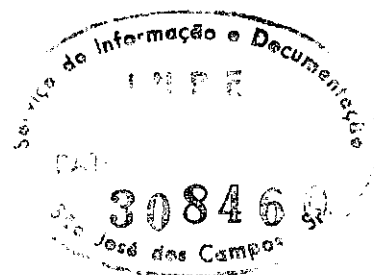


MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-8927-PUD/58

**SISTEMA DE MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DE  
VARIÁVEIS LIMNOLÓGICAS EM SISTEMAS AQUÁTICOS  
AMAZÔNICOS SUJEITOS A DIFERENTES GRAUS DE  
INTERFERÊNCIA ANTRÔPICA**

Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo  
José Luiz Stech  
Reinaldo Roberto Rosa  
João Antônio Lorenzetti  
Fernando Manoel Ramos



INPE  
São José dos Campos  
2002

23 SET 2002

**MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DE VARIÁVEIS  
LIMNOLÓGICAS EM SISTEMAS AQUÁTICOS AMAZÔNICOS  
SUJEITOS A DIFERENTES GRAUS DE INTERFERÊNCIA  
ANTRÓPICA**

Evlyn M. L. M. Novo<sup>1</sup>; José L. Stech<sup>1</sup>; Reinaldo R. Rosa<sup>2</sup>; João A.  
Lorenzetti<sup>1</sup>; Fernando M. Ramos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Divisão de Sensoriamento Remoto

<sup>2</sup>Laboratório de Computação e Matemática Aplicada

**Resumo**

Este documento é uma proposta de projeto submetido ao CT-HIDRO 2002. Neste projeto pretende-se estudar o Reservatório de Tucuruí e o Lago Grande de Curuari, dois sistemas aquáticos amazônicos sujeitos a diferentes graus de interferência antrópica. Os principais objetivos são: implantar um sistema de monitoramento contínuo automático de variáveis limnológicas, como suporte à quantificação do papel dos reservatórios hidrelétricos sobre as emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera; avaliar a exatidão das medidas ambientais obtidas pelo Sistema Automático de Monitoramento Ambiental (SIMA) a partir da realização de missões de coleta de dados de campo, construir e manter um banco de dados sobre as bacias hidrográficas amazônicas investigadas; desenvolver, adaptar e aplicar métodos para análise de séries temporais de modo a caracterizar regimes complexos (intermitência, quebras de simetria espaço-temporal, criticalidade auto-organizada, recursividades não lineares) e discriminar a origem dos pulsos que atuam no sistema e seus reflexos sobre o seu equilíbrio.

**Abstract**

This document summarizes a research proposal submitted to the CT-HIDRO 2002. The general objective was to study two aquatic ecosystems undergoing different degrees of human interference. The Tucuruí Reservoir feeds a hydroelectric power plant, and the Lago Grande de Curuari, is a large Amazon floodplain lake in relatively pristine conditions. The specific objectives are to install an automatic monitoring system for the limnological variables that could support a more comprehensive assessment of the role of the hydroelectric reservoir as source of greenhouse gases. To assess the accuracy of SIMA environmental measurements with *in situ* measurements. To build and support a database containing the data derived from the investigation. To develop and apply spectral analysis methods to identify complex regimes (e.g.: intermittence, symmetry breaks, self-organized criticality, and non-linear recursivity) and to investigate the effect of pulses on the equilibria of the different aquatic systems.

## 1 – INTRODUÇÃO

A construção de barragens para o aproveitamento da água para diferentes usos (agricultura, prevenção de inundação, produção de energia, uso doméstico e industrial) é uma prática antiga da humanidade. O impacto ambiental de curto e médio prazo da construção de reservatórios encontra-se bastante documentado na literatura ([www.dams.org](http://www.dams.org)), mas ainda não existe conhecimento consolidado sobre os impactos de longo prazo que permitam ações de recuperação ambiental.

Os dados mais recentes mostram que a captação global de água é estimada em 3800 km<sup>3</sup> por dia, ou seja, duas vezes superior à da década de 50, o que tem provocado um impacto dramático sobre o equilíbrio de lagos, rios e aquíferos. Segundo dados do Comitê de Grandes Barragens (CGB) existem mais de 45 mil grandes barragens (conforme definição em Müller, 1996) em todo o mundo. Há dados que sugerem que cerca de 40 % das terras irrigadas baseiam-se no aproveitamento de águas retidas em barragens, enquanto que cerca de 19 % da energia elétrica global é derivada de hidroeletricidade. Existem estimativas de que o investimento mundial na construção de barragens é da ordem de \$ 2 trilhões de dólares, sendo que muito dos empreendimentos não tem alcançado a lucratividade desejada em decorrência dos inúmeros impactos ambientais que trouxeram às regiões em que foram implantados. Estimativas globais sugerem que a construção de barragens pode ter sido responsável pela migração de mais de 40 milhões de pessoas no mundo, e pela modificação do ciclo hidrológico de cerca de 60 % dos rios do planeta (WCD, 2000).

Em muitas partes do mundo existe um cenário de crescente preocupação com o acesso, a equidade e o suprimento às crescentes demandas por água. Esse desequilíbrio pode afetar as relações entre nações, populações rurais e urbanas, entre seguimentos econômicos (indústria, transporte, agricultura), entre necessidades humanas e econômicas. A necessidade de suprir a crescente população com água em um contexto de escassez de recursos, deterioração de qualidade, e crescente limitação das possibilidades de aproveitamento das águas superficiais, tem trazido as questões de manejo dos recursos hídricos para o topo da agenda de desenvolvimento global (WCD, 2000).

