

## **GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GMA**

### **ESTIMATIVAS DE EMISSÃO DE METANO EM APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS: DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA APLICADO À SITUAÇÃO DE PRÉ-ENCHIMENTO**

**JULIANO LUCAS SOUZA DE ABREU; JORGE MACHADO DAMÁZIO**

#### **RESUMO**

No contexto dos estudos sobre emissões de gases de efeito estufa (GEE) em reservatórios de hidrelétricas, este artigo descreve o desenvolvimento e a calibração de um modelo de qualidade da água, biogeoquímico, sem explicitação espacial (0D), aplicado a canais, para estimativa de emissões em corpos hídricos na fase de pré-enchimento, com ênfase no metano (CH<sub>4</sub>). O modelo foi aplicado ao rio Teles Pires, no Mato Grosso, no trecho alagado pela UHE SINOP, onde predomina o bioma amazônico. Na calibração foram utilizados dados de quatro campanhas de medições na área de estudo entre novembro de 2017 e setembro de 2018.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Modelagem de qualidade da água, Gases de efeito estufa, Hidroeletricidade, Mudanças climáticas

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Estudos em inundações artificiais realizados durante as últimas décadas têm identificado uma interferência significativa nos fluxos de GEE entre a superfície alterada e a atmosfera (1–4). Resultados divergentes de algumas estimativas de emissões em reservatórios (5–7) e a preocupação com os potenciais efeitos sobre as mudanças climáticas globais suscitaram esforços em nível nacional e internacional que permitiram o desenvolvimento de diretrizes para realização de campanhas de campo, análise de dados e cálculo das emissões líquidas de GEE na área inundada e à jusante da barragem (8–11). Apesar do aumento do número de medições e do conhecimento do impacto real dos alagamentos, a busca pela redução das incertezas e melhora da previsibilidade das emissões líquidas em reservatórios de usinas hidrelétricas persiste, sobretudo para os fluxos de metano, cuja geração é favorecida pela formação de zonas submersas com baixa concentração de oxigênio. Acrescenta-se a isso uma intensificação da tendência global de descarbonização energética verificada nos últimos anos e uma crescente demanda e disponibilidade de recursos para hidroelétricas que mitiguem as suas emissões e aumentem a sua capacidade de adaptação e resiliência às mudanças climáticas.

Os modelos de qualidade da água são ferramentas que notadamente colaboram na previsibilidade de resposta a perturbações em ambientes aquáticos. Sendo muito diversificados, uma categoria denominada de modelos biogeoquímicos pode ser aplicada para a simulação de processos do ciclo do carbono e as respectivas concentrações das formas de carbono presentes na água e em compartimentos adjacentes. Com a constante incorporação de novos processos, os modelos têm aumentado a sua complexidade e a confiabilidade dos prognósticos, porém os custos envolvidos tendem a ficar mais altos devido ao grande número de parâmetros de calibração e consequente necessidade de medições locais mais precisas e numerosas.

No contexto dos reservatórios de hidrelétricas, algumas modelagens de carbono já foram realizadas no Brasil (12,13), no entanto, em sua maioria, são estudos em reservatórios maduros e sem avaliação das emissões locais existentes no rio antes do alagamento, chamadas de emissões de pré-enchimento. Com esta perspectiva, este trabalho objetivou desenvolver e calibrar um modelo de qualidade da água, biogeoquímico, sem explicitação espacial (0D), aplicado a canais, para estimativa de emissões em corpos hídricos na fase de pré-enchimento, com ênfase no metano. Procurou-se representar os principais processos que envolvem o ciclo do carbono no ambiente aquático lótico e minimizar o número de parâmetros de calibração. O modelo foi aplicado em trecho dos rios Teles Pires e Verde, antes do alagamento pela implantação do aproveitamento hidrelétrico de SINOP, no Mato Grosso, visando compreender as emissões de pré-enchimento.

Este trabalho está dividido em 4 itens. No item 2 é apresentado o esquema conceitual do modelo, descrita a área de estudo e as etapas para o processo de seleção e calibração de parâmetros para o caso aplicado. No item 3 são apresentados os principais resultados da análise de sensibilidade e dos experimentos de calibração. E a conclusão do estudo é apresentada no item 4.

## 2.0 - MATERIAIS E METODOS

### 2.1 - O modelo

Para a simulação dos processos foi desenvolvido um modelo do tipo biogeoquímico, adaptado para estimar as emissões dos corpos hídricos de uma região antes do alagamento (emissões de pré-enchimento), o modelo teve como base o modelo CICLAR (12), com algumas modificações e incorporações de aspectos encontrados nos modelos CE QUAL W2, SisBaHiA, Lake 2.0 e ELGEE/ BALCAR (14–16). Sem explicitação espacial (0D), o sistema é idealizado como um reator homogêneo em que as concentrações na vazão de entrada se misturam completamente e instantaneamente, interagindo entre si, com os compartimentos vizinhos ar e sedimento, e saindo na vazão de saída nas mesmas concentrações do sistema. A vazão de entrada é constante e equivalente à vazão de saída, logo o volume do sistema permanece inalterado no período de modelagem. A Figura 1 apresenta o esquema conceitual criado para o modelo.

