



**XXII SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GIA/29  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - XI**

**GRUPO DE ESTUDO DE IMPACTOS AMBIENTAIS- GIA**

**DIRETRIZES PARA ANÁLISE QUANTITATIVA DE EMISSÕES LÍQUIDAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM  
RESERVATÓRIOS DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

**Jorge M. Damázio(\*)**  
CEPEL

**Alexandre M. Medeiros**  
CEPEL

**Silviani Froelich**  
ELETRONORTE

**André C. Cimpleris**  
FURNAS

**Flavia E. C. Farias**  
CHESF

**Maria L. Milazzo**  
ELETROBRAS

**Maria Elvira P. Maceira**  
CEPEL

**Luciana R. L. da Paz**  
CEPEL

**RESUMO**

Este artigo apresenta o primeiro de dois volumes contendo diretrizes para a execução de análises quantitativas de emissões líquidas de GEE de reservatórios artificiais. Este primeiro volume contempla sugestões e recomendações para a execução de medições em campo e análise de dados, visando a obtenção de estimativas de emissões líquidas de GEE referentes ao período coberto pelos programas de medição. Apresentam-se procedimentos para o planejamento e execução de programas de medição; para o cálculo de estimativas de emissões líquidas de GEE e incertezas associadas a partir de dados obtidos nas campanhas.

**PALAVRAS-CHAVE**

Gases de Efeito Estufa, Metodologias para Medições, Gestão Ambiental de Reservatórios, Usinas Hidroelétricas

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Muitas incertezas e abordagens divergentes ainda se interpõem na trajetória de um melhor conhecimento sobre o assunto emissões de gases de efeito estufa (GEE) em reservatórios de usinas hidrelétricas. No sentido de promover a evolução do estado atual de informação sobre o tema, as empresas ELETRONORTE, FURNAS e CHESF, em coordenação com o MME, contando com a coordenação técnica do CEPEL, encaminharam junto a ANEEL o Projeto de P&D "Monitoramento das Emissões de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios de Usinas Hidrelétricas". O projeto se constitui em importante apoio à contribuição brasileira na Força Tarefa em Gerenciamento do Balanço de Carbono de Reservatórios de Água Doce (Annex XII: Managing the Carbon Balance in Freshwater Reservoir) em desenvolvimento no âmbito das atividades do Grupo de Trabalho em Hidroeletricidade da Agência Internacional de Energia (IEAHYDRO) sob a coordenada pelo CEPEL.

Dentre os objetivos do projeto se incluem: (i) estabelecimento de arcabouço de referência e diretrizes para execução de análises quantitativas de emissões líquidas de GEE em reservatórios artificiais; (ii) realização de medições em campo num conjunto de usinas hidroelétricas (existentes e planejadas) representativas dos diversos biomas brasileiros. Quanto ao primeiro objetivo, foi planejada a publicação de documento técnico de referência abrangendo recomendações e procedimentos para a execução de medições no campo, análise de dados e modelagem, sendo a publicação feita em dois volumes: Volume 1 – Programas de Medição e Análise de Dados (1) e Volume 2 – Modelagem. O primeiro volume foi publicado em novembro de 2012 e o segundo encontra-se em fase de preparação e tem a sua publicação prevista para outubro de 2013.

(\*) Av. Horácio Macedo, n° 354 – sala 220 – CEP 21.941-911 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil  
Tel: (+55 21) 2598-6086 – Fax: (+55 21) 2598-6482 – Email: damazio@cepel.br

A elaboração do Volume 1 envolveu uma série de atividades, incluindo a produção de uma revisão bibliográfica do estado da arte do conhecimento existente sobre o ciclo de carbono em reservatórios que também gerou uma publicação (2); revisão dos trabalhos realizados por diversas instituições no Brasil e organizações como IPCC e IHA; identificação e comunicação com fontes que cobrem a gama de práticas da indústria e da experiência de cientistas e acadêmicos, e também a reunião do conhecimento recolhido da contribuição dos especialistas indicados pelos países membros da Força-Tarefa da IEA/HYDRO. Este artigo apresenta uma síntese do Volume 1.

### 1.1 O Conceito de Emissões Líquidas de Gases de Efeito Estufa em um Reservatório Hidrelétrico

Um conceito extremamente importante e constante do volume 1 é o de emissões líquidas de GEE de um reservatório, definida como a diferença entre os balanços pós-enchimento e pré-enchimento de emissões e remoções de GEE, excluindo-se do primeiro balanço, emissões provenientes de outras fontes antropogênicas não relacionadas ao reservatório (UAS<sup>1</sup>).