Segundo o CGB o grande desafio do Século XXI é o de repensar a questão do gerenciamento dos recursos hídricos, de modo a reduzir os conflitos entre usuários e suprir as demandas dos diferentes segmentos da sociedade de modo equânime e sustentável em longo prazo. As conclusões textuais do relatório final da Comissão Mundial de Barragens (WCD, 2000) são que:

- As grandes barragens geralmente apresentam um amplo espectro de impactos nos rios, bacias de drenagem e ecossistemas aquáticos, e que esses impactos são mais negativos que positivos, levando, na maioria dos casos, à extinção irreversível das condições naturais (desaparecimento de espécies e redução de biodiversidade).

- Os esforços para conter os impactos ambientais das grandes barragens têm tido um sucesso muito limitado devido à falta de medidas que permitam prevê-los e evitá-los.
- A falta de medidas preventivas se deve em grande parte à baixa qualidade dos modelos de previsão de impactos ambientais.
- Muitas das barragens construídas com o objetivo de contenção de inundações tiveram efeito oposto devido à operação ineficiente do reservatório, falta de conhecimento do funcionamento do sistema natural, e falta de atenção às práticas de manejo e conservação ambiental nas bacias de captação.

Os impactos ambientais da construção de barragens são complexos e variáveis no tempo e no espaço visto que dependem das condições naturais anteriores, magnitude das alterações impostas e da própria dimensão do sistema. Em muitos casos as barragens levaram a perdas irreversíveis de populações de diferentes espécies. Como os impactos nos ecossistemas são diversos e complexos, é muito difícil fazer previsões detalhadas e precisas sobre as mudanças mais prováveis que resultarão da construção de um reservatório ou de uma série deles. A exatidão das previsões diminui com a passagem dos impactos de primeira para terceira ordem, e por isso os esforços existentes para reduzir os impactos das grandes barragens sobre o funcionamento dos ecossistemas tem tido sucesso bastante limitado (WCD, 2000).

De acordo com o relatório da Comissão Mundial de Barragens *“esse sucesso limitado resulta dos esforços limitados para se conhecer o funcionamento dos ecossistemas e da natureza dos impactos, das abordagens inadequadas adotadas no estudo do funcionamento desses ecossistemas alterados”*.

O Brasil, em virtude de sua dimensão continental tem grande abundância de recursos hídricos que são amplamente aproveitados para a geração de energia hidroelétrica. A distribuição desses recursos é, entretanto, muito desigual em termos regionais, principalmente quando se compara com a distribuição da população. A região Norte, que inclui a maior parte da região amazônica, detém 68,5% dos recursos hídricos para uma população equivalente a cerca de 7% da população brasileira. Essa acentuada concentração de água na região Norte lhe confere um grande destaque regional no futuro da civilização mundial, diante de uma tendência de esgotamento do mais importante recurso natural para a vida no planeta (Eletronorte, 2001).

O aproveitamento dos recursos hídricos da região amazônica tem sido limitado por falta de investimentos no setor e pela grande pressão dos movimentos sociais e ambientalistas. Existem planos para construção de inúmeros reservatórios de grande porte na região Amazônica, mas os problemas ambientais e sociais causados pela construção da UHE Curuá Uma, UHE Tucuruí, UHE Balbina, e UHE de Samuel em áreas de Floresta Tropical tem levado a busca de alternativas de menor impacto.

## **Objetivos**

Tendo em vista o impacto que os aproveitamentos hídricos tem trazido sobre as bacias hidrográficas Amazônicas, este projeto tem como objetivos:

- a) Implantar um sistema de monitoramento contínuo automático de variáveis limnológicas em sistemas aquáticos amazônicos sujeitos a diferentes graus de interferência antrópica, como suporte à quantificação do papel dos reservatórios hidrelétricos sobre as emissões totais de gases de efeito estufa para a atmosfera.
- b) Avaliar a exatidão das medidas ambientais obtidas pelo Sistema Automático de Monitoramento Ambiental (SIMA) a partir da realização de missões de coleta de dados de campo para a aferição dos dados adquiridos pelo SIMA.
- c) Construção e manutenção de um banco de dados sobre as bacias hidrográficas amazônicas investigadas
- d) Desenvolver, adaptar e aplicar métodos para análise de séries temporais de modo a caracterizar regimes complexos (intermitência, quebras de simetria espaço-temporal, criticidade auto-organizada, recursividades não-lineares) e discriminar a origem dos pulsos que atuam no sistema e seus reflexos sobre o seu equilíbrio.

## **2 – JUSTIFICATIVA**

O impacto da variabilidade climática e da ação antrópica sobre os recursos hídricos é pouco conhecido, principalmente em biomas complexos e amplos como a Bacia Amazônica. O conhecimento do funcionamento do sistema natural e dos impactos depende da disponibilidade de dados e de ferramentas analíticas que permitam distinguir na variabilidade total do sistema, as resultantes da variabilidade dos sistemas hídricos (CTHIDRO, 2000) e as derivadas da apropriação econômica do espaço geográfico.

Nesse contexto, uma das linhas de investigação mais férteis, atualmente, reside no cotejo de séries temporais de dados obtidas em regiões preservadas e alteradas a partir da utilização de plataformas de coleta automática e transmissão de dados em tempo real. Os dados adquiridos em regiões preservadas permitem identificar a linha de base (base line) do sistema a partir da qual as alterações antrópicas podem ser quantificadas. A comparação dos dados (qualidade de água, vazão etc) entre áreas alteradas e preservadas permite determinar:

- O grau de deterioração no funcionamento do sistema em decorrência da ação antrópica;
- As taxas de mudança na resposta dos sistemas natural e alterado a eventos críticos (alta magnitude e baixa frequência, como inundações ou secas prolongadas).