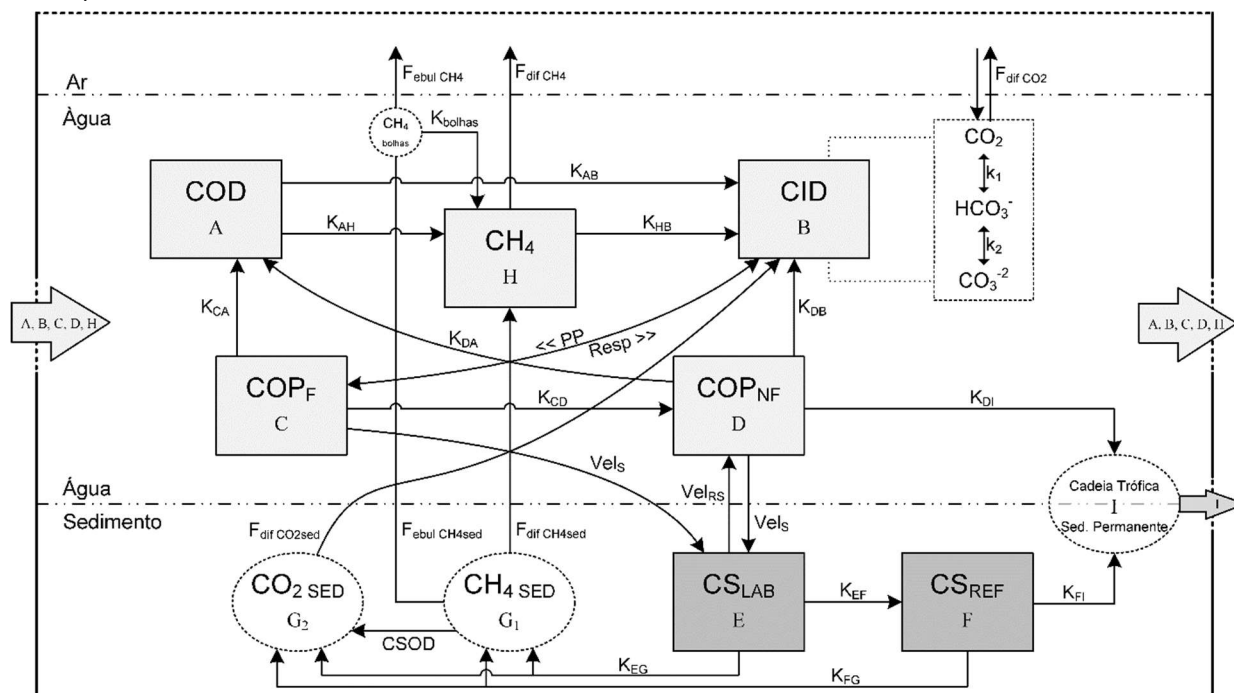


Figura 1 – Esquema conceitual criado para o modelo.

O carbono na água foi dividido em 5 grupos de variáveis-estado: COD (carbono orgânico dissolvido), CID (carbono inorgânico dissolvido),  $\text{COP}_F$  (carbono orgânico fotossintetizante),  $\text{COP}_{NF}$  (carbono orgânico não-fotossintetizante) e  $\text{CH}_4$ . Dentro do CID, são calculadas as concentrações das 3 formas que compõem o sistema carbonato ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$ ), através do pH. No sedimento, o carbono é encontrado nas formas lábil e refratária, a degradação de ambas geram  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ , que retornam para água na forma dissolvida ou em bolhas, no caso do metano. As emissões para a atmosfera são computadas pelos fluxos difusivo e ebulitivo de  $\text{CH}_4$  e pelo fluxo difusivo de  $\text{CO}_2$ . Também foram criados sumidouros na água e no sedimento para permitir perdas de carbono para níveis tróficos superiores e sedimentação permanente, respectivamente. A vazão de entrada e a de saída do sistema são computadas em  $\text{m}^3.\text{dia}^{-1}$ , as concentrações das variáveis-estado em  $\text{mg}.\text{m}^{-3}$  de carbono, as taxas de transferência de massa entre as variáveis-estado de um mesmo compartimento  $K$  e  $PP$  em  $\text{dia}^{-1}$ , e as transferências entre os compartimentos ar-água,  $F$ , e sedimento-água,  $Vel$ , respectivamente em  $\text{mg}.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  e em  $\text{m}.\text{dia}^{-1}$ .

Algumas das transferências foram detalhadas e modeladas por equações específicas, introduzindo novos parâmetros no modelo. Os fluxos difusivos de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  na interface ar-água são estimados em função da turbulência na camada limite líquida (17) e das concentrações de cada gás em equilíbrio com a atmosfera (18,19). Os fluxos difusivos de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  na interface sedimento-água são obtidos através da modelagem da degradação do carbono no sedimento, com produção de metano em uma camada anaeróbica e posterior consumo em camada aeróbica, dada a concentração de oxigênio na superfície do sedimento (20). O fluxo ebulitivo é calculado em função do excesso de  $\text{CH}_4$  produzido no sedimento que não foi degradado nem transportado por difusão, da altura média da coluna d'água e do raio inicial da bolha, em uma interpolação simplificada baseada na modelagem em McGinnis et al. (2006). A fotossíntese do fitoplâncton também é modelada por equação específica, na qual é computada a incidência de luz devido à variação da altitude solar (12,14,15). Em paralelo, também é realizado um balanço térmico para alimentação dos parâmetros dependentes da temperatura da água. Nesse balanço são consideradas a incidência de radiação líquida de ondas curtas devido à variação da altitude solar e nebulosidade, a radiação atmosférica líquida de ondas longas, a radiação emitida pela água e o calor transmitido por condução e por evaporação (14,22).

O modelo atingiu o total de 51 parâmetros, alguns diretamente associados às transferências de carbono entre as variáveis-estado ou aos próprios fluxos para a atmosfera, outros associados ao modelo de balanço térmico ou à diagênese no sedimento. Antes de qualquer avaliação sobre a significância de cada parâmetro para os resultados das variáveis-estados, foram definidas faixas de valores permitidos para cada parâmetro e assumido um valor inicial provável de acordo com revisões na literatura, aplicações em outros modelos e visualização de gráficos após algumas rodadas preliminares. Detalhes da formulação matemática e da implementação computacional do modelo podem ser encontrados em Abreu (2021).

## 2.2 - Área de estudo, campanhas e tratamento de dados

A UHE SINOP está localizada no curso médio alto do rio Teles Pires, no estado do Mato Grosso, cuja bacia hidrográfica possui área de aproximadamente 150.000 km<sup>2</sup>, sendo 61.430 km<sup>2</sup> à montante da barragem. O rio transita entre os biomas cerrado e amazônico, com predomínio do amazônico na área de inundação. O modelo foi aplicado na área de corpos hídricos da região a ser alagada, que corresponde a aproximadamente 57,12 km<sup>2</sup> dos 342,82 km<sup>2</sup> da área máxima de inundação do reservatório, este em fase de construção durante as campanhas de medição. A área modelada é composta pela calha do rio, lagoas perenes, lagoas intermitentes, brejos e solos alagados. A Figura 2 apresenta a área modelada e a malha amostral da coleta de dados.

