucros. As incertezas envolvidas nas decisões de investimentos derivam em parte das dificuldades de antecipar eventos extrínsecos, tais como inovações tecnológicas (ou eventos extremos), mas fazem também parte da natureza dos próprios mercados (GIDDENS, 1994).

Beck (2006), em análise semelhante, afirma que os riscos foram apropriados para a reprodução do capital, seja por meio de seguros, seja pela produção de artefatos para a prevenção de ações de risco ou de perigo. O autor identifica nesse processo de desenvolvimento “uma nova forma de capitalismo, uma nova forma de economia, uma nova forma de ordem global, uma nova forma de sociedade e uma nova forma de vida pessoal” (BECK, 1999).

Trata-se de uma sociedade na qual a produção social de riquezas é acompanhada sistematicamente pela produção social de riscos (BECK, 2006). Isso se explica uma vez que as tecnologias desenvolvidas na contemporaneidade têm acarretado o esgotamento dos recursos naturais renováveis e não renováveis e também gerado substâncias nocivas que poluem o solo, a água, o ar, que alteram e contaminam os lençóis freáticos e põem em perigo a vida na Terra em todas as suas formas de manifestação.

Os riscos produzidos nessa fase da modernização, afirma Beck (2006), não respeitam as fronteiras dos Estados nacionais e não são específicos de uma classe social, razão pela qual essa é uma “sociedade catastrófica”, caracterizada por uma carência: a impossibilidade de prever externamente as situações de perigo. Assim é uma sociedade que dissemina as ameaças por todas as classes sociais, na qual a produção industrial acompanha um universalismo dos perigos, independente do lugar de sua produção.

No entanto, afirmam Beck (2006) e Veyret (2007), os riscos parecem fortalecer a sociedade de classes, pois os ricos podem tentar evitar os riscos mediante a escolha de um lugar onde morar, um meio de se alimentar e de obter mais rapidamente a informação, além de poderem também “comprar” a segurança e a liberdade.

Já as classes populares, com menor poder aquisitivo, apresentam menos possibilidades de escolhas e sujeitam-se a morar próximo das zonas de perigo, como as áreas industriais, locais com menor potencial de infraestrutura, zonas próximas das margens perigosas dos rios e, com isso, ficam mais expostas aos efeitos de eventos extremos naturais ou às substâncias nocivas do ar, da água e do solo causados pelos efeitos em cascata, tão deletérios da produção. São justamente essas últimas que têm maiores dificuldades de acesso à informação. Conclui Beck (2006) que a miséria é hierárquica e a poluição e seus efeitos é democrática. Isso faz com que a sociedade de riscos seja diferente da sociedade de classes, uma vez que seus perigos se distribuem em todas as direções e não respeitam as fronteiras dos Estados, ainda que afetem de modo distinto as classes sociais.

A convivência com os riscos não implica na sua compreensão pelo grande público. A análise do fenômeno ainda se faz no restrito mundo acadêmico. Segundo Beck (2006) muitos dos novos riscos (contaminações nucleares ou químicas, substâncias nocivas nos alimentos, enfermidades civilizatórias) fogem por completo à percepção humana imediata. Esse mesmo fato pode ser traduzido pelos riscos e perigos associados aos eventos extremos (IPCC, 2007).

Ao centro passam cada vez mais os perigos, que muitas vezes não são visíveis nem perceptíveis para os afetados. Perigos que, em certos casos, não se ativam durante a vida dos afetados, mas têm consequências nas de seus descendentes. Trata-se, em todo o caso, de perigos que precisam dos “órgãos perceptivos” da ciência (teorias, experimentos, instrumentos de medição) para se fazerem visíveis e interpretáveis como perigos (BECK, 2006, IPCC, 2007).

Na medida em que são adquiridos novos conhecimentos sobre o meio ambiente, surgem questionamentos sobre sua crescente deterioração e as consequências negativas provenientes, bem como sobre o papel fundamental da humanidade nesse processo. Segundo Garcia-Tornel (1997) os estudos sobre as mudanças climáticas globais têm contribuído para o nascimento de uma nova “consciência ambiental” que poderá iniciar um movimento em torno de uma nova ética, pois a realidade socioambiental demanda muito mais do que a gestão dos recursos naturais. O referido autor compreende que a reflexividade da sociedade de risco aponta para uma necessária revisão do padrão de consumo e apropriação dos recursos naturais.