Assim sendo, esse estudo se propõe a estabelecer uma rede de monitoramento contínuo de dados limnológicos em um reservatório da bacia do Rio Tocantins, como modelo de um sistema ambiental já alterado pela ação antrópica e sujeito a crescentes pressões antrópicas em decorrência das políticas públicas de desenvolvimento da região centro-oeste e norte do

Brasil. Os dados seriam cotejados com os obtidos no Lago Grande de Curuari, no Amazonas, os quais representam um sistema aquático com mínima interferência antrópica e, portanto, com características das condições de base de funcionamento do sistema.

Segundo Tundisi (1999) os principais componentes e funções de força que estabelecem as condições de contorno do funcionamento dos sistemas aquáticos podem se classificar em: variáveis climatológicas (precipitação, temperatura do ar e vento); variáveis hidrológicas (vazão afluente e efluente); variáveis limnológicas (turbidez, pH, condutividade, temperatura, velocidade e direção de fluxo, concentração de sólidos suspensos, concentração de carbono orgânico dissolvido, concentração de clorofila, concentração de nutrientes) e variações de escala.

O monitoramento dessas variáveis em campo é bastante difícil. Geralmente são realizadas campanhas de campo com duração limitada, as quais permitem a obtenção de um número limitado de amostras de alguns corpos d'água. A simples análise da rede de coleta (<http://www.aneel.gov>) já é suficiente para mostrar a precariedade dos dados disponíveis para monitorar as alterações de qualidade das águas brasileiras face à multiplicidade dos impactos antrópicos. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que é o órgão responsável pela manutenção da rede, existem 418 estações para a aquisição de dados de qualidade de água no Território Brasileiro, o que representa uma densidade de 1 estação a cada 20 mil km<sup>2</sup>. Isto significa que estados pequenos como Sergipe, Alagoas, Espírito Santo, Rio de Janeiro teriam no máximo duas estações de monitoramento da qualidade da água. De fato, isto não ocorre, porque essas estações de amostragem estão concentradas nas regiões mais populosas do país, o que deixa a região norte ainda mais desprovida de informações sistemáticas. Se a distribuição das estações fosse isotrópica, uma bacia como a do Tocantins-Araguaia teria aproximadamente 40 estações para medidas de qualidade de água, ou seja, uma estação a cada 100 km se fossem alocadas estações apenas ao longo do curso dos principais rios da Bacia, o Tocantins (com 2500 km de extensão) e o Araguaia (com 2115 km de extensão).

Neste contexto de escassez de informações básicas para o monitoramento dos sistemas aquáticos amazônicos, o projeto proposto busca, a partir da elaboração de um estudo piloto a ser realizado num período de 4 anos: a) adaptar o SIMA, que foi desenvolvido e testado em ambientes aquáticos oceânicos às condições de ambientes aquáticos continentais; b) estabelecer um protocolo de análise e distribuição de dados; c) estimular a produção do sistema pela indústria nacional de modo que a rede de coleta de dados contínuos de qualidade de água possa ser ampliada e que os dados coletados tornem-se públicos.

## **2.1 - A importância do monitoramento da qualidade da água e na Amazônia**

A eficiência das ações de recuperação ambiental em bacias de drenagem sujeitas a grandes alterações antrópicas é muito pequena devido à falta de programas eficientes de monitoramento ambiental. Para contornar esses problemas, Blevins e Fairchild (2001) sugeriram o uso de medidas horárias de oxigênio dissolvido, turbidez e temperatura na identificação das condições limitantes à restauração do ecossistema. Para isso os autores reconhecem o papel fundamental de sistemas operacionais de coleta e transmissão de dados

via satélite, sem os quais a aquisição de dados horários se tornaria econômica e operacionalmente inviável.

Nesta perspectiva, nos estudos ambientais, estão sendo propostas redes distribuídas de monitoramento da qualidade de água que incluem o acesso e a transferência dos dados via internet. As variáveis medidas são as passíveis de ser obtidas por sensores e transmitidas telemetricamente. Segundo diversos pesquisadores (Toran et al, 2001; Wenner e Geist, 2001) dentre essas, as mais relevantes para o monitoramento da qualidade de água são a temperatura, turbidez, pH, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica.

Estudos limnológicos realizados na região Amazônica (Walker, 1999) identificaram três fatores abióticos básicos no funcionamento dos ecossistemas aquáticos amazônicos: o tamanho relativo das bacias de drenagem, a periodicidade anual da inundação e o papel da floresta amazônica no balanço hídrico. O tamanho relativo das bacias é um elemento importante, porque o mesmo tamanho do sistema interfere em seu funcionamento. Isto significa que o conhecimento gerado pelo estudo de sistemas aquáticos e reservatórios em bacias de drenagem da dimensão da bacia do Rio Tietê no Estado de São Paulo, não pode ser transposto para a bacia do Rio Tocantins. Na toponímia Amazônica, o Rio Corumbataí, afluente do Tietê e responsável pelo abastecimento de grande parte da população do médio Tietê, não passa de um “igarapé”. Outro aspecto relevante na compreensão da limnologia das bacias de drenagem Amazônicas é a pronunciada sazonalidade da inundação. Todos os rios Amazônicos são sujeitos a inundações aproximadamente periódicas e desenvolvem extensas planícies aluviais e se desenvolvem em regiões geomorfologicamente distintas: a terra firme, nunca sujeita à inundação, e a planície, recursivamente inundada. Devido a variabilidade anual das inundações, na planície de inundação existem zonas de transição: as regiões mais altas, que são inundadas ocasionalmente, e as regiões mais baixas, que são inundadas periodicamente e permanecem longos períodos submersas. Em decorrência do funcionamento hidrológico da planície ocorrem adaptações da flora e fauna. Outro aspecto importante para a compreensão do funcionamento do sistema aquático é o lapso de tempo entre os máximos de precipitação e inundação, o que faz com que os tipos de água encontrados na planície variem em propriedades químicas no tempo e no espaço. A presença da floresta representa um outro fator importante para a circulação da água, visto que ela funciona como um sistema de armazenamento temporário da água precipitada. Existem dados que demonstram que 50 % da precipitação anual da floresta são devido a evapotranspiração. A combinação da evapotranspiração e reciclagem é responsável pela manutenção do fluxo de água durante a estação de baixa precipitação.