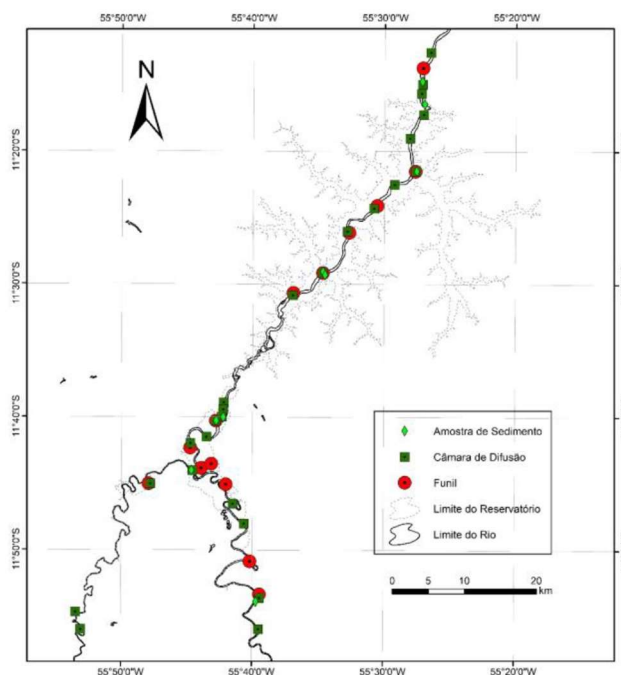


Figura 2 – Malha amostral das campanhas realizadas na área de recursos hídricos da fase pré-enchimento do aproveitamento hidrelétrico de Sinop.

Quatro campanhas de campo foram realizadas entre novembro de 2017 e setembro de 2018, espaçadas ao longo do ano. Foram medidos valores de concentração de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, COD, COP e clorofila-a na água, fluxos difusivos e ebulitivos dos gases na interface ar-água, fluxos difusivos na interface sedimento-água, matéria orgânica lábil e refratária no sedimento, entre outras variáveis físico-químicas. As medições foram feitas pela COPPE/UFRJ e pelo IIEGA (24,25).

O tratamento dos dados de cada variável medida foi realizado em 3 etapas. Inicialmente foi feita a seleção dos pontos amostrais que corresponderiam aos valores das condições de contorno de entrada para as variáveis-estado de concentração na água, deixando as medições dos demais pontos como dados para a calibração do modelo. Em seguida foi realizada a retirada de outliers. Em uma segunda etapa foi feita a separação dos dados por campanha e uma nova retirada de outliers. Em uma última etapa, para as variáveis em que havia medições na superfície e no fundo do rio foi calculada uma média para a coluna d'água e realizada mais uma retirada de outliers. A média dos conjuntos de dados restantes foi utilizada como valor representativo para cada variável em cada campanha, tanto para as condições de contorno como para dados de calibração.

## 2.3 - Análise de sensibilidade e etapas de calibração

Um procedimento de análise de sensibilidade foi realizado, através de critérios estabelecidos e segmentados em mais de uma etapa, com os objetivos de fixar parâmetros menos sensíveis em valores obtidos na literatura, identificar parâmetros que são possivelmente melhor calibrados com medições específicas e selecionar um número reduzido de parâmetros para calibrações com os resultados da simulação. Foi avaliada a interferência dos parâmetros nas variáveis-estado e nas transferências calculadas explicitamente, como os fluxos intercompartimentais. Na análise de

sensibilidade optou-se por uma variação do método One at a Time (OAT), descrito em Yuan et al. (2015). Mais detalhes do procedimento de análise de sensibilidade estão descritos em Abreu (2021).

As calibrações por medições específicas consistiram em um procedimento sem a simulação das variáveis-estado, quando era possível fazer um delineamento de uma parte do modelo conceitual associada à um subconjunto de processos representados, em que havia dados de entrada e de saída medidos nas campanhas de campo e cujos parâmetros envolvidos não tinham relação direta com processos fora dessa fronteira. Ou seja, foi fundamental verificar que a interferência do parâmetro nas variáveis-estado ocorria essencialmente pelo subconjunto de processos em calibração. Este procedimento objetivou isolar a variabilidade de alguns fenômenos representados das demais incertezas associadas à própria simulação, permitindo um ganho de realidade na representação dos respectivos processos e ainda prestando um co-benefício de reduzir os parâmetros a serem priorizados para a calibração pelos resultados da simulação.

Os experimentos de calibração utilizando os resultados da simulação correspondem a etapa final de calibração em que os parâmetros, com exceção dos selecionados para a calibração nesta etapa, foram todos fixados em valores da literatura ou em valores obtidos nas calibrações por medições específicas, em consonância com o resultado obtido pela análise de sensibilidade. A calibração se deu pela minimização de uma função objetivo dada pela soma dos desvios ao quadrado dos valores das variáveis obtidas entre 7h e 18h do último dia da simulação em relação à média dos dados medidos, divididas pela respectiva variância das medições de cada variável. Ainda foi dado um peso para cada variável para compor o custo de cada campanha (ver Quadro 1) e, para o experimento em que foi considerada mais de uma campanha, o custo total correspondeu a soma dos custos das campanhas. Foram realizados dois experimentos de calibração, o primeiro considerando apenas a 3ª campanha e o segundo considerando as 4 campanhas realizadas.

Quadro 1 – Variáveis e pesos considerados na função objetivo

Variável	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	COD	COP <sub>F</sub>	COP <sub>NF</sub>	CSlab	F. Difusivo. CH <sub>4</sub>	F. Ebulitivo CH <sub>4</sub>
Peso	5	3	3	2	0,5	20	5	5

Em virtude da possível característica multimodal da função objetivo, observada também em modelos hidrológicos (27), e de bons resultados, para modelos semelhantes, na estimação de parâmetros por algoritmos do tipo soft, com estratégias de otimização global (28–30), optou-se pela utilização de uma variação do algoritmo *Artificial Bee Colony* (31) tanto nas calibrações por medições específicas quanto nos experimentos de calibração pelos resultados da simulação.

### 3.0 - RESULTADOS

Partindo do total de 51 parâmetros, o procedimento de análise de sensibilidade utilizado demonstrou ser uma boa estratégia para reduzir o número de parâmetros a serem calibrados no modelo. Para 23 parâmetros (45%), verificou-se que as variações destes dentro dos respectivos intervalos de incerteza levaram a alterações insignificantes nos resultados do modelo.