## 2.0 - ANÁLISE QUANTITATIVA DE EMISSÕES LÍQUIDAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM RESERVATÓRIOS

A construção e a operação de qualquer reservatório introduzem na correspondente área inundada um regime de armazenamento e transporte de massa diferente daquele existente antes do enchimento do reservatório. Em particular, ao se executar uma análise quantitativa de emissões líquidas para um reservatório, o foco se concentra em dois tipos de diferenças entre os regimes pré- e pós-enchimento: diferenças nos fluxos<sup>2</sup> de GEE entre a atmosfera e a superfície e diferenças nas taxas de sedimentação permanente de carbono. No caso dos fluxos de GEE, as análises se concentram nos fluxos de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. Portanto, a atenção principal está nos processos que afetam o armazenamento e o transporte de carbono e nitrogênio.

### 2.1 Modelo Conceitual

Na abordagem adotada nestas diretrizes, os balanços de emissões e remoções de GEE correspondentes ao regime antes do enchimento do reservatório são chamados de emissões de GEE pré-enchimento e os balanços de emissões e remoções de GEE correspondentes ao regime pós-enchimento são chamados de emissões de GEE pós-enchimento. Nos balanços pós-enchimento devem ser excluídas as emissões de GEE que podem ser atribuídas a fontes antropogênicas não relacionadas com o reservatório. Finalmente, o termo emissões líquidas de GEE é utilizado para denominar as diferenças entre as emissões de GEE pós-enchimento e as emissões de GEE pré-enchimento. A obtenção de estimativas de emissões pré-enchimento, emissões pós-enchimento e emissões líquidas de GEE para um dado reservatório é feita seguindo um modelo conceitual baseado em (3), onde o sistema estudado é descrito por cinco componentes: a área de inundação, o reservatório, a bacia hidrográfica a montante, as estruturas de defluência e o trecho de rio de jusante onde são descarregadas as defluências.

#### 2.1.1. Área de Inundação

No período pré-enchimento, refletindo as condições ambientais locais, diferentes compartimentos da área de inundação apresentam diferentes regimes de fluxos de GEE entre a superfície e a atmosfera e de taxas de sedimentação permanente de carbono. Para o propósito de análises de emissões líquidas de GEE a área de inundação deve ser dividida esquematicamente em três compartimentos: corpos hídricos, terras alagáveis e terras altas. O compartimento corpos hídricos inclui toda a parte da área de inundação que já é inundada o ano inteiro, como os trechos de rios, córregos e lagos; o compartimento terras alagáveis corresponde à área cujos terrenos são alagados ou saturados somente nos períodos mais úmidos; e o compartimento terras altas responde pelo restante da área de inundação. Pode ser necessário subdividir alguns desses três compartimentos para que se possa melhor representar a sua heterogeneidade na área de inundação. Por exemplo, quando uma parte substancial dos corpos hídricos abrange lagos, o compartimento deve ser subdividido nos subcompartimentos rios/córregos e lagos.

#### 2.1.2. Reservatório

No período pós-enchimento, um novo regime para os fluxos de GEE entre superfície e atmosfera e para as taxas de sedimentação permanente de carbono se instala na área de inundação. As rotas que devem ser consideradas

<sup>1</sup> UAS – *unrelated anthropogenic sources*

<sup>2</sup> Define-se como fluxo a taxa temporal de transferência de massa através de uma superfície. O fluxo é considerado positivo se a transferência de massa ocorre para fora do setor de armazenamento foco do estudo, por exemplo, do reservatório para a atmosfera. Um fluxo positivo é denominado emissão. No contexto de mudanças do clima, o termo emissão é usado em situações quando a razão de mistura da atmosfera (ou concentração) para certo gás de efeito estufa cresce devido à liberação de gases, por exemplo, provocada pelo uso da terra. De outra forma, absorções da atmosfera são chamadas de remoções (ou emissões negativas). Se o balanço resultante das emissões no espaço e no tempo para uma área da superfície (usualmente chamado de emissões líquidas) é positiva, a área é chamada de fonte, se o balanço é negativo, a área é chamada de sumidouro. Uma área pode ser uma fonte significativa ou um sumidouro significativo somente se o balanço resultante das emissões persistir por mais de um ciclo anual.

para fluxos de GEE através da interface água-ar são os fluxos difusivos e ebulitivos. Os fluxos ebulitivos (basicamente CH<sub>4</sub>) ocorrem principalmente nas regiões rasas do reservatório. Um novo regime de taxas de sedimentação permanente de carbono se instala na zona de sedimentação do reservatório. Para o propósito de avaliações quantitativas de emissões de GEE, o reservatório pode ser dividido esquematicamente em compartimentos que refletem as diferentes características hidrodinâmicas e, portanto, o impacto relativo sobre a qualidade da água. Por exemplo, para a análise de fluxos difusivos é usual considerar uma estratificação da superfície do reservatório com quatro estratos: montante, meio do reservatório, enseadas e região próxima à barragem.

### 2.1.3. Bacia Hidrográfica a Montante

As substâncias contendo carbono e nitrogênio que são coletadas pelo sistema de drenagem da bacia hidrográfica a montante são carregadas através do sistema fluvial ao reservatório onde a atividade microbiana eventualmente as converte em GEE. Medições dos conteúdos de carbono e nitrogênio nas afluentes ao reservatório são importantes para o entendimento, a calibração de modelos, e a previsão do regime de fluxos de GEE na interface água-ar do reservatório.