As diferenças de cor da água dos rios amazônicos estão associadas a sua composição química e indicam diferenças bem documentadas na qualidade da água (Furch e Junk, 1997). Essa composição, entretanto, não é constante no tempo e no espaço e se encontra em grande dependência da variação anual da precipitação, do ciclo de inundação, e mais recentemente das alterações antrópicas sofridas pelo sistema aquático. A Tabela 1 resume algumas características químicas distintivas dos diferentes tipos de água.

TABELA 1 – VARIABILIDADE DOS PARÂMETROS QUÍMICOS DA QUALIDADE DA ÁGUA DAS ÁGUAS AMAZÔNICAS

Tipo de Água	Condutividade ( $\square S cm^{-1}$ )	pH	Nitrogênio Total ( $\square mol l^{-1}$ )	Fósforo Total ( $\square mol l^{-1}$ )
Água Branca	47,4-96,9	6,0 –7,9	25 -60	0,84 –4,39
Água Preta	7,3 – 17,4	4,6 –6,2	21 -46	0,03 – 2,54
Águas Claras		5,87– 7,39		

Adaptado de Furch e Junk,1997.

Os dados da Tabela 1 indicam que há uma grande amplitude de variação nos parâmetros de qualidade de água para todos os principais tipos de água segundo a classificação de Sioli (1968). Essa variabilidade reflete a origem dos dados compilados por Furch e Junk (1997) a partir de pesquisas realizadas em diferentes locais, datas, estações do ano. O que se observa, entretanto, é que para algumas variáveis como a condutividade, embora o range de variação intraclasse seja grande, há diferenças maiores entre os tipos de água. Isso torna a condutividade uma variável de grande sensibilidade ao impacto das atividades humanas sobre a tipologia das águas amazônicas.

Como já está amplamente documentado na bibliografia, a tipologia de águas da Amazônia encontra-se em íntima associação com as características bióticas dos sistemas aquáticos amazônicos. A flora e a fauna amazônica se distribuem em função das características químicas da água.

### 3 – ÁREA DE ESTUDO

Para a realização desse estudo foi escolhido um reservatório da bacia do Araguaia Tocantins. Dentre as bacias amazônicas mais alteradas pela presença de reservatórios encontra-se a Bacia do Araguaia Tocantins (Figura 1), que já possui dois grandes reservatórios em operação, um no alto curso (UHE Serra da Mesa) e outro no início do baixo curso (UHE Tucuruí). Além destes estão sendo implantados mais dois grandes reservatórios (Tabela 2).



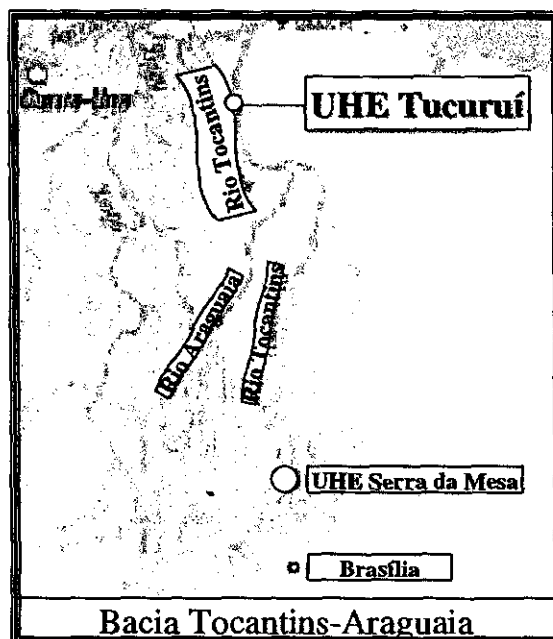


Figura 1 – Bacia Tocantins- Araguaia.

TABELA 2 – RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS AO LONGO DO RIO TOCANTINS

Usina Hidrelétrica	Ano	Potência(MW)	Volume 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Área km <sup>2</sup>
Tucuruí	1984	4240	45500	2800
Serra da Mesa	1998	1200	55200	1784
Cana Brava	e.c	450	2360	139
Lageado (Luiz Eduardo Magalhães)	e.c	1200	5500	630

A bacia do rio Tocantins-Araguaia possui uma área de aproximadamente 800 mil km<sup>2</sup>, e é a maior bacia hidrográfica totalmente contida em território brasileiro. O seu rio principal, o Tocantins, tem suas nascentes localizadas no Estado de Goiás, numa região já bastante alterada pela atividade antrópica. O Rio Araguaia, o seu principal afluente, se origina na Serra das Araras, no Estado do Mato Grosso e percorre cerca de 2 600 km até atingir o rio Tocantins. O Rio Araguaia, no extremo nordeste do Estado do Mato Grosso se divide em dois braços, o da margem esquerda, que mantém o nome de Araguaia, e o da direita que recebe localmente o nome de Rio Javaés, dando origem a maior ilha fluvial conhecida no planeta, a Ilha de Bananal.