Para as calibrações por medições específicas foram delineados 3 subconjuntos de processos para serem calibrados e selecionados 12 parâmetros do modelo: (i) o balanço térmico, em que 3 parâmetros foram calibrados de acordo com as temperaturas da água medidas; (ii) a turbulência na interface ar-água, em que 2 parâmetros foram calibrados pela medições de fluxos difusivos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> na interface ar-água e; (iii) processos que ocorrem nos sedimentos em que 7 parâmetros foram calibrados pelas medições de fluxos difusivos na interface sedimento-água e pelo fluxo ebulitivo de CH<sub>4</sub>.

Em etapa final do procedimento de análise de sensibilidade foram priorizados 6 parâmetros para serem calibrados pelos resultados de simulação. Devido às interrelações entre as variáveis-estado, o conjunto dos 6 parâmetros selecionados representaram os 4 parâmetros mais sensíveis para a concentração de metano na água, os 2 mais sensíveis para o CS<sub>LAB</sub>, o COD, o COP<sub>F</sub>, o COP<sub>NF</sub> e o mais sensível para o CID. A Tabela 1 apresenta o total de parâmetros calibrados na simulação ou por medições específicas.

Tabela 1 - Total de parâmetros calibrados na simulação ou por medições específicas.

Nome do parâmetro (abreviaturas/símbolos)	Calibração	Intervalo de valores permitidos	Unidade do Parâmetro
Umidade relativa média do ar (UR)	Bal. térmico	(0,5 – 0,75)	ad.
Atenuação atmosférica de ondas longas (atmCoefAten)	Bal. térmico	(0,45 – 0,75)	ad.
Porcentagem de horas do dia, em média, com nuvens (nuvens)	Bal. térmico	(0 – 0,7)	ad.
Declividade média aparente do trecho do rio modelado (declivMédia)	Turbulência	(1e-4 – 0,001)	m
Coefficiente de ajuste da vel. média em função da vazão do rio (velMpar)	Turbulência	(0,01 – 3)	ad.
Espessura média do sedimento ativo (H <sub>sed</sub> )	Sedimentos	(0,02 – 0,3)	m
Taxa de oxidação do CH <sub>4</sub> dissolv. na zona aerób. do sedim. a 20°C (K <sub>C20°</sub> )	Sedimentos	(1000 – 1e4)	dia <sup>-1</sup>
Taxa de degradação anaeróbica do carb. lábil no sedim. a 20°C (K <sub>eg20°</sub> )	Sedimentos	(0,0018 – 0,05)	dia <sup>-1</sup>
Raio inicial médio das bolhas de metano ao sair do sedimento (r <sub>i_bolhas</sub> )	Sedimentos	(0,001 – 0,01)	m
Razão estequiométrica média entre N e C na mat. org. (θ <sub>NC</sub> )	Sedimentos	(0,05 – 0,43)	ad.

Nome do parâmetro (abreviaturas/símbolos)	Calibração	Intervalo de valores permitidos	Unidade do Parâmetro
Coefficiente de temperatura da degradação. do C lábil no sedimento ( $\theta_{\text{keg}}$ )	Sedimentos	(1,01 – 1,20)	ad
Trecho do períim. molhado da seção sem deposição de sedim. ( $\text{Tr}_{\text{Ssed}}$ )	Sedimentos	(0 - 225)	m
Taxa de metanogênese na coluna d'água a 20°C ( $K_{\text{ah}20^\circ}$ )	Simulação	(0 – 2,4)	dia <sup>-1</sup>
Taxa de metanotrofia na coluna d'água a 20°C ( $K_{\text{hb}20^\circ}$ )	Simulação	(0,01 - 5)	dia <sup>-1</sup>
Taxa de mineralização do COD a 20°C ( $K_{\text{ab}20^\circ}$ )	Simulação	(0,02 – 0,3)	dia <sup>-1</sup>
Taxa de fotossíntese máxima a 20°C ( $K_{\text{p}20^\circ}$ )	Simulação	(0,2 – 8)	dia <sup>-1</sup>
Velocidade de sedimentação ( $\text{Vel}_s$ )	Simulação	(0 - 30)	m.dia <sup>-1</sup>
Velocidade de ressuspensão de sedimentos ( $\text{Vel}_{\text{RS}}$ )	Simulação	(0 - 2)	m.dia <sup>-1</sup>

### 3.1 - Calibrações por medições específicas

A Figura 3 apresenta na parte esquerda as temperaturas simuladas com os parâmetros nos valores iniciais e na direita as simuladas após a calibração. O resultado mostra que a simulação da 4ª campanha é a que menos se aproxima da temperatura medida. Este resultado é consistente com as incertezas associadas às medições e que foram utilizadas para ponderar o custo entre as campanhas. O valor dos parâmetros após a calibração foram: UR = 52%, atmCoefAten = 0,45 e nuvens = 0,029. O ajuste das temperaturas estimadas pelas medidas obteve uma inclinação da regressão de 0,923 e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,97.

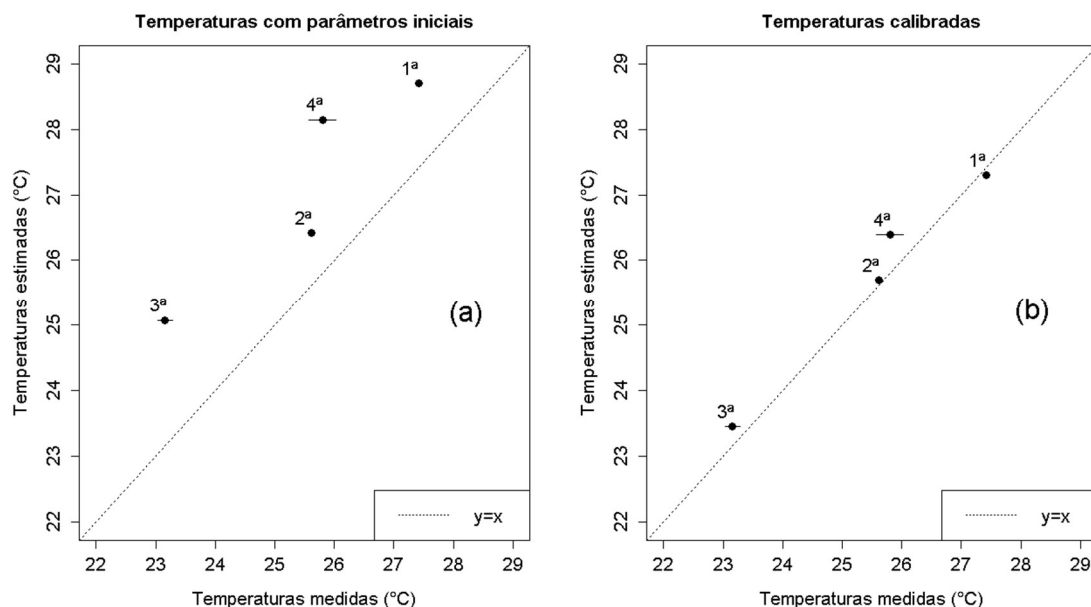


Figura 3 - Resultado das simulações de temperatura antes (a) e após (b) a calibração.