### 2.1.4. Estruturas de Defluência

A emissão de GEE nas defluências por mudança brusca de pressão hidrostática nas estruturas de defluência (turbinas e vertedouros) ("degassing") é uma rota para emissões de GEE introduzida pelo reservatório e deve ser considerada ao se estimar os balanços pós-enchimento de emissões e remoções de GEE.

### 2.1.5. Trecho de Rio de Jusante

O regime de fluxos de GEE na interface água-ar no trecho de rio a jusante do barramento é alterado como consequência das modificações de concentrações de gases dissolvidos na água descarregada para jusante pela operação do reservatório. Estes fluxos devem ser considerados nos cálculos de balanços pré-enchimento e pós-enchimento de emissões e remoções de GEE. Medições das quantidades de carbono e nitrogênio nas vazões defluentes do reservatório através do sistema fluvial são importantes para o entendimento, a calibração de modelos e a previsão de fluxos de GEE entre superfície e atmosfera no período pós-enchimento.

## 2.2 Procedimentos Gerais para Quantificação de Emissões Líquidas de GEE

### 2.2.1. Horizonte, Campanhas de Medição e Modelagem

As estimativas de emissões líquidas de GEE de reservatórios podem ser obtidas para diferentes horizontes. Em estudos cujo objetivo é coletar informação para o avanço do conhecimento científico sobre o fenômeno, mesmo horizontes de tempo relativamente curtos fornecem informações valiosas, embora o horizonte mínimo de um ano seja necessário para se observar efeitos sazonais (variações intra-anuais). As flutuações multianuais de clima e a dinâmica da decomposição da biomassa inundada só podem ser avaliadas considerando horizontes com alguns anos. Para estudos de horizonte de curto prazo, campanhas de medições cuidadosamente planejadas e bem executadas, fornecem dados valiosos que, em conjunto com modelagens simplificadas para interpolação espacial e temporal, permitem estimar fluxos de GEE entre superfície e atmosfera e taxas de sedimentação permanente de carbono tanto para o período pré-enchimento como para o período pós-enchimento.

Se o objetivo do estudo é fornecer informações para uma análise de ciclo de vida (ACV) para o reservatório, deve ser utilizado um horizonte de tempo de 100 anos (4) (5) considerado como iniciando na data do enchimento do reservatório. Neste tipo de estudo, as estimativas dos fluxos de GEE entre superfície e atmosfera e das taxas de sedimentação permanente de carbono para os anos futuros (e passados, no caso de reservatórios existentes) podem ser calculadas através da aplicação de modelos. Constantes e parâmetros dos modelos a serem utilizados nestes cálculos podem ser estabelecidos por medições específicas, busca na literatura ou por calibração com estimativas de curto prazo de emissões obtidas de campanhas de medição no sítio do reservatório. As estimativas calculadas pela aplicação destes modelos são usualmente denominadas de previsões.

### 2.2.2. Regras Gerais para Cálculo de Estimativas

As seguintes regras devem ser aplicadas para o cálculo de estimativas de emissões líquidas de GEE para reservatórios:

- Os cálculos devem ser feitos separadamente para cada gás e para cada condição (pré e pós enchimento);
- As estimativas das taxas de sedimentação permanente de carbono devem ser consideradas junto das estimativas dos fluxos de CO<sub>2</sub><sup>3</sup>;

<sup>3</sup> No período pré-enchimento, toda sedimentação permanente de carbono nos lagos e nas terras alagáveis pode ser concebida como originária de remoções de CO<sub>2</sub> da atmosfera e podemos considerar que taxa de sedimentação permanente de carbono como uma parcela a ser abatida no balanço dos fluxos de CO<sub>2</sub> entre a área de inundação e a atmosfera. No período pós-enchimento, o reservatório aumenta a taxa de sedimentação permanente de carbono, interferindo com a destinação do carbono.

- O balanço das estimativas de fluxos entre superfície e atmosfera de um gás específico para as condições da fase de pré-enchimento fornece a estimativa das emissões pré-enchimento deste gás;
- O balanço das estimativas de fluxos de um gás específico entre a superfície e a atmosfera para as condições pós-enchimento fornece a estimativa das emissões pós-enchimento deste gás;
- Estimativas das emissões de um gás específico que podem ser atribuídas a fontes antropogênicas não relacionadas com o reservatório devem ser excluídas nos balanços de fluxos para estimativa das emissões pós-enchimento do gás.
- Diferenças entre estimativas de emissões pós-enchimento e emissões pré-enchimento de certo gás fornecem estimativas de emissões líquidas para aquele gás.

A Figura 1 ilustra a aplicação da regra para cálculo de emissões líquidas de CO<sub>2</sub> com o modelo conceitual descrito no item 3.1.