Garcia-Tornel (1997) ressalta que o ambiente físico apresenta, em sua essência, uma dinâmica de mudanças e transformações e, dessa maneira, os riscos e as incertezas sempre estiveram e estarão presentes na história da humanidade e do planeta. Considerando que as transformações fazem parte da dinâmica do meio físico, poderíamos entender que a humanidade vivencia esse processo e também se transforma. Para o referido autor, os acontecimentos naturais não podem ser considerados excepcionais, pois são coerentes com a dinâmica do planeta. Por outro lado, a permanente expansão da ocupação humana seguida de instalações materiais tem aumentado continuamente os espaços de riscos. Assim, a abordagem dessa questão deve ser pensada considerando a capacidade da atividade humana e suas escolhas na ocupação do território, lembrando ainda que a ocupação diferenciada desse território implica na exposição também diferenciada de grupos humanos à situações de vulnerabilidade.

Nesta perspectiva, é evidenciado que a percepção do risco também representa um componente decisivo na estruturação de respostas ao perigo, influenciando vários aspectos da vida individual e coletiva. Este é o caso das enchentes ocorridas em Laranjal do Jari em 2000 e 2006 que iremos analisar em seguida.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos do relatório geral sobre os serviços prestados pelo Governo do Estado do Amapá e Governo Federal (Figura 1) nas ações de resposta, resgate, salvamento e assistência social aos desalojados e desabrigados às inundações do rio Jari em 2000 e 2006.

A quantificação dos valores econômicos utilizados para atender a situação de calamidade pública e posteriormente à análise do valor para reconstrução do local afetado foram analisados em termos econômico-financeiros.

Para atender ao município de Laranjal do Jari, o Governo do Estado envolveu em torno de 11 secretarias aliadas aos trabalhos da Secretaria Nacional de Defesa Civil (Governo Federal). Neste sentido foram abordados os mecanismos que nortearam as ações de defesa civil do Estado e do município. A Coordenadoria Estadual de Defesa Civil, por meio de um trabalho aliado dos demais órgãos do Governo, pode desenvolver as ações de resgate, socorro e principalmente assistência à população afetada.

SISTEMA NACIONAL DE DEFESA CIVIL-SINDEC							
		<b>AVALIAÇÃO DE DANOS</b>					
1-Tipificação				2-Data de Ocorrência			
Código	Denominação			Dia	Mês	Ano	Horário
NE HIG	12.301	INUNDAÇÃO GRADUAL		16	05	06	XX
3-Localização							
UF	AMAPÁ	Município	LARANJAL DO JARI				
4-Área Afetada							
Tipo de Ocupação	Não existe/ Não afetada	Urbana	Rural	Urbana e Rural			
Residencial	0	0	0	0			
Comercial	0	0	0	0			
Industrial	0	0	0	0			
Agrícola	0	0	0	0			
Pecuária (Piscicultura)	0	0	0	0			
Extrativismo Vegetal	0	0	0	0			
Reserva Florestal ou APA	0	0	0	0			
Mineração	0	0	0	0			
Turismo e outras	0	0	0	0			
Descrição da Área Afetada							
ÁREA URBANA: BAIRROS - NOVA ESPERANÇA, PIÇARREIRA, MIRILANDIA, SAMAUMA, MALVINAS, CENTRO COMERCIAL, SANTARÉM, SAGRADO CORAÇÃO DE JESUS, AVENIDA JOSÉ CEZÁRIO; ÁREA RURAL: COMUNIDADE SOMBRA DA MATA - SÍTIO SÃO TOMÉ.							

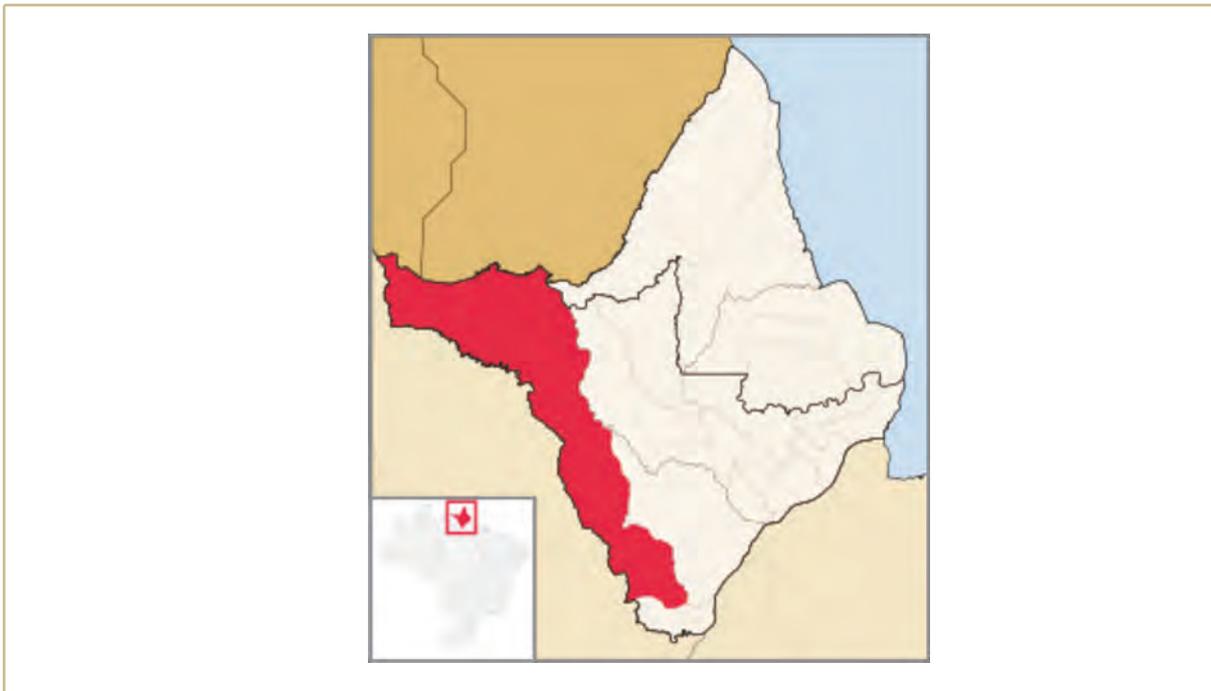
**Figura 1.** AVADAN referente à enchente de 2006. Fonte: CEDEC-AP.