Para o ajuste da turbulência na interface ar-água, os valores dos parâmetros foram  $\text{declivMédia} = 3,92 \cdot 10^{-6}$  e  $\text{velMpar} = 1,497$ . Os segmentos de retas horizontais correspondem à incerteza da medição dos fluxos (ver Figura 4). O ajuste do fluxo de metano medido pelo estimado obteve uma inclinação da regressão de 0,964 e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,62.

### Calibração F. Difusivo de CH<sub>4</sub> na interface ar-água

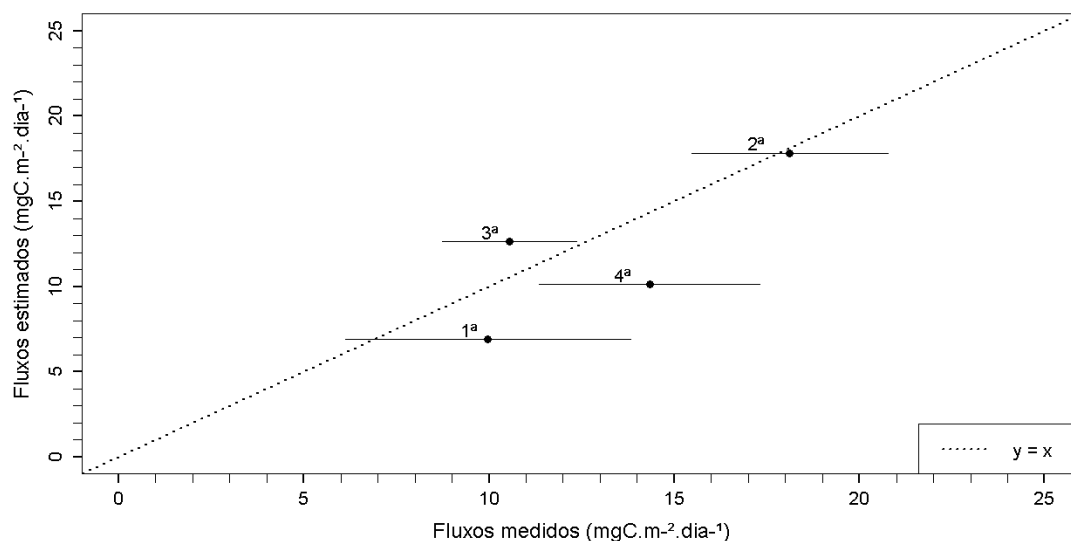


Figura 4 - Ajuste do fluxo difusivo de CH<sub>4</sub> na interface ar-água, em mgC.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, após calibração dos parâmetros de turbulência.

Para a calibração dos parâmetros de processos nos sedimentos os resultados foram:  $K_{eg20^\circ} = 1,8 \cdot 10^{-3}$ ,  $\theta_{keg} = 1,0645$ ,  $H_{sed} = 0,034$ ,  $K_{C20^\circ} = 3293$ ,  $Tr_{Ssed} = 163$ ,  $\theta_{NC} = 0,413$  e  $r_{l\_bolhas} = 0,0087$ . A Figura 5 apresenta o ajuste do fluxo ebulitivo pelo fluxo medido que obteve uma inclinação da regressão de 0,81 e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,66. Segundo Stepanenko *et al.* (2016), erros de até uma ordem de magnitude podem ser considerados baixos para as estimativas médias totais de fluxo ebulitivo de CH<sub>4</sub> em lagos. Como o ajuste obtido neste trabalho se aplica a rios, é razoável que os resíduos do ajuste estejam menores do que esta proporção.

### Calibração F. Ebulitivo de CH<sub>4</sub>

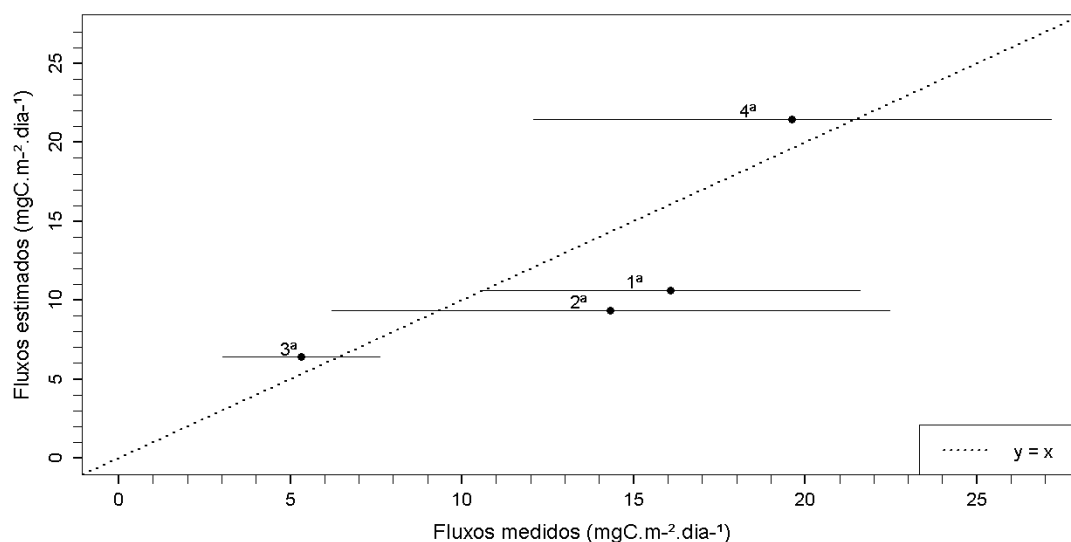


Figura 5 - Ajuste do fluxo ebulitivo de CH<sub>4</sub> na interface ar-água, em mgC.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, após calibração de parâmetros selecionados no sedimento.