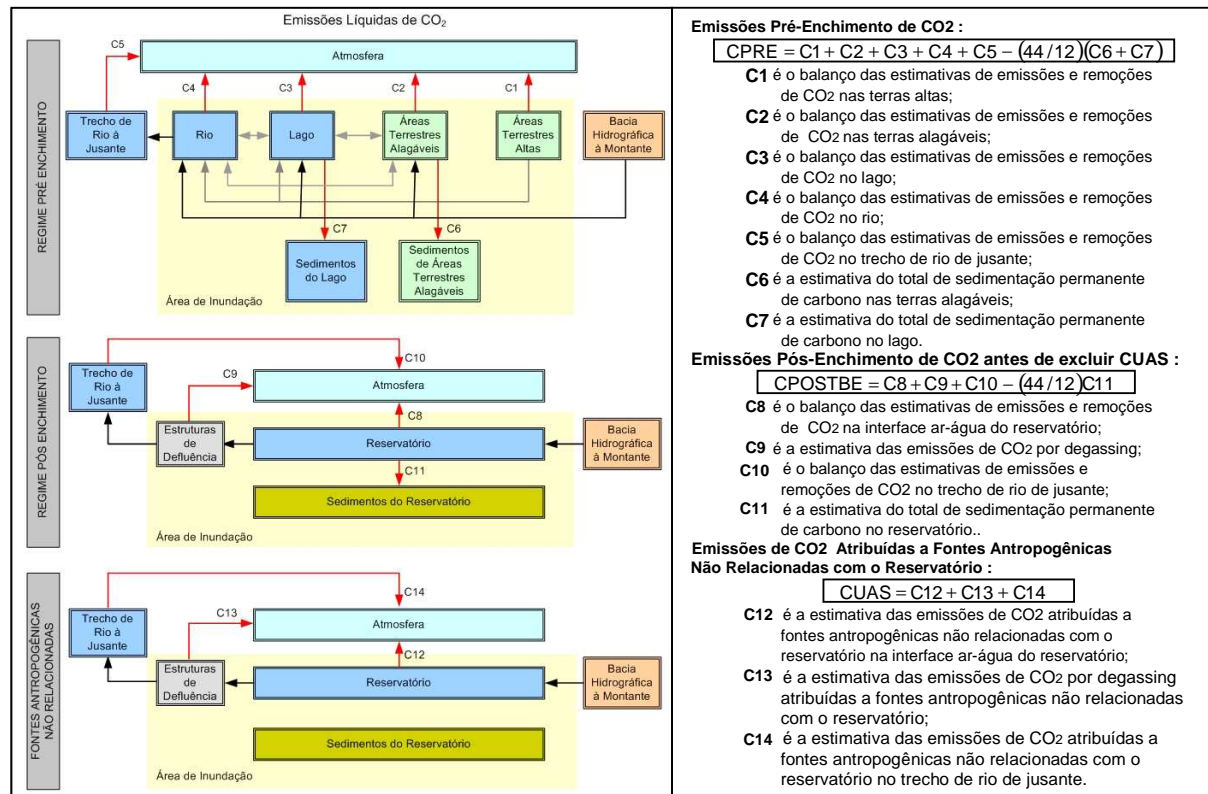


Figura 1: Aplicação das regras para a estimacão de emissões líquidas de CO<sub>2</sub>

Utilizando os parâmetros definidos na figura 1, a estimativa das *emissões pós-enchimento* de CO<sub>2</sub> é obtida por:

$$CPOST = CPOSTBE - CUAS \quad (1)$$

ou por:

$$CPOST = [C8 + C9 + C10 - (44/12)C11] - [C12 + C13 + C14] \quad (2)$$

A estimativa das emissões líquidas de CO<sub>2</sub> é dada por:

$$CNET = CPOST - CPRE \quad (3)$$

ou por:

$$CNET = C8 + C9 + C10 - (44/12)C11 - C12 - C13 - C14 - C1 - C2 - C3 - C4 - C5 + (44/12)(C6 + C7) \quad (4)$$

### 2.2.3. Estimativas de emissões líquidas equivalentes em CO<sub>2</sub>

As estimativas de emissões líquidas de cada gás são usualmente combinadas utilizando como referencia o CO<sub>2</sub>, obtendo-se desta forma uma estimativa de emissões líquidas equivalentes em CO<sub>2</sub>. A combinação é feita somando-se as estimativas de emissões líquidas de cada gás multiplicadas por coeficientes:

$$CO_{2eq}NET = CNET + \lambda_M \cdot MNET + \lambda_N \cdot NNET \quad (5)$$

Os valores dos coeficientes  $\lambda_M$  e  $\lambda_N$  devem refletir respectivamente as contribuições relativas ao longo do tempo de emissões de 1 kg de CH<sub>4</sub> e 1 kg de N<sub>2</sub>O para as mudanças climáticas quando comparadas com as contribuições de emissões de 1 kg de CO<sub>2</sub>.

Embora outros critérios possam ser sugeridos, nós optamos por sugerir o mesmo critério usado para o período pré-enchimento.