A Figura 1 mostra como são organizados e tabulados os dados utilizados e analisados para compor o relatório de avaliação de danos (AVADAN). Estes dados e informações são notificados à Secretaria Nacional de Defesa Civil do Ministério da Integração Nacional.

### a. Área de Estudo

A área atingida pelas inundações é próxima da capital do município homônimo no sul do Estado do Amapá chamado Laranjal do Jari (Figura 2). O município foi criado em 17 de dezembro de 1987, tendo suas origens ligadas a episódios da história de colonização da região do rio Jari e às influências socioeconômicas decorrentes da implantação e funcionamento do Projeto Jari Florestal (de significativa intensidade no uso dos recursos naturais e uso e ocupação do solo).

A população estimada em 2005 era de 35.872 habitantes e a área em cerca de 29.699 km<sup>2</sup>, o que resulta numa densidade demográfica média de 1,21 hab/km<sup>2</sup>. Seus limites são Vitória do Jari e Mazagão a norte, Gurupá (PA) a leste e Almeirim (PA) a sul e oeste. (IBGE, 2006)



**Figura 2.** Mapa do Estado do Amapá, com destaque em vermelho ao município de Laranjal do Jari e em azul a capital municipal de Laranjal do Jari sob a coordenadas geográficas, Latitude:  $0^{\circ} 50' 31''$  S e Longitude:  $52^{\circ} 30' 57''$  W (IBGE, 2006).

De acordo com a Figura 2, a localização da cidade de Laranjal do Jari apresenta um certo nível de vulnerabilidade em decorrência da geomorfologia do rio, características físicas da bacia, declividade média relativamente acentuada à montante, sinuosidade do canal e uso e ocupação inadequados do solo (urbanização), além da característica de significativa variabilidade climática na bacia, o que potencializa a cada quatro ou seis anos, eventos com características semelhantes aos ocorridos em 2000 e 2006 (CUNHA, 2008, SOUZA *et al.*, 2009).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inúmeras relações entre a sociedade e a natureza podem ser compreendidas pela análise dos problemas sociais e econômicos tipicamente urbanos do município de Laranjal do Jari. Neste aspecto, é necessário uma melhor compreensão das complexas interações espaciais entre os riscos de qualquer natureza e os fatores ou agentes estruturadores do território.

A noção de risco é frequentemente tratada como um produto da probabilidade de ocorrência de um fenômeno natural indutor de acidentes pelas possíveis consequências que serão geradas (perdas econômicas ou sociais) em uma dada comunidade (IPCC, 2007).