A bacia Araguaia/Tocantins tem um regime hidrológico bem definido. Apresenta um período de estiagem culminante entre setembro/outubro e um período de águas altas, com as maiores cheias ocorrendo entre fevereiro e abril. A vazão média de longo termo do rio Tocantins em Tucuruí, (período de 1931-84), é de 11.090 m<sup>3</sup>/s, sendo que a vazão máxima, observada em 1980, foi da ordem de 68.400 m<sup>3</sup>/s, e a vazão mínima (1971), de 1.088 m<sup>3</sup>/s.

O reservatório de Tucuruí esteve sujeito até a construção de Serra da Mesa à intensa variação anual da vazão afluinte do rio Tocantins, com valores compreendidos entre um máximo de 35.000m<sup>3</sup>/s (janeiro/96, abril/97) até mínimos ao redor de 2.000m<sup>3</sup>/s nos períodos de estiagem (agosto/setembro) com média geral em torno de 11.000m<sup>3</sup>/s. O ciclo hidrológico da Bacia do Araguaia/Tocantins tem sido também alterado indiretamente a partir da intensa ocupação antrópica que se tem observado na bacia a partir da década de 60 com o movimento migratório e o avanço da frente de colonização para região centro-oeste.

A escolha do Reservatório de Tucuruí como área de estudo se deve a diversos fatores. Em primeiro lugar, o Reservatório da UHE Tucuruí vem sendo objeto de estudos pelo INPE, desde 1988, tendo em vista o problema ambiental criado pela proliferação de plantas aquáticas. Por se tratar do primeiro reservatório hidrelétrico de grande porte instalado na Amazônia, o uso de tecnologia de sensoriamento remoto nas atividades de manejo do reservatório se tornou mandatário. Isso ensejou uma série de trabalhos de cooperação técnica entre a Eletronorte e o INPE. Desde 1988 o INPE mantém convênio de cooperação técnico-científica com a Eletronorte para o estudo do reservatório de Tucuruí, o que envolve um grande suporte logístico às atividades de pesquisa. Uma série de trabalhos já foi realizada no reservatório envolvendo o uso de dados de sensoriamento remoto no mapeamento de gêneros de plantas aquáticas (Abdon e Meyer, 1990), na avaliação da relação entre uso e ocupação do solo e a proliferação de macrófitas (Pereira Filho, 1990, Pereira Filho, 2000), na classificação ótica das massas de água (Silva, 1995) como suporte à seleção de locais para medidas de emissões de metano (Lima, 1998, Lima et al. 2000; Lima et al. 2001); na estimativa de biomassa de plantas aquáticas (Costa et al., Costa et al. 1996; Costa et al. 1996a; Costa et al. 1996b; Noernberg, 1996, Noernberg 1996a; Costa et al., 1998, Novo et al., 1997, Novo et al., 1997a; Novo et al., 1998; Noernberg et al., 1999), e na caracterização da dinâmica de crescimento e desinfestação da população de macrófitas aquáticas em reservatórios (Lima et al., 2000b; Lima et al. 2001).

Além desses fatores históricos que explicam o interesse do grupo pelo reservatório de Tucuruí, ainda existem fatores de natureza técnico-científica: 1) o reservatório é o primeiro construído à jusante, de um sistema em cascata planejado para ser implantado no rio Tocantins; o seu monitoramento contínuo antes, durante e após a implantação permitiria identificar os impactos nas propriedades da água e identificar limites críticos à operação de um tal sistema; 2) o reservatório encontra-se inserido em uma região sujeita a um intenso processo de transformação nos padrões de uso e ocupação do solo nos últimos 30 anos; 3) o reservatório vem sendo objeto de estudos sobre emissões de metano de modo sistemático nos últimos 5 anos oferecendo portanto uma base de dados para comparação (Lima, 2001).

O Lago Grande de Curuaí foi selecionado como área não antropizada a ser utilizada como “base line” para comparação com o reservatório de Tucuruí por várias razões. Em primeiro lugar o Lago Grande de Curuaí está localizado na planície do baixo Amazonas, ao Sul da cidade de Óbidos, estado do Pará (Figura 2). Trata-se de um lago relativamente pouco alterado pela atividade antrópica, de dimensões compatíveis às do reservatório de Tucuruí. Segundo estudos realizados por Kosuth et al. (1999) essa região do baixo Amazonas é pouco afetada pelos efeitos de maré oceânica. Lagos da planície amazônica mais próximos geograficamente a Tucuruí estariam sujeitos a efeitos de maré oceânica o que representaria um elemento perturbador nas análises comparativas. Finalmente, o Lago Grande de Curuaí

vem sendo objeto de estudo pela equipe do projeto HIBAM (Hidrologia da Bacia Amazônica) através de uma cooperação entre o Intitut de Recherches pour Developpment (IDR) e à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nos últimos cinco anos, o que representa uma base independente de dados para comparação. Além disso, o Lago Grande de Curuai também vem sendo objeto de um projeto de doutoramento voltado para o “Estudo da dinâmica de circulação da água entre sistemas lóticos, lenticos e a planície de inundação a partir da integração de imagens multitemporais e multisensores orbitais” em desenvolvimento no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Barbosa, 2002).

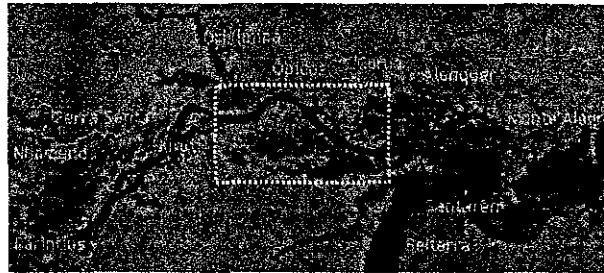


Figura 2 – Localização Geográfica do Lago Grande de Curuai.