#### 2.2.4. Regras Gerais para Calcular as Incertezas

É considerado uma boa prática anexar às estimativas avaliações de incerteza sob a forma de intervalos com 95% de probabilidade de conter o “valor verdadeiro”. A abordagem recomendada é modelar os erros de estimação (diferenças entre estimativas e “valores verdadeiros”) como variáveis aleatórias com média zero (livres de erros sistemáticos) e variâncias finitas, e adotar procedimentos padrões para relato de incertezas em medições (6). Nesta abordagem, as incertezas inerentes às estimativas são avaliadas em termos de dois parâmetros: a incerteza padrão, caracterização numérica de dispersão de possíveis estimativas no entorno do valor verdadeiro, definida como:

$$u(\hat{x}) = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (v - \hat{x})^2 f_{(\hat{x}-x)}(v - \hat{x}) dv} \quad (6)$$

onde:

$\hat{x}$  é a estimativa do “valor verdadeiro”  $x$ ,

$u(\hat{x})$  é a incerteza padrão da estimativa,

$f_{(\hat{x}-x)}(\cdot)$  é a função densidade de probabilidade para os erros de estimação

e os graus de liberdade, caracterização numérica da incerteza na estimação da incerteza padrão, dado pela metade do quadrado do inverso da incerteza padrão proporcional da incerteza padrão<sup>4</sup>:

$$\nu_{\hat{x}} = \frac{1}{2} \left( \frac{u(\hat{x})}{u(\hat{x})} \right)^{-2} \quad (7)$$

Intervalos simétricos aproximados<sup>5</sup> de 95% entorno da estimativa são construídos usando:

$$\hat{x} \pm t_{97.5\%, \nu_{\hat{x}}} u(\hat{x}) \quad (8)$$

onde:

$t_{97.5\%, \nu_{\hat{x}}}$  é o quantil de 97.5% da distribuição t de Student com  $\nu_{\hat{x}}$  graus de liberdade.

O intervalo na equação (3) deve ser interpretado como tendo 95% de probabilidade de conter o valor verdadeiro  $x$ :

$$P[\hat{x} - t_{97.5\%, \nu_{\hat{x}}} u(\hat{x}) \leq x \leq \hat{x} + t_{97.5\%, \nu_{\hat{x}}} u(\hat{x})] = 95\% \quad (9)$$

A propagação das incertezas pode ser feita de forma aproximada considerando somente as derivadas de primeira ordem (6)

### 3.0 - ANÁLISE QUANTITATIVA DE EMISSÕES PRÉ-ENCHIMENTO

Duas situações são consideradas: Na primeira situação, o reservatório ainda não foi inaugurado e podem ser planejadas e executadas campanhas de medição para avaliar os regimes predominantes na área que será inundada de fluxos de GEE entre superfície e atmosfera e de taxas de sedimentação permanente de carbono. A segunda situação ocorre quando o reservatório já foi construído. Neste caso os regimes predominantes, na área que foi inundada, de fluxos de GEE entre superfície e atmosfera e de taxas de sedimentação permanente de carbono devem ser estimados considerando uma linha de base correspondente às condições sem o reservatório construído.

#### 3.1 Quantificações de Emissões Pré-enchimento em Reservatórios Planejados

As estimativas de emissões pré-enchimento para reservatórios planejados devem ser calculadas a partir de i) medições de fluxos entre superfície e atmosfera para os três gases de efeito estufa considerados ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ) feitas em pontos distribuídos espacialmente na área de inundação e no trecho de rio de jusante e; ii) medidas de taxas de sedimentação permanente de carbono feitas em pontos distribuídos espacialmente nos subcompartimentos terras alagáveis e lagos. Os seguintes procedimentos devem ser adotados:

- A distribuição espacial dos pontos de medição na área de inundação deve levar em conta a divisão da área de inundação conforme descrita no item 2.1. Cada subcompartimento deve ser mapeado e sua área medida e preparada uma tabela com as áreas de cada subcompartimento. A área do trecho de rio de jusante também deve ser medida.

- As distribuições espaciais dos pontos de medição em cada subcompartimento da área de inundação e no trecho de rio de jusante devem ser definidas de forma aleatória.

- Diferentes técnicas podem ser utilizadas nos pontos de medição para medir fluxos de GEE entre superfície e atmosfera e taxas de sedimentação permanente de carbono. Descrições destas técnicas de medição podem ser encontradas em (7) e (8) e os valores medidos devem ser expressos em  $\text{mg.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  e virem acompanhados das correspondentes incerteza padrão e graus de liberdade.

- Em geral, medições contínuas no tempo não são viáveis sendo necessário o planejamento da amostragem temporal considerando as flutuações locais de intensidade luminosa, umidade do solo e temperaturas do ar, água e solo. O ano deve ser dividido em “períodos” e as campanhas de medição programadas para períodos o mais próximo possível dos centros das “períodos”.