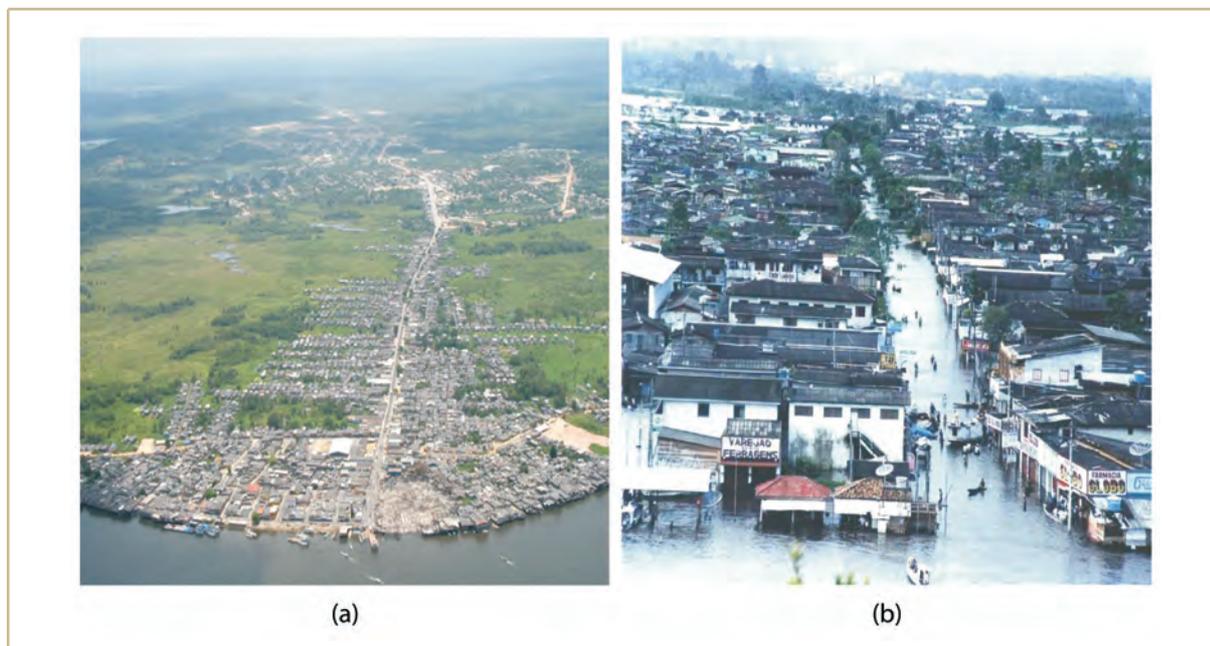
Para subsidiar essa análise, faz-se necessário também a realização de uma análise crítica sobre os conceitos que caracterizem de forma mais segura a situação de risco em que vive atualmente a sociedade moderna de acordo com a concepção mais sociológica (BECK, 2006; JENKIN 2007, KOBAYAMA *et al.*, 2006).

Segundo Valle e Lage (2003) há várias técnicas de análise de risco, mas é preciso saber escolher qual a mais adequada para cada situação. No presente caso, uma das primeiras ferramentas que podem ser aplicadas em casos de enchentes é a Análise Preliminar de Risco (APR), muito utilizada para evitar acidentes em indústrias químicas. Apesar de existirem diferentes modelos de APR, as principais características recomendadas são: a) deve permitir uma visão ampla da situação em avaliação; b) deve permitir o trabalho em equipe; c) deve conter a relação de todos os perigos existentes, o cenário de cada um desses perigos (área, proximidade de aglomerados populacionais etc.), o impacto previsto caso o perigo se transforme em problema em uma área determinada, a relação de medidas já tomadas para evitar o problema ou para reduzir o seu impacto, os pontos ainda vulneráveis ou críticos não resolvidos etc.

### **3.1. As enchentes no município de Laranjal do Jari (AP): estudo de caso**

O estudo de caso seguinte avaliou as consequências econômicas e sociais decorrentes das enchentes no município de Laranjal do Jari que ocorreram nos primeiros semestres dos anos de 2000 e 2006, relacionados ao nível de precipitação de chuvas nas cabeceiras do rio Jari (SOUZA *et al.*, 2009). A Figura 2 apresenta duas fotografias aéreas nas quais se compara a cidade de Laranjal do Jari antes e depois da enchente de 2006.

Considerando a intensidade do desastre, ao comparar os recursos orçamentários e financeiros do município de Laranjal do Jari associada com o grau de vulnerabilidade do cenário e o nível de preparação local da Defesa Civil, os desastres foram considerados pela CEDEC-AP como de **muito grande porte, nível IV** em 2000 (AVADAN, 2000) e **nível III, grande porte** em 2006.



**Figura 3.** Enchente no município de Laranjal do Jari causada por elevadas precipitações pluviométricas nas cabeceiras do rio homônimo (nas proximidades de Serra do Tumucumaque). Na fotografia (a) o município em dias de normalidade e na fotografia (b) durante o período de inundação de 2000 (Fonte: Pesquisa de campo).

Os prejuízos econômicos decorrentes dessas inundações colocam no centro do debate as iniciativas que visam reduzir os danos sociais e econômicos nos centros urbanos (Figura 3). Mas, segundo a Defesa Civil do Estado do Amapá, a intensidade do desastre é medida em função dos danos humanos, materiais e ambientais aliados aos prejuízos sociais e econômicos causados à sociedade (Tabela 1).