#### 4 - O SISTEMA INTEGRADO DE MONITORAÇÃO AMBIENTAL - SIMA

O Sistema Integrado de Monitoração Ambiental - SIMA - é um conjunto de hardware e software desenhado para a coleta de dados e a monitoração em tempo real de sistemas hidrológicos. Para a coleta dos dados, o SIMA faz uso de um sistema autônomo fundeado, constituído de um toroide, onde são instalados sensores, eletrônica de armazenamento, bateria e antena de transmissão. Os dados coletados em intervalo de tempo pré-programado são transmitidos via satélite, em tempo quase real, para um usuário que pode estar situado até 2500 km distante do ponto de coleta. A associação destas componentes fornece uma poderosa ferramenta que pode ser empregada no gerenciamento e controle ambiental de recursos hídricos.

Esse sistema foi desenvolvido a partir de uma parceria entre a Universidade do Vale do Paraíba e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Stevenson et al., 1993). A partir de 1995, o projeto foi transferido para a Neuron Engenharia Ltda. Através de uma parceria com a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) a Neuron construiu um protótipo do SIMA, que ficou fundeado em águas do litoral do Rio de Janeiro durante um ano e os dados coletados foram disponibilizados pelo Programa Nacional de Bóia. Os dados coletados neste período foram comparados com dados *in situ*, o que confirmou o bom desempenho do sistema.

Considerando que as políticas induzidas do MCT visam criar condições para inovação tecnológica em segmentos estratégicos da indústria nacional, este projeto estará utilizando o conhecimento já incorporado à Neuron, para ampliar o escopo do SIMA para operação em ambientes aquáticos continentais remotos, de difícil acesso, e sujeitos a condições

extremas. Faz parte da proposta, ampliar o número de variáveis a ser monitoradas de modo a atender as exigências científicas do projeto.

A seleção de variáveis ambiental a ser medida levou em conta os seguintes aspectos:

- a) Sua relevância para a caracterização dos ambientes aquáticos amazônicos;
- b) Sua relevância como indicador de impacto ambiental (são variáveis que respondem de forma consistente às alterações no funcionamento do sistema aquático);
- c) Sua relevância para o processo de emissão de metano em sistemas naturais e antropizados.
- d) A viabilidade técnica de obtenção de medidas a partir de plataformas automáticas

Com base nesses critérios o sistema de medição automática permitirá monitorar as seguintes variáveis ambientais (Tabela 3).

**TABELA 3 – VARIÁVEIS A SEREM COLETADAS**

Variável Ambiental
pH,
Turbidez,
O <sub>2</sub> dissolvido,
CO <sub>2</sub> dissolvido,
Condutividade,
Nitrogênio-Nitrato/Nitrogênio-Amônia/ Amônia,
Temperatura da água em quatro níveis,
Temperatura do ar,
Umidade relativa,
Pressão atmosférica,
Radiação solar,
Direção e intensidade do vento,
Direção e intensidade da corrente;

## **5 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **5.1. - Análise de séries temporais em hidrologia dinâmica**

Atualmente a maioria das áreas de estudo em geociências envolve medidas obtidas a partir de instrumentação digitalizada com alta sensibilidade e com alta resolução nos domínios temporal, espacial e espectral. Dessa forma, as atuais observações *in situ* e métodos sofisticados de processamento, visualização e análise têm gerado séries temporais com alto grau de complexidade e em grandes quantidades. Portanto, além das técnicas estatísticas tradicionais (análise da autocorrelação e estimativa de momentos a partir de distribuições de densidade de probabilidades e suas respectivas leis de potência) se faz necessário a caracterização de outros parâmetros a partir das flutuações não-lineares, quebras de

simetria, memória de médio e alto alcance e regimes intermitentes que podem estar presentes na variabilidade das séries. Com os avanços na teoria de análise de séries temporais, várias ferramentas e algoritmos foram e estão sendo implementadas para análise de sinais com variabilidade complexa (Kantz e Schreiber, 1999; Zanandrea et al., 1999; Ramos et al. 2001). Com base nas teorias de sistemas dinâmicos não-lineares e física estatística fora do equilíbrio é possível demonstrar que a variabilidade complexa de uma série temporal pode estar associada a uma composição de diferentes processos determinísticos e estocásticos atuando conjuntamente (Rosa et al. 1999).

Nesse projeto aplicaremos novas abordagens teóricas para obter as informações paramétricas relacionadas às flutuações não-lineares e intermitentes que podem estar presentes em alguns sinais geofísicos associados à dinâmica hidrológica de reservatórios. Utilizaremos transformação por ondeletas para obter o *Global Wavelet Spectra (GWS)* do sinal. A partir do GWS é possível caracterizar o grau de auto-similaridade presente no sinal e determinar os coeficientes de criticalidade e auto-organização presentes no espaço de fases que rege o fenômeno físico gerador da série. Tais parâmetros são úteis para sugerir o possível mecanismo físico que constitui a dinâmica do sistema investigado. A combinação do GWS com dimensões de correlação, obtidas a partir da técnica de reconstrução de espaço de fases, permite estimar o número mínimo de variáveis dinâmicas envolvidas no processo (Grassberger e Procaccia, 1983; Kantz e Schreiber, 1999). Essa informação é crucial para os futuros trabalhos de modelagem do fenômeno.

Adicionalmente, a aplicação de modelos termodinâmicos generalizados é importante para verificar a presença de processos superdifusivos envolvidos na dinâmica de sistemas extensos não-lineares (Ramos et al. 2001), por exemplo, na verificação dos regimes envolvidos no crescimento de macrófitas e biomassa em reservatórios. Nesse caso, a estimativa de fatores de escalas e formação de padrões pode ser realizada por meio da técnica da Análise de Padrões Gradientes (Rosa et al, 1999). Essa metodologia permite visualizar quebras de simetria durante a evolução espaço-temporal de um sistema extenso e determinar possíveis dimensões fractais e graus de auto-similaridade estrutural presentes na extensão do sistema em diferentes escalas.