<sup>4</sup> Uma justificativa para o uso desta definição e da equação (3) pode ser encontrada em (6) e em (9)

<sup>5</sup> Detalhes dos limites desta aproximação podem ser encontrados em (10) e (11)

- Se durante as campanhas de campo algumas condições ideais forem atendidas<sup>6</sup>, a simples média aritmética das medições pode fornecer uma estimativa adequada para o fluxo médio de GEE ou para a taxa média de sedimentação permanente. Na prática, a mediana dos valores medidos é usualmente considerada como uma estimativa melhor do fluxo médio de GEE ou da taxa média de sedimentação permanente, sendo um método de estimar mais robusto, fornecendo proteção contra a ocorrência de valores extremos e também contra casos de diferentes precisões nas medições.
- Se a mediana for utilizada, o método de bootstrap (9) deve fornecer a incerteza padrão e o grau de liberdade associados à estimativa.

### 3.2 Quantificações de Emissões Pré-enchimento em Reservatórios Existentes

Se o reservatório já está em operação e foram feitas medições pré-enchimento de fluxos de GEE entre superfície e atmosfera e de taxas de sedimentação permanente de carbono na área de inundação e no trecho de rio de jusante conforme descrito no item 3.1, estarão disponíveis estimativas de longo termo para as emissões pré-enchimento com incertezas associadas. Por outro lado, se as medições pré-enchimento não foram executadas, estimativas para as emissões pré-enchimento podem ser obtidas através de uma busca na literatura ou pela execução de campanhas de medições de fluxos de GEE entre superfície e atmosfera e taxas de sedimentação permanente de carbono em pontos próximos à área de inundação considerando as características biológicas e ambientais. Os seguintes procedimentos devem ser seguidos:

- Uma linha de base deve ser estabelecida para as condições que existiriam atualmente na área de inundação e no trecho de rio de jusante caso o reservatório não tivesse sido construído. A situação da área de inundação e do trecho de rio de jusante por ocasião do enchimento do reservatório pode ser a linha de base mais natural, embora o padrão atual de usos da terra nas áreas vizinhas possa ser usado para construir a linha de base. Deve ser desenvolvida uma divisão da área de inundação para a linha de base em subcompartimentos conforme descrito no item 2.1. A área de cada subcompartimento deve ser estimada e colocada numa tabela.
- Campanhas para medições de fluxos entre superfície e atmosfera para os três gases considerados ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ) e de taxas de sedimentação permanente de carbono devem ser planejadas e executadas em locais escolhidos nas vizinhanças da área de inundação que se assemelham aos subcompartimentos e trechos de rio de jusante da área de inundação da linha de base.
- Alternativamente uma busca na literatura pode fornecer estimativas, acompanhadas de incertezas padrão e graus de liberdade, dos fluxos médios anuais entre superfície e atmosfera para cada GEE para cada subcompartimento e para o trecho de jusante do rio, assim como, para as taxas médias de sedimentação permanente de carbono nas terras altas e nos lagos. Todas estas estimativas devem ser expressas em  $\text{mg.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ . Estas informações podem ser usadas diretamente como substitutas de estimativas de fluxos médios ou taxas médias de sedimentação permanente de carbono obtidas de medições. Cuidados devem ser tomados quando da transferência de informações de incerteza da literatura para valores de incerteza padrão. A incerteza padrão está relacionada como o intervalo centrado na estimativa mais precisa com 67% de chance de conter o “valor verdadeiro”, enquanto que usualmente a literatura fornece intervalos cobrindo todas as estimativas. A incerteza padrão pode ser assumida como se situando entre 1/3 e 1/4 do intervalo de variação das medições. Também, usualmente não existe informação sobre os graus de liberdade, podendo este parâmetro ser definido com base em uma avaliação da incerteza proporcional na incerteza padrão e na equação (7).

## 4.0 - ANÁLISE QUANTITATIVA DE EMISSÕES PÓS-ENCHIMENTO

Estimativas das emissões pós-enchimento de reservatórios existentes são obtidas de forma mais precisa a partir de medições de fluxos de GEE entre superfície e atmosfera para cada rota de emissão e de taxas de sedimentação permanente de carbono feitas na área do reservatório e no trecho de rio de jusante.

### 4.1 Emissões por Difusão

Estimativas de fluxos difusivos de GEE entre superfície e atmosfera tanto para o reservatório como para o trecho de rio de jusante devem ser calculadas para todos os três GEE ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ). Estas estimativas podem ser obtidas por meio de medições feitas num conjunto de pontos de medição espacialmente distribuídos no reservatório e no trecho de rio de jusante. Os seguintes procedimentos devem ser adotados:

- A distribuição espacial dos pontos de medição no reservatório deve levar em conta a estratificação da superfície do reservatório. A estratificação mais comum considera quatro estratos: montante, corpo central, enseadas e áreas próximas à barragem.
- Cada estrato deve ser mapeado e sua área medida. Uma tabela com a área de cada estrato deve ser preparada.
- A técnica mais usual para medição de fluxos difusivos de GEE na interface ar-água é o uso de câmaras de difusão flutuantes. Descrições desta técnica podem ser encontradas em (10), (7) e (8), e na literatura citada nestas referências. Os valores medidos devem ser expressos em  $\text{mg.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$  e serem acompanhados de uma avaliação das correspondentes incertezas padrão e graus de liberdade.
- O planejamento da amostragem espacial temporal deve seguir recomendações similares as descritas no item 3.1, de forma similar para o uso da mediana como estimador robusto.