**Tabela 1.** Características do evento e repercussão social em 2000 e 2006 no município de Laranjal do Jari (AP).

Ano	Evento	Nível do rio (m)		duração (dias)	Prejuízos		Prejuízos Socioeconômicos
		Normal	Observado		Econômicos (R\$)	Sociais (R\$)	
2000	Inundação no rio Jari	+/- 1,07	+/- 4,0	50	7,6 milhões	4,2 milhões	12.983 desalojados, 6.384 desabrigados, 3.978 pessoas levemente feridas, 111 gravemente feridos e 2.407 pessoas enfermas e 01 morte.
2006	Inundação no rio Jari	+/- 1,07	+/- 3,4	8	905 mil	675,3 mil	655 desalojados e 285 desabrigados
TOTAL					8,5 milhões	4,8 milhões	Valoração de Danos Totais

Fonte: Adaptado de AVADAN (2000), SEDEC(AP).

Ao analisar detalhadamente a Tabela 1, observa-se que o evento de 2000 foi muito mais grave, tanto em função da cota do nível d'água mais elevada quanto devido ao tempo de permanência do nível

por 50 dias. A repercussão em termos de prejuízos foi significativa em termos de número de desalojados, número de desabrigados e pessoas feridas e enfermas, além de um caso de morte notificado.

As ações básicas de resposta às enchentes custaram ao Governo do Estado R\$ 1,7 milhões. A enchente de 2000 afetou os setores de agricultura, indústria e serviços que contabilizaram um prejuízo na economia de R\$ 7,6 milhões. Foram comprometidos os serviços básicos tais como abastecimento de água, energia elétrica, transporte, saúde e educação causando um prejuízo de R\$ 4,2 milhões.

No ano de 2000, a enchente afetou todas as culturas agrícolas típicas da região (laranja, arroz, milho, abacaxi, banana), com exceção da castanha-do-brasil que se encontra em terra firme. O comércio local foi gravemente afetado, sendo que o mercado informal, localizado na área diretamente afetada, respondeu por 70% dos danos à economia local.

Os prejuízos sociais e econômicos podem ser detalhados da seguinte forma:

#### **a) Prejuízos sociais**

- a. Os serviços de abastecimento de água foram comprometidos em 5.500 m de rede e um manancial de água equivalente a R\$ 19,5 mil;
- b. Em energia elétrica foram destruídos 30.000 m de linha de transmissão, o equivalente a R\$ 369,9 mil;
- c. O setor de transporte teve 6.5 km de vias afastadas e destruídas, cujo valor equivalente foi de R\$ 3,6 mil;
- d. O serviço de saúde básico à população afetada necessitou de R\$ 152,6 mil para atender os casos de assistência e prevenção;
- e. A área da educação comprometeu o ano letivo de oito mil alunos.

#### **b) Prejuízos econômicos**

- a. No setor de agricultura as perdas foram de 52,58 ton, valor estimado em R\$ 95 mil;
- b. Foram destruídas três indústrias-olarias, o equivalente a R\$ 3,9 milhões;
- c. Foram comprometidos os serviços e comércio, com perdas de R\$ 3,5 milhões;
- d. Para reconstrução da área afetada, o governo do Estado aplicou recursos de R\$ 15,2 milhões, **o equivalente a cinco vezes o orçamento anual do município**, visto que orçamento anual do município na época era de R\$ 3,2 milhões.

Considerando a análise dos prejuízos concernentes à Tabela 1 e alguns dos alertas do IPCC (2007), o aumento do escoamento superficial e a antecipação da descarga de pico durante o período chuvoso em rios pode ser intensificada, de acordo com as previsões de especialista internacionais. Além disso, em

relação aos recursos hídricos superficiais e sua gestão, até meados do século, projeta-se que o escoamento anual médio dos rios e a disponibilidade de água aumente em torno de 10 a 40% nas altas latitudes e em algumas áreas tropicais úmidas e diminua em 10 a 30% em algumas regiões secas nas latitudes médias e nos trópicos secos, algumas das quais já sofrem atualmente de escassez de água.

Nestes termos, por outro lado, é provável que aumente a extensão das áreas afetadas por secas. Além disso, os eventos de precipitação extrema, cuja frequência é muito provável que aumente, elevarão por consequência o risco de inundações.

Desta forma, tornam-se extremamente necessários novos procedimentos de adaptação e práticas de gerenciamento de risco para o setor hídrico, os quais estão sendo desenvolvidos em alguns países e regiões que reconheceram as mudanças hidrológicas projetadas com as incertezas correspondentes (IPCC, 2007).