## **6 – METODOLOGIA**

### **6.1– Especificação e Integração das plataformas SIMA**

Nessa fase do projeto a equipe do INPE estará trabalhando de forma coordenada com a equipe de engenharia da Neuron para a especificação dos sensores, integração do sistema e testes preliminares de desempenho. Estas atividades serão desenvolvidas nas dependências do laboratório de mecânica e eletrônica do programa Processos da Hidrosfera da Coordenação Geral de Observação da Terra (OBT) do INPE.

### **6.2 – Processamento de Imagens do Sensor TM-Landsat das áreas de estudo como suporte à seleção preliminar de locais para a instalação dos sistemas**

Essa fase consistirá da aquisição, processamento e análise de imagens TM-Landsat do Reservatório de Tucuruí segundo metodologia descrita em Lima (1998) e do Lago Grande de Curuaí conforme proposto por Barbosa (2002).

### **6.3 – Trabalhos de Campo**

#### **a) Para a instalação do sistema**

Deverão ser realizadas, inicialmente, duas missões de campo na área de estudo. A primeira missão de campo terá como objetivo inspecionar os locais pré-selecionados através de imagens TM-Landsat e verificar a infraestrutura necessária para a instalação dos sistemas. Na segunda missão os sistemas serão instalados e colocados em operação.

#### **b) Para a calibração e manutenção**

Ao longo da execução do projeto serão realizadas pelo menos cinco missões para a calibração dos dados coletados e para operações de manutenção do sistema. As atividades de calibração dos dados serão realizadas a partir da aquisição *in situ* das mesmas variáveis.

### **6.4 - Processamento e análise dos dados**

Os dados coletados pelo SIMA serão utilizados no desenvolvimento de pelo menos duas teses de doutorado (Claudio Barbosa e Ivan Tavares de Lima). Os dados coletados serão pré-processados para a remoção de dados espúrios e integrados num banco georreferenciado em ambiente SPRING. Esses dados serão integrados a uma base de dados de imagens de diferentes fontes (MODIS, WFI/CBERS-1, TM-Landsat) como subsídio a sua calibração. Isto permitira espacializar as informações pontuais coletadas pelo SIMA.

As series temporais serão analisadas utilizando-se, além das técnicas estatísticas clássicas, novas ferramentas disponíveis no Laboratório de Computação e Matemática Aplicada do INPE. Utilizaremos o método de reconstrução de espaço de fases para estimativa da dimensão de correlação envolvida na variabilidade das series e para comparação com leis de potencia para inferência da presença ou não de memória no sinal (Ramos et al., 2001). Os estudos do grau de auto-similaridade nos sinais e caracterização de modulações não-lineares serão realizados a partir da técnica de ondeletas (Zanandrea et al., 2000), a partir da obtenção dos respectivos espectros globais da series a serem investigadas (Rodrigues Neto et al., 1999). Regimes complexos como intermitência e quebras de simetria serão identificados a partir da técnica de análise de padrões gradientes (Rosa et al., 1999; Ramos et al., 2000).

### **7 - RESULTADOS ESPERADOS**

Os resultados esperados ao final do projeto são: a) operar de forma contínua sistemas de monitoramento automático instalados no reservatório de Tucuruí e no Lago Grande de Curuaí; b) disponibilizar através da Web os dados coletados, c) realizar análise comparativa dos sistemas naturais e alterados, c) desenvolver um conjunto de ferramentas analíticas para a análise de séries temporais, d) realizar um esforço de inovação tecnológica junto ao segmento industrial do projeto, e) realizar capacitação de recursos humanos a partir de

atividades de Iniciação Científica, Mestrado e Doutorado nas diversas áreas de atuação do projeto.

### Referências Bibliográficas

- Abdon, M. M.; Meyer, M. Variação temporal de áreas ocupadas por macrófitas aquáticas no reservatório de através de dados do Satélite LANDSAT/TM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 4., Manaus 24-29 Jun. 1990. Anais. São José dos Campos: INPE, p. 545-548, 1990.
- Barbosa, C. C. Estudo da dinâmica de circulação da água entre sistemas lóticos, lenticos e a planície de inundação. Proposta (Projeto de Pesquisa de Doutorado em Sensoriamento Remoto e Aplicações) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.
- Blevins D; Fairchild J. Applicability of NASQAN data for ecosystem assessments on the Missouri River. Hydrological processes, v.15, n. 7, p. 1347-1362, 2001.
- Costa, M.P.F.; Ahern, F.; Novo, E.M.L.M. Integration of radar data acquired at different incidence angles for studying Amazon reservoirs) Integração de dados de radar adquiridos com diferentes angulos de incidência para estudos de reservatório na Amazônia. In: Jornadas Latino Americanas de Percepción Remota por Radar, 1., Buenos Aires, AR. 2 Dec., 1996. p.125-131.
- Costa, M.P.F.; Novo, E.M.L.M.; Ahern, F.; Mitsuo II; Mantovani, J.E.; Ballester, V.; Pietsch, R.W. The Amazon floodplain through radar eyes: Lago Grande de Monte Alegre case study. Canadian Journal of Remote Sensing, v. 24 n. 4, p. 339-349 1998.
- Costa, M.P.F; Ahern, F; Novo E.M.L.M; Pietsch, R.W; Noernberg, M.A. Separability of aquatic plants in the Brazilian Amazon using multi-polarization C-band SAR data. In: International Symposium on remote sensing of Environment, 26., Vancouver, Mar 25-29, 1996. Anais. Vancouver: Canadian Remote Sensing Society, 1996a. p.304-309
- Costa, M.P.F; Ahern, F; Novo, E.M.L.M; Pietsch, R.W; Noernberg, M.A. Efeito de dados SAR-C multipolarizados sobre a separabilidade do retroespalhamento de plantas aquáticas no Reservatório de Tucuruí, Amazonia. CDROM, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., Salvador, 14-19 abr. 1996. Anais. São Paulo: Imagem Multimídia, 1996b, p.72-78.
- CTHIDRO Diretrizes Estratégicas para o Fundo de Recursos Hídricos de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. [online] <<http://www.mct.gov.br/fontes/fundos/cthidro.pdf>> 2000.
- Eletronorte Cenários Sócio-Energéticos da Amazonia – 2000-2020. [on line] <[http://www.eln.gov.br/pagina\\_29.htm](http://www.eln.gov.br/pagina_29.htm)> 2000.
- Furch, K.; Junk, W.J. Physicochemical Conditions in Floodplains. In: Junk, W.J. ed. The Central Amazon floodplain. Ecology of a pulsing System. Berlin: Springer, 1997. 525 p.