<sup>6</sup> grande número de pontos de medição, fluxos de GEE na interface água-ar, ou taxas de sedimentação permanentes, flutuando com variância fixa em torno de um valor fixo e sem estrutura de correlação espaço-temporal significativa, precisão uniforme das medições

## 4.2 Emissões por Ebulição

Estimativas de fluxos ebulitivos de GEE pós-enchimento devem ser calculadas somente no reservatório e para o CO<sub>2</sub> e para o CH<sub>4</sub>. Estas estimativas podem ser obtidas por meio de medições feitas num conjunto de pontos espacialmente distribuídos na região do reservatório onde a ebulição pode ocorrer (área de ebulição), o que pode ser considerado como as regiões com profundidade inferior a 20m. Os seguintes procedimentos devem ser adotados:

- Uma estimativa da área de ebulição deve ser mapeada e a sua área medida.
- A distribuição espacial dos pontos de medição na área de ebulição deve ser definida de forma aleatória.
- A técnica mais usual para medição das emissões ebulitivas é o uso de um conjunto de funis invertidos. Descrições dessa técnica de medição de emissões ebulitivas podem ser encontradas no Apêndice 2, em (10), (8) e na bibliografia citada. Os valores medidos devem ser expressos em mg.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> e vir acompanhados das correspondentes incertezas padrão e graus de liberdade.
- O planejamento da amostragem espacial temporal deve seguir recomendações similares as descritas no item 3.1, de forma similar para o uso da mediana como estimador robusto

## 4.3 Degassing

Estimativas de emissões de GEE pós-enchimento por degassing devem ser calculadas para todos os três gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O). Essas estimativas devem ser obtidas a partir de diferenças de medições de concentrações de gases em amostras de água coletadas nas entradas das estruturas de defluência e no trecho de rio de jusante o mais próximo possível das estruturas de defluência multiplicadas pelas vazões descarregadas. Os seguintes procedimentos devem ser adotados:

- Medições de emissões de GEE por degassing para os três gases considerados (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O) devem ser executadas em todas as estruturas de defluência aonde se supõe que pode ocorrer degassing. No caso de reservatórios de hidroelétricas a coleta de amostras de montante deve ocorrer dentro da casa de máquinas, se possível no conduto forçado, antes da passagem da água pelas turbinas.
- A descrição da técnica pode ser encontrada em (8) e na bibliografia citada. Os valores medidos devem ser expressos em mg.d<sup>-1</sup> e vir acompanhados da incerteza padrão e graus de liberdade.

## 4.4 Sedimentação Permanente do Carbono

Estimativas de taxas pós-enchimento de sedimentação permanente de carbono devem ser obtidas por meio de medições feitas num conjunto de pontos espacialmente distribuídos na zona de sedimentação do reservatório. Os seguintes procedimentos devem ser adotados:

- A zona de sedimentação do reservatório deve ser mapeada e a sua área total estimada. A incerteza padrão e os graus de liberdade da estimativa da área da zona de sedimentação do reservatório devem ser avaliados.
- A distribuição espacial dos pontos de medição na zona de sedimentação do reservatório deve ser definida de forma aleatória.
- A técnica mais usual para medição de taxas de sedimentação permanente de carbono é a execução de medições de medidas de concentração de <sup>210</sup>Pb em amostras de sedimentos. Se por um lado esta técnica é apropriada para medição de acumulações de sedimentos ao longo de décadas, métodos alternativos devem ser desenvolvidos para estimar taxas de sedimentação permanente de carbono para intervalos diários.

## 4.5 Emissões de GEE atribuídas a fontes antropogênicas não relacionadas com o reservatório

Conforme os procedimentos gerais descritos no item 2.2, nos balanços de fluxos para estimativas de emissões pós-enchimento de cada gás devem ser excluídas as estimativas de emissões que possam ser atribuídas a fontes antropogênicas não relacionadas com o reservatório. Diversas atividades humanas na área de drenagem de montante podem contribuir para a emissão de GEE no reservatório: assentamentos humanos; estações de tratamento de esgoto (ou falta destas); agricultura, pastagens e indústrias nas margens do reservatório. A eutrofização do reservatório pode vir a ocorrer em decorrência da deposição de nitrogênio oriundo de áreas industriais, de áreas urbanas com tráfego pesado ou de usinas termoeletricas que utilizem combustível fóssil. Áreas impermeabilizadas artificialmente tais como rodovias, construções, etc., elevam o escoamento superficial aumentando o transporte de poluentes para os cursos d'água. A erosão associada à intervenções como drenagem de florestas ou extração de turfas provoca o carreamento de matéria orgânica e substâncias húmicas dissolvidas para os cursos de água. O levantamento destas atividades na área de drenagem de montante fornece meios para identificar a carga de carbono e nutrientes que afetam o regime de fluxos de GEE no reservatório. Se apenas uma pequena quantidade de tal carga for encontrada, então as parcelas das emissões de GEE do reservatório que podem ser atribuídas a fontes antropogênicas não relacionadas com o reservatório são insignificantes e podem ser ignoradas.