Busby *et al.* (2009) comentam que uma das principais técnicas que dispomos para estudar o problema dos riscos está relacionado à sua potencial amplificação em dada situação. Os autores afirmam que a ação coletiva em relação aos eventos ou crises apresenta qualidade quando é efetiva perante os olhos daqueles que estão envolvidos no processo. Acrescentam ainda que a institucionalização e a independência, a habilidade de conferir benefícios tanto individuais quanto coletivos, a capacidade de atrair (mais do que evitar) críticas, e abrandar problemas de falta de comunicação devam funcionar como um conjunto de ações conectadas. Caso contrário, perdem sua abrangência e eficácia.

De acordo com Zuquete *et al.* (1995) as calamidades causadas por eventos severos da natureza permanecem um objeto de estudo pouco explorado no conjunto de pesquisas sobre o meio ambiente no Brasil. Consequentemente, o acesso às informações atualizadas e teoricamente consistentes sobre vários aspectos merecem destaque: a) formas de organização social durante os impactos; b) percepções do risco das populações atingidas; c) capacidade de auto-organização; d) aprendizado dos atores sociais; e) adequação de políticas públicas; f) conflitos de interesse em período de crise; e g) efeitos sobre a dinâmica de desenvolvimento socioeconômico.

Todo um conjunto de informações indispensáveis para a **formulação de medidas mitigatórias** nunca se encontra à disposição dos planejadores e tomadores de decisão. Mas estes problemas podem fragilizar as políticas públicas sociais de prevenção, além de potencializar prejuízos como aqueles mostrados na Tabela 1.

Tão importante quanto os estudos ligados à dimensão social é relevante enfatizar a importância das pesquisas científicas e tecnológicas em torno da prevenção (observação e previsão hidrometeorológica). Evitar que um fenômeno ocorra foge parcialmente da capacidade humana, dependendo do caso. Contudo, medidas de prevenção e alertas hidrometeorológicos são passíveis de empreender, de modo que se minimizem os riscos de prejuízos, mortes e impactos causados pelos eventos extremos naturais, em especial quando se avaliam os danos do ponto de vista das populações mais carentes e fragilizadas economicamente.

## 4. CONCLUSÃO

A Constituição de 1988 conferiu aos municípios enorme desafio em termos de organização política, administrativa, normativa etc. (arts. 29 e 30, CF/88). Enormes são as possibilidades e diretamente proporcionais às responsabilidades oriundas dessa inovadora forma de federalismo. As questões urbanísticas, bem como as responsabilidades advindas da condução de tais processos, são apenas um exemplo. Nestes termos, o art.182, da Magna Carta, a Lei n.º 10.257/2001 (Estatuto da Cidade) e as legislações municipais de Plano Diretor – quando for este o caso – devem ser observados.

No Estatuto da Cidade – Lei n.º 10.257, de 10 de julho de 2001 – para os fins ora propostos, destacamos o art. 2º, inciso I, em que a garantia do direito à cidade sustentável, direito à terra urbana, à moradia, ao saneamento ambiental, à infraestrutura urbana, ao transporte e aos serviços urbanos, ao trabalho e ao lazer devem ser atendidos. Além disso, no inciso IX, deve haver a justa distribuição dos benefícios e o ônus decorrentes do processo de urbanização.

No caso das enchentes no município de Laranjal do Jari, os valores utilizados para atender ao socorro do município permitiram inferir que, por indisponibilidade de um sistema de monitoramento e de previsão sistemáticos do tempo, clima e recursos hídricos, provavelmente incorreram em significativos prejuízos (evitáveis até certo limite) que poderiam ter sido executados mediante evacuação e(ou) preparação mais efetiva para o iminente desastre. Tais informações devem ser consideradas pelos planejadores de políticas públicas e assimiladas pela população local em todos os níveis em relação às enchentes.

A mitigação do risco recorrente e da vulnerabilidade socioeconômica existente no município de Laranjal do Jari necessita de políticas um tanto quanto abrangentes. Mas também necessita de políticas específicas para enfrentar o problema nos diversos níveis que ele exige. Para isso é necessário criar um sistema de prevenção mais integrado e eficiente na geração e uso de informações estratégicas voltadas para a prevenção e não apenas para a reação aos eventos hidroclimáticos adversos.

Essa talvez seja uma das principais razões para a criação do Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis (NHMET) no IEPA-AP. É preciso que este se consolide e se desenvolva para se tornar cada vez mais capaz de dar boas respostas científicas e operacionais à sociedade local.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o auxílio financeiro concernentes aos projetos REMETAP e REMAM I, ambos financiados pela Finep/CNPq e MCT, e a todos os grandes parceiros signatários do Projeto REMETAP: Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SEMA), Corpo de Bombeiros (Defesa Civil) do

Estado do Amapá; Instituto Euvaldo Lodi (IEL-FIEAP), EMBRAPA-AP, UNIFAP. Não poderíamos esquecer também de agradecer a todos os profissionais que atuaram no NHMET-IEPA e aos usuários que tornam útil sua existência.