### 3.2 - Calibrações na simulação

No 1º experimento de calibração na simulação, onde foram considerados apenas os dados de uma campanha, a 3ª campanha foi escolhida por apresentar menos influência de fatores episódicos externos, como chuvas. Sendo uma calibração menos custosa, a função objetivo pode ser consultada 5780 vezes pelo ABC, totalizando 170 ciclos do algoritmo. O valor mínimo da função objetivo foi reduzido em 92% de 835,2 para 65,8. Sintetizando os resultados do 1º experimento, verificou-se que ambos os fluxos de metano para a atmosfera (Figura 6) além de 60% das variáveis-estado foram estimados dentro do intervalo de incerteza das medições, sendo que as demais variáveis-estado foram

super ou subestimadas em no máximo 12% além deste intervalo. Os valores dos parâmetros após a minimização foram:  $K_{ah20^\circ} = 10^{-4}$ ,  $K_{hb20^\circ} = 10^{-2}$ ,  $Vel_{RS} = 4,973 \times 10^{-3}$ ,  $Vel_S = 26,511$ ,  $K_{p20^\circ} = 4,9926$  e o  $K_{ab20^\circ} = 6,438 \times 10^{-2}$ .

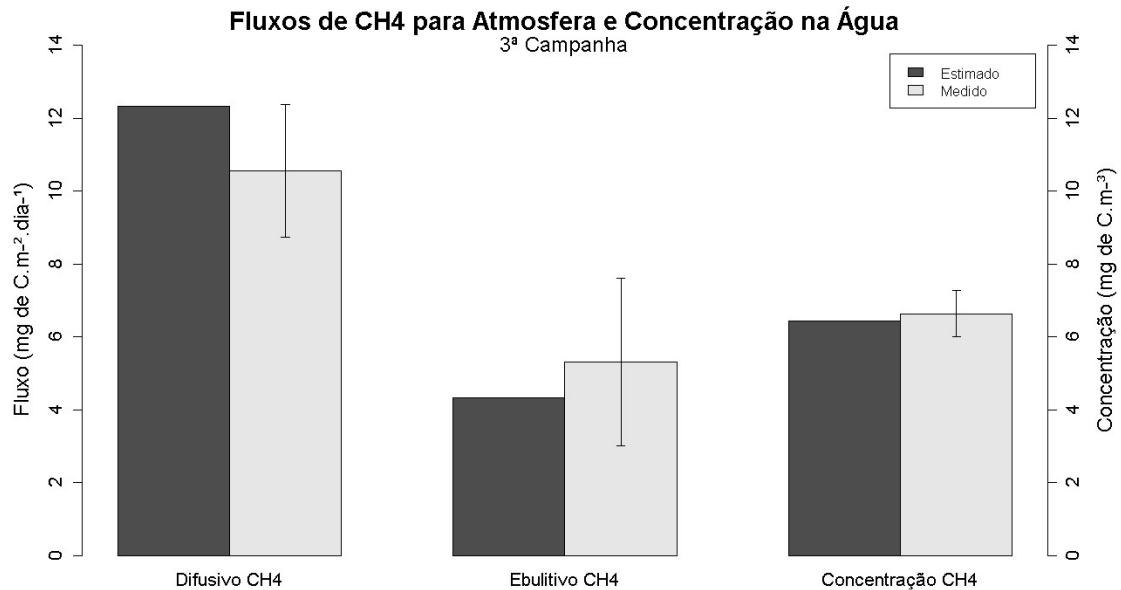


Figura 6 – Fluxos de CH<sub>4</sub> para atmosfera e a concentração de metano na água simulados para a 3ª campanha após calibração.

No 2º experimento de calibração na simulação foram considerados os dados de todas as 4 campanhas, visando uma representação da sazonalidade anual. Dada a maior exigência de recurso computacional deste experimento, foram fornecidos 3 conjuntos de valores de parâmetros (*foodsources*) na iniciação do ABC para acelerar a convergência. Estes conjuntos correspondem à três bons desempenhos, pouco correlacionados, obtidos no resultado da calibração do 1º experimento. O ABC rodou por 6 ciclos, totalizando 204 iterações. Os valores dos parâmetros após a calibração foram:  $K_{ah20^\circ} = 10^{-8}$ ,  $K_{hb20^\circ} = 10^{-2}$ ,  $Vel_{RS} = 7,133 \times 10^{-3}$ ,  $Vel_S = 30$ ,  $K_{p20^\circ} = 5,822$  e o  $K_{ab20^\circ} = 2,125 \times 10^{-2}$ . Ao aumentar o número de campanhas no experimento foi possível verificar a dificuldade do modelo de representar a variabilidade anual satisfatoriamente, tendo-se obtido uma boa performance apenas para as duas primeiras campanhas (Figura 7). A ausência de fluxo ebulitivo nas campanhas 3 e 4 indica que a produção no sedimento não atingiu a saturação de metano ou, se atingiu, não foi grande o suficiente para chegar à superfície devido às perdas na coluna d'água.