Uma atribuição quantitativa que defina com precisão a quantidade de emissão de um certo gás que pode ser atribuída a uma fonte antropogênica específica só é possível através de um experimento controlado, onde se dispusesse de dois reservatórios idênticos, com só um deles sofrendo a influência da fonte antropogênica específica. Na prática, esta situação não ocorre, devendo-se recorrer a modelos de simulação computacional que permitam a atribuição do quantitativo de emissão à fonte, demonstrando-se que emissões medidas no reservatório

são consistentes com as emissões obtidas por simulação do modelo incorporando a presença da fonte antropogênica, e inconsistentes com as emissões obtidas por simulação do modelo na ausência da fonte antropogênica.

## 5.0 - CONCLUSÕES

O artigo apresentou o primeiro de dois volumes contendo diretrizes para a execução de análises quantitativas de emissões líquidas de GEE de reservatórios artificiais. Elaborado por um destacado conjunto de especialistas de renomadas instituições nacionais de pesquisa, estas diretrizes foram desenvolvidas como um instrumento de pesquisa, com o objetivo de avançar no conhecimento acerca do fenômeno das emissões líquidas de GEE no Brasil através de sua aplicação num conjunto de onze hidrelétricas brasileiras – oito em operação e três em estágio de construção – dentro das atividades do projeto de P&D ANEEL – Emissões de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios de Centrais Hidrelétricas, que tem como empresa-proponente ELETRONORTE, e empresas cooperadas, FURNAS e CHESF, em coordenação com o MME e contando com a coordenação técnica do CEPEL.

Este primeiro volume contempla sugestões e recomendações para a execução de medições em campo e análise de dados, visando a obtenção de estimativas de emissões líquidas de GEE referentes ao período coberto pelos programas de medição. Apresentam-se procedimentos para o planejamento e execução de programas de medição; para o cálculo de estimativas de emissões líquidas de GEE e incertezas associadas a partir de dados obtidos nas campanhas. Está em andamento a edição do volume 2, Modelagem, contendo sugestões e recomendações para a formulação, calibração, validação e aplicação de modelos para a obtenção de estimativas de emissões líquidas de GEE em reservatórios referentes a horizontes de longo prazo.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Brasil, Ministério de Minas e Energia, 2012. Diretrizes para a Análises Quantitativas de Emissões Líquidas de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios. Volume 1 – Programas de Medições e Análise de Dados. ISBN 978-85-85996-21-5. 1ª Edição, Rio de Janeiro, Dezembro de 2012.
- (2) Brasil, Ministério de Minas e Energia, 2012. Revisão Bibliográfica. Estado da Arte em Ciclo do Carbono em Reservatórios. ISBN 978-85-85996-20-8. 1ª Edição, Rio de Janeiro, Dezembro de 2012.
- (3) EPRI (2010). The Role of Hydropower Reservoirs in Greenhouse Gas Emissions. EPRI, Palo Alto, CA: 2010. 1017971
- (4) ISO, (2006) ISO14040. 2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, Geneva, International Organization for Standardization.
- (5) Guinée, J. ed (2002). Handbook on Life-Cycle Assesment: Operational Guide to the ISO Standards, Kluwer Academic Publishers.
- (6) JCGM, (2008) JCGM 100: 2008 Guide to Expression of Uncertainty in Measurement. Joint Committee for Guides in Metrology.
- (7) Tremblay A., Varfalvy L., Roehm, C., Garneau M. eds (2005) Greenhouse Gas Emissions - Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments (Environmental Science and Engineering / Environmental Science), Springer
- (8) IHA (2010) GHG Measurement Guidelines for Freshwater Reservoirs, The International Hydropower Association (IHA), London, United Kingdom
- (9) Efron, B.. and Tibshirani, R.J. (1993) An Introduction to the Bootstrap, New York, Chapman&Hall
- (10) FURNAS (2008). Projeto de P&D ANEEL Balanço de Carbono nos Reservatórios de FURNAS Centrais Elétricas S.A., Relatório Final, Furnas Centrais Elétricas S.A., Rio de Janeiro.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Jorge Machado Damazio

Nascido no Rio de Janeiro, RJ, em 16 de fevereiro de 1954.

Doutorado COPPE/UFRJ (1988), Mestrado COPPE/UFRJ (1979) e Graduação UFRJ (1977) em Engenharia Civil.

Empresa: CEPEL, Pesquisador desde 1979.