## 6. REFERÊNCIAS

AVADAN. *Avaliação de Danos*. Defesa Civil – Governo do Estado do Amapá. CEDEC-AP: Classificação do Porte dos Danos (2000).

BECK, Ulrich. *La sociedad del riesgo: hacia una nueva modernidad*. Barcelona: Paidós, 1986, (2006).

BECK, Ulrich. *World risk society*. Cambridge: Polity Press, 1999.

BUSBY, J.S, ALCOCK, R.E, MaCGILLIVRAY, B.H. Interrupting the social amplification of risk process: a case study in collective emissions reduction. *Journal of Environmental Science and Policy*. In Press, 2009.

CALVO GARCÍA TORNEL, Francisco. Algunas cuestiones sobre Geografía de los Riesgos. Scripta Nova. *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 1997, n. 10. Disponível em: <<http://www.ub.es/geocrit/sn-10.htm>>.

CALVO GARCÍA-TORNEL, Francisco. *Sociedades y territorios en riesgo*. Barcelona: Ediciones del Serbal, 2001.

DOUGLAS, Mary. *Pureza e perigo*. São Paulo: Perspectiva, 1976.

DOUGLAS, Mary. *Risk and blame*. Essays in cultural theory. Londres e Nova Iorque: Routledge, 1992.

ESPEJO MARÍN, Cayetano, CALVO GARCÍA-TORNEL, F. Bibliografía sobre riesgos con origen en procesos naturales publicada en España (1975-2002). Biblio 3W, *Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, Universidad de Barcelona, Vol. VIII, nº 455, 25 de julio de 2003. Disponível em: <<http://www.ub.es/geocrit/b3w-455.htm>>.

EWING, B. T; KRUSE, J. B; THOMPSON, M. A. Transmission of employments shock before and after Oklahoma city tornado. *Environments Hazards Journal*. 6, 181-188, 2005.

FEITOSA, J. R. P; JESUS; E. S; CUNHA. A. C; DAVILA, J. E; COSTA, W. A.N. Ocorrência de tornado em Macapá-AP no dia 27 de fevereiro de 2006: Estudo de Caso. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. *Anais em CD ROM*, Ano 2006.

GIDDENS, Anthony. *A transformação da intimidade*. São Paulo: Ed. Unesp, 1994.

GIDDENS, Anthony. *As conseqüências da Modernidade*. São Paulo: Ed. Unesp, 1991.

GIDDENS, Anthony. *Modernidade e Identidade*. Rio de Janeiro: Zahar Ed., 2002.

IPCC. *Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade*. Editores Adger, N. et al. Quarto Relatório de Avaliação. 8ª Sessão. Bruxelas, 17 de abril de 2007.

JENKIN, Clinton M. *Risk, Perception and Terrorism: Applying the Psychometric Paradigm*. Homeland Security Affairs, Vol. II, Nº. 2 (July 2006). Disponível em: <<http://www.hsaj.org/pages/volume2/issue2/pdfs/2.2.6.pdf>>. Acessado em 28/09/2007.

- KLINKE, Andreas and RENN, Ortwin. *Prometheus Unbound. Challenges of Risk Evaluation, Risk Classification, and Risk Management*. No. 153 / November 1999.
- KOBIYAMA, M, MENDOÇA, M; MORENO, D. A; MARCELINO, I. P.V. O; MARCELINO, E. V; GONÇALVES, E. F; BRAZEETI, L. P; GOERL, R. F; MOLLERI, G. S. F; RUDORFF, F.M. *Prevenção de Desastres Naturais: conceitos básicos*. Curitiba-PR: Ed. Organic Trading, 2006.
- NOVEMBER, Valerie. *Les Territoires du risque: le risque comme objet de réflexion géographique*. Berna: Lang, 2002
- RENN, Ortwin. Concepts of risk. In: KRIMSKY, S., GOLDING, D. (Eds.). *Social theories of risk*. Praeger Publishers, Westport, 1992. pp. 53-79.
- RENN, Ortwin. *Precautionary, principle: risk uncertainty and rational action*. 2003. Disponível em: <<http://www.allchemeseminars.org/downloads/03-10-01/20031001report.pdf>>. Acessado em 28.09.2007.
- SANTOS, Milton. *A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção*. São Paulo: Hucitec, 1996.
- SLOVIC, Paul. *Perception of Risk*, Science 236, 1987.
- THONON, I; KLOK, C. Impact of a changed inundation regime caused by climate change and floodplain rehabilitation on population viability of earthworms in a lower River Rhine foodplain. *Science of the Total Environment Journal*. 372, 585-594, 2007.
- VALLE, C. E. e LAGE, H. *Meio Ambiental: Acidentes, Lições e Soluções*. São Paulo-SP: Editora Senac, 2003.
- VENKATRAM, A; CIMORELLI, A. J. On the role of nighttime meteorology in modeling dispersion of near surface emissions in urban areas. *Atmospheric Environment Journal*, 41, 692-704, 2007.
- VEYRET, Yvette (Org.). *Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente*. São Paulo: Contexto, 2007.
- WILBY, R.L; ORR, H.G; HEDGER, M; FORROW,D; BLACKMORE,M.Risks posed by climate change to the delerery of Water Framework Directive objectives in the UK. *Environmental International Journal*, 32, 1043-1055, 2006.



- ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- AERBOM – Desenvolvimento de um aerogerador e otimização de seu acoplamento à motobombas convencionais por meio de inversores de frequências.
- AHE – Barragens para aproveitamento hidrelétrico.
- ANA – Agência Nacional de Águas.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.
- ARIMA – Auto-Regressive Integrated Moving Average.
- AVADAN – Avaliação de Danos da Defesa Civil do Amapá.
- BASA – Banco da Amazônia S/A.
- BRAMS – Brazilian Regional Atmospheric Modeling System.
- CAD – Capacidade de Água Disponível.
- CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
- CATT-BRAMS – Coupled Aerosol and Tracer Transport Model to the Brazilian development on the Regional Modelling System.
- CBMET – Congresso Brasileiro de Meteorologia.
- CEDEC – Coordenadoria Estadual de Defesa Civil.
- CEMRH – Centros Estaduais de Meteorologia e Recursos Hídricos.
- CETEA – Centro ou o Núcleo Estadual de Meteorologia e Recursos Hídricos.
- CGRH – Coordenadoria Geral de Recursos Hídricos.
- CLP – Camada Limite Planetária.
- CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
- CPAQ – Centro de Pesquisas Aquáticas.
- CPC – Centro de Previsão Climática.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil.
- CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.
- CTHEA – Centro Tecnológico de Hidrometeorologia do Estado do Amapá.
- DSA – Divisão de Satélites Ambientais.
- DTI – Desenvolvimento Tecnológico Industrial.

Eletronorte – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.

EMA – Estações Meteorológicas Automáticas.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

EMC – Estações Meteorológicas Convencionais.

ENCIT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas.

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos.

FTP – File Transfer Protocol (Protocolo de Transferência de Arquivos).

GOES – Geostationary Orbital Environmental Satellite.

GPCP – Global Precipitation Climatology Project.

GrADS – Grid Analysis and Display System.

IC – Iniciação Científica.

IEL – Instituto Euvaldo Lodi.

IEPA – Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas.

INFRAERO – Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.

INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais.

LABHIDRO – Laboratório de Hidrometeorologia.

MAC – Método de Análise de Contingência.

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia.

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.

MPI – Message Processes Interface.

NCEP – National Centers for Environmental Prediction.

NDVI – Índice de Vegetação Normalizado por Diferenças.

NHMET – Núcleo Estadual de Hidrometeorologia e Energias Renováveis do Estado do Amapá.

OMM – Organização Meteorológica Mundial.

PARNA – Parque Nacional das Montanhas do Tumucumaque.

PCD – Plataformas Automáticas de Coleta de Dados.

PIBIC – Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica.

PMTCRH – Programa de Monitoramento de Tempo, Clima e Recursos Hídricos.

PROCAD – Programa Nacional de Cooperação Acadêmica.

REMAM – Rede de Eventos Extremos da Amazônia.

REMETAP – Rede de Meteorologia e Recursos Hídricos do Estado do Amapá.

RNP – Rede Nacional de Pesquisa.  
RPCH – Rede de Pesquisa de Clima e Recursos Hídricos.  
SBMET – Sociedade Brasileira de Meteorologia.  
SCD – Sistema de Coleta de Dados.  
SEMA – Secretaria de Estado do Meio Ambiente.  
SETEC – Secretaria de Estado da Ciência e Tecnologia.  
SIH – Superintendência de Informações Hidrológicas.  
SIPAM – Sistema de Proteção da Amazônia.  
TEB – Town Energy Budget.  
TSM – Temperatura da Superfície do Mar.  
UDEL – University of Delaware.  
UFPA – Universidade Federal do Pará.  
UHECN – Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes.  
UNIFAP – Universidade Federal do Amapá.  
WCRP – World Climate Research Program.  
WRF – Weather Research and Forecasting.  
ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul.  
ZCIT – Zona de Convergência Intertropical.  
ZEE – Zoneamento Ecológico-Econômico.



Esse livro foi composto em Candara e Myriad Pro  
e impresso em papel Couché Fosco 90g/m<sup>2</sup>.

Capa em papel Cartão Supremo 300 g/m<sup>2</sup>.

Tiragem: 500 exemplares.