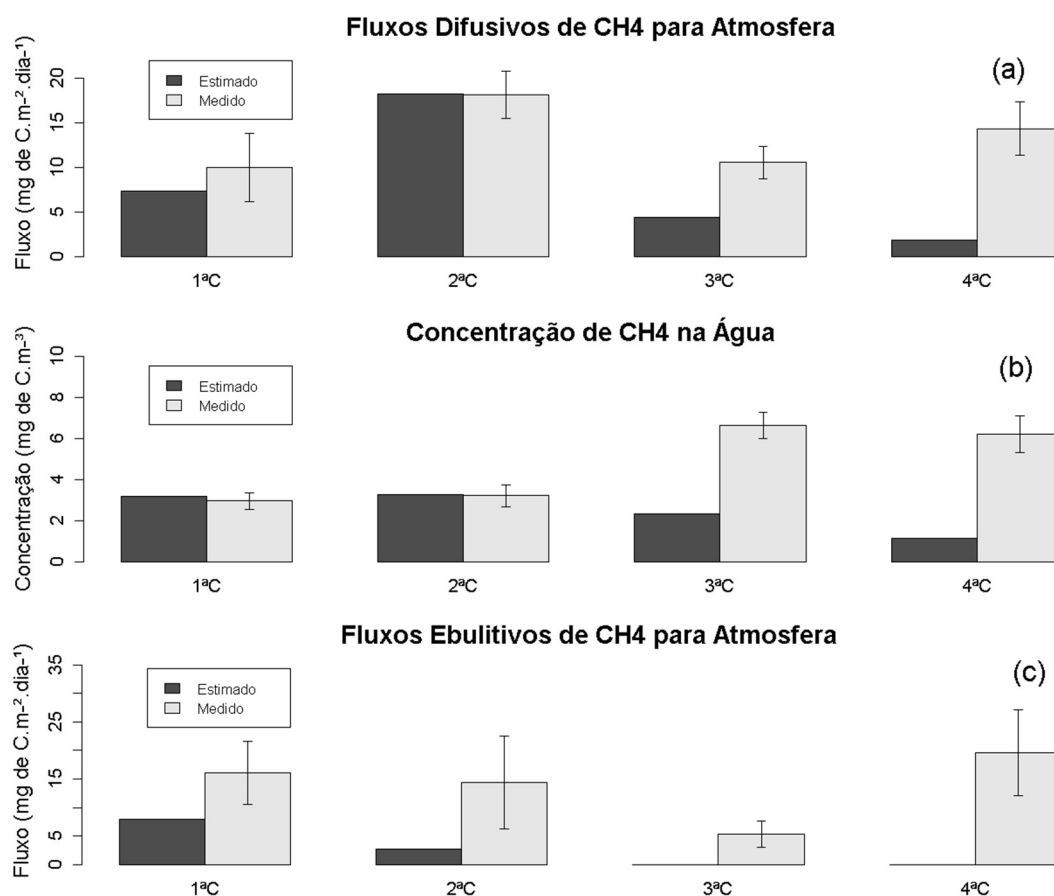


Figura 7 – Fluxos difusivos de metano para atmosfera (a); concentração de metano na água (b); e fluxos ebulitivos de metano para atmosfera (c) simulados para as 4 campanhas.

Em análise mais profunda dos resultados dos experimentos também foi possível identificar melhorias no modelo que podem ajudar na acurácia das estimativas ao longo do ano, como: (ii) a entrada das medições de pH diretamente como condição de contorno para corrigir desvios encontrados no cálculo do pH através da alcalinidade total; e (ii) modelagem sem a premissa de equilíbrio de carbono entre a água e os sedimentos através de explicitação espacial e incorporação de camadas na coluna d'água e/ou nos sedimentos. Incluídas as melhorias identificadas, o modelo mostrou boa capacidade para utilização em estudos de simulação de cenários futuros do comportamento do ciclo do carbono em corpos hídricos com fornecimento das condições de contorno através de acoplamento com modelos de bacias hidrográficas e de cenários climáticos.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Com a finalização do desenvolvimento do modelo e a totalização de 51 parâmetros, o procedimento de análise de sensibilidade demonstrou ser uma boa estratégia para reduzir o número de parâmetros a serem calibrados. As calibrações de parâmetros por medições específicas obtiveram resultados satisfatórios e permitiram isolar a variabilidade de alguns fenômenos representados das demais incertezas associadas à própria simulação além de reduzir o universo de parâmetros para a seleção. No 1º experimento de calibração, foram obtidos resultados bastante satisfatórios em termos de estimativas de emissão de metano para a atmosfera. Os fluxos difusivos e ebulitivos de CH<sub>4</sub>, além de 60% das variáveis-estado estimadas, se apresentaram dentro do intervalo de incerteza das medições. No 2º experimento, considerando as 4 campanhas juntas, os resultados se mantiveram satisfatórios apenas para as duas primeiras campanhas. Embora menos aderente, os resultados do 2º experimento permitiram a identificação de aprimoramentos no modelo com potencial de acurar as estimativas das emissões ao longo do ano, mantendo reduzido o número de parâmetros de calibração. Incluídas as melhorias, o modelo apresentou boa capacidade para utilização em estudos de simulação de cenários futuros do comportamento do ciclo do carbono em corpos hídricos.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS

- (1) DUCHEMIN, E., LUCOTTE, M., CANUEL, R., CHAMBERLAND, A. Production of the greenhouse gases CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> by hydroelectric reservoirs of the boreal region. *Global Biogeochem Cycles*. 1995;9(4):529–40.
- (2) KELLY, C.A., RUDD, J.W.M., ST. LOUIS, V.L., MOORE, T. Turning attention to reservoir surfaces, a neglected



area in greenhouse studies. *Eos, Trans Am Geophys Union*. 1994;75(29):332–3.

(3) ROSA, L.P., SANTOS, M.A., MATVIENKO, B., SANTOS, E.O., SIKAR, E. Greenhouse Gas Emissions from Hydroelectric Reservoirs in Tropical Regions. *Clim Change*. 2004;66:9–21.

(4) SANTOS, M.A. Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa Derivadas de Hidrelétricas. Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2000.

(5) DOS SANTOS, M.A., ROSA, L.P., SIKAR, B., SIKAR, E., DOS SANTOS, E.O. Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. *Energy Policy*. 2006;34(4):481–8.

(6) FEARNSIDE, P.M. Hidrelétricas Como “Fábricas De Metano”: O Papel Dos Reservatórios Em Áreas De Floresta Tropical Na Emissão De Gases De Efeito Estufa. *Oecologia Aust*. 2008;12(01):100–5.

(7) ROSA, L.P., SIKAR, B.M., SANTOS, M.A. DOS, SIKAR, E.M. Emissões de Dióxido de Carbono e de Metano pelos Reservatórios Hidrelétricos Brasileiros. *Ministério da Ciência e Tecnol*. 2006;118.

(8) BRASIL/MME. Emissões de Gases de Efeito Estufa em Reservatórios de Centrais Hidrelétricas. Rio de Janeiro: Brasil, Ministerio de Minas e Energia; 2014. 416 p.

(9) EPRI. The Role of Hydropower Reservoirs in Greenhouse Gas Emissions. Palo Alto, CA; 2010.

(10) IEA/HYDRO. Guidelines for Quantitative Analysis of Net GHG Emissions from Reservoirs - Volume 1 – Measurement Programs and Data Analysis. 2012.

(11) UNESCO/IHA. GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs: derived from: The UNESCO/IHA Greenhouse Gas Emissions from Freshwater Reservoirs Research Project / general ed.: Joel A. Goldenfum. London; 2010.

(12) MANNICH, M., RESENDE, J.F., FERNANDES, C.V.S., BERNARDO, J.W.Y., ZAHN, E., BLENINGER, T.B. CICLAR: Modelo 0D para Dinâmica de Carbono em Lagos e Reservatórios. *Rev Bras Recur Hídricos*. 2015;20(1):237–48.

(13) DIAS, N.L., GOBBI, M.F., AUGUSTO, F., ARMANI, S., HOELTGEBAUM, L.E. Projeto ELGEE / BALCAR — Relatório de Atividades até Maio de 2013 1 Medições micrometeorológicas de Itaipu. 2013.

(14) COLE, T.M., WELLS, S.A. CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 4.0 User Manual. Portland: Portland State Univeristy; 2016.

(15) ROSMAN, P.C.C. Referência Técnica do Sisbahia®. Rio de Janeiro: PENO - COPPE/ UFRJ; 2018.

(16) STEPANENKO, V., MAMMARELLA, I., OJALA, A., MIETTINEN, H., LYKOSOV, V., VESALA, T. LAKE 2.0: A model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. *Geosci Model Dev*. 2016;9(5):1977–2006.

(17) RAYMOND, P.A., ZAPPA, C.J., BUTMAN, D., BOTT, T.L., POTTER, J., MULHOLLAND, P., et al. Scaling the gas transfer velocity and hydraulic geometry in streams and small rivers. *Limnol Oceanogr Fluids Environ*. 2012;2(1):41–53.

(18) WEISS, R.F. Carbon Dioxide in Water and Seawater: The Solubility of a Non-Ideal Gas. *Mar Chem*. 1974;2:203–2015.

(19) WIESENBURG, D.A., GUINASSO, N.L. Equilibrium Solubilities of Methane, Carbon Monoxide, and Hydrogen in Water and Sea Water. *J Chem Eng Data*. 1979;24(4):356–60.

(20) DI TORO, D.M., PAQUIN, P.R., SUBBURAMU, K., GRUBER, D.A. Sediment Oxygen Demand Model: Methane and Ammonia Oxidation. *J Environ Eng*. 1990;116(5):945–86.

(21) MCGINNIS, D.F., GREINERT, J., ARTEMOV, Y., BEAUBIEN, S.E., WÜEST, A. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? *J Geophys Res Ocean*. 2006;111(9):1–15.

(22) CHAPRA, S.C. Surface Water-Quality Modeling. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. 1997.

(23) ABREU, J.L.S. DE. Estimativas de Emissão de Metano em Aproveitamentos Hidrelétricos: Desenvolvimento e Calibração de Modelo 0D Aplicado à Situação de Pré- Enchimento. UFRJ/ COPPE; 2021.

(24) DOS SANTOS, M.A., MADDOCK, J.E.L., AMORIM, M.A., BENTES, A.M.P., JORDÃO, M.D.L., NZUALO, T. DAS N.M. Monitoramento de Fluxos de Gases de Efeito Estufa e de Parâmetros de Qualidade da Água na Área da UHE SINOP - Relatório Final. Rio de Janeiro; 2018.

(25) TUNDISI, J.G., ABE, D.S., GALLI, C.S., BLANCO, F. DE P., PIZZO, V.T.S., LIMA, C.P.P. DE, et al. Monitoramento de Fluxos de Gases de Efeito Estufa e de Parâmetros de Qualidade da Água na Área da UHE Sinop - Relatório Final Consolidado. São Carlos; 2018.

(26) YUAN, Y., KHARE, Y., WANG, X., PARAJULI, P.B., KISEKKA, I., FINSTERLE, S. Hydrologic and water quality models: Sensitivity. *Am Soc Agric Biol Eng*. 2015;58(6):1721–44.

(27) MORADKHANI, H., SOROOSHIAN, S. General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis. In: Sorooshian S, Hsu K, Coppola E, Tomassetti B, Verdecchia M, Visconti G, editors. Hydrological Modelling and the Water Cycle. Berlin: Springer; 2009. p. 1–24.

(28) CHO, J.H., SEOK SUNG, K., RYONG HA, S. A river water quality management model for optimising regional wastewater treatment using a genetic algorithm. *J Environ Manage*. 2004;73(3):229–42.

(29) HUO, J., LIU, L. Application research of multi-objective Artificial Bee Colony optimization algorithm for parameters calibration of hydrological model. *Neural Comput Appl*. 2019;31(9):4715–32.

(30) LIU, S., BUTLER, D., BRAZIER, R., HEATHWAITE, L., KHU, S.T. Using genetic algorithms to calibrate a water

quality model. *Sci Total Environ.* 2007;374:260–72.

(31) KARABOGA, D. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. 2005.

## DADOS BIOGRÁFICOS



Juliano Lucas Souza de Abreu é pesquisador na área de recursos hídricos e meio ambiente, com foco em mudanças climáticas e emissões de gases de efeito estufa associados às atividades do setor elétrico. Atua, em colaboração com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), em projetos de pesquisa e desenvolvimento de metodologias, modelos e ferramentas computacionais que apoiam o diagnóstico, a minimização, a mitigação e/ou o monitoramento de impactos ambientais de empreendimentos do setor elétrico. É graduado em engenharia ambiental pela UFSCar, em oceanografia pela UERJ e mestre em recursos hídricos e meio ambiente pelo PEC/COPPE/UFRJ.

(2)

JORGE

MACHADO

DAMÁZIO

J.M. Damazio tem graduação em Engenharia Civil pela UFRJ (1977), mestrado em (1980) e doutorado (1977) em Engenharia Civil pela COPPE / UFJ. Desde 1977 é pesquisador do CEPEL, onde atua em inventário hidroelétrico, otimização da expansão e da operação de sistemas elétricos, séries temporais hidrológicas, operação para controle de cheias, mitigação de impactos ambientais, emissões de gases de efeito estufa e adaptação/resiliência às mudanças climáticas de hidroelétricas. Desde 2000 é professor do Instituto de Matemática da UERJ onde leciona Tópicos Especiais em Métodos de Decisão e Processos Industriais e Modelos de Regressão Linear no Departamento de Estatística.