- Grassberger, P.; Procaccia, I. Measuring the strangeness of strange attractors. Physica D, V.9, p. 189-202, 1983.
- Kantz, H.; Schreiber, T. Nonlinear time series analysis. Cambridge: Cambridge, Nonlinear Science Series, 1999.
- Lima, I. B. T.; Novo, E. M. L.; Ballester, M. V. R.; Ometto, J.P. Role of the macrophyte community in CH<sub>4</sub> production and emission in the tropical reservoir of Tucuruí, Para State, Brazil. Verh. Internat. Limnol, v.27, p.1-3, 2000.
- Lima, I.B. T. Utilização de imagens históricas TM para a avaliação e monitoramento da emissão de CH<sub>4</sub> na UHE Tucuruí. São José dos Campos. 90 p. (INPE – 6821 TDI/642). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, fev. 1998. Projeto FAPESP No 98/4523-0)
- Lima, I.B.T., Rosa, R. R., Novo, E.M.L.M, Victoria, R.L. Análise de campo gradiente e dimensão de Hausdorff-Besicovitch aplicados na dinâmica espaço temporal de ecossistemas aquáticos impactados. [CDROM] In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., Remoto, Foz do Iguaçu, 21 – 26 abr, 2001. Anais. São Paulo: Fábrica de Imagem: 1-3.
- Müller, A.C. Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento. São Paulo: MAKRON Books, 1996.
- Noernberg, M. A; Costa, M.P.F; Novo, E.M.L.M; Ahern, F. Análise de dois diferentes métodos de pre-processamento de dados SAR-C aerotransportados no cálculo do retroespalhamento de plantas aquáticas. [CDROM] In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 8., 15-19 abr. 1996. Anais. São Paulo, Imagem Multimídia, 1996.
- Noernberg, M.A. Discriminação de plantas aquáticas utilizando dados SAR multipolarimétricos na banda C. São José dos Campos. (INPE –6619-TDI/580). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). INPE, dez. 1996a.
- Noernberg, M.A.; Novo, E.M.; Krug, T. The use of biophysical indices and coefficient of variation derived from airborne synthetic aperture radar for monitoring the spread of aquatic vegetation in tropical reservoirs. International Journal of Remote Sensing, v. 20, no. 1, p 67-82, 1999.
- Novo, E.M.L.M.; Costa, M.P.F.; Ávila, J. Multiple frequencies and multiple incidences angle Radar Data for Ground Target Discrimination: Tucuruí reservoir, Amazon. [CDROM] In: GER 97 conference, 24-30 May. 1997. Proceedings. Ottawa: Canadian Remote Sensing Society, 1997.
- Novo, E.M.L.M.; Costa, M.P.F.; Mantovani, J.E. Radarsat exploratory survey on macrophyte biophysical parameters in tropical reservoirs. Canadian Journal of Remote Sensing. v. 24, n. 4, p. 367-375, 1998.



- Novo, E.M.L.M.; Costa, M.P.F.; Mantovani, J.E.; Ballester, V. Radarsat relative backscatter and macrophyte canopy variables: preliminary results for the Tucuruí reservoir and Lago Grande floodplain. [CDROM] In: GER 97 conference, 24-30 May. 1997. Proceedings. Ottawa: Canadian Remote Sensing Society, 1997a.
- Pereira Filho, W. Influência dos Diferentes Tipos de Uso Da Terra em Bacias Hidrográficas Sobre Sistemas Aquáticos da Margem Esquerda Do Reservatório De Tucuruí – Pará. São Paulo. 230p. Tese (Doutorado) - Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, Maio, 2000.
- Pereira Filho, W. Métodos de Integração de Dados de Campo de Sensoriamento Remoto no Estudo da Influência de Características de Bacia de Captação sobre a Concentração de Sedimentos em Suspensão em Reservatório. São José dos Campos, 136p. (INPE-5278-TDI/448) Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 135 pp., 1990.
- Ramos, F. M.; Rodrigues Neto, C.; Rosa, R. R.; Abreu Sa, L.D.; Bolzam, M. J. A. Generalized thermostistical description of intermittency and nonextensivity in turbulence and financial markets. *Nonlinear Analysis*, v 23, p. 3521-3530, 2001.
- Ramos, F. M.; Rosa, R. R.; Rodrigues-Neto, C.; Zanandrea, A. Generalized complex entropic form for gradient pattern analysis of spatio-temporal dynamics. *Physica A*, v. 283, p. 171-174, 2000.
- Rosa; R.R., Sharma, A.S.; Valdivia, J.A. Characterization of Asymmetric Fragmentation Patterns in